



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

EFFECTO DEL ACABADO SUPERFICIAL INICIAL Y LA LUBRICACIÓN EN EL DESGASTE DE ACEROS PERLÍTICOS BAJO CONDICIONES RODANTE DESLIZANTES

JAIME ALBERTO JARAMILLO CARVALHO

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Colombia
2014

EFECTO DEL ACABADO SUPERFICIAL INICIAL Y LA LUBRICACIÓN EN EL DESGASTE DE ACEROS PERLÍTICOS BAJO CONDICIONES RODANTE DESLIZANTES

JAIME ALBERTO JARAMILLO CARVALHO

Trabajo de Grado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería

Director: Alejandro Toro, Ph.D.

Línea de Investigación: Sistemas Ferroviarios
Grupo de Investigación: Grupo de Tribología y Superficies
Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Colombia

2014

A Mi Abuela Lucía y a mi madre Martha por su amor incondicional y desinteresado, las dos mujeres a las cuales les debo todo lo que soy y podré ser.

A mis hermanos Andrés, Julián y Camilo

A mi Amigo ,profesor Alvaro León Ospina por su guía y apoyo en momentos difíciles

A mi gran amigo Sergio Toro, por su amistad y compañía en este proceso

A mi novia por compartir su amor y paciencia en mi vida

*"No el mucho saber harta y satisface el alma,
sino el sentir y gustar de las cosas
internamente"*

Iñigo López (san Ignacio de Loyola)

(1491-1556)

¿Hay espacio en uno mismo para la reflexión cuidada y silenciosa del acontecer diario? El mundo, tal como está concebido hoy en día, se asemeja a un tren de alta velocidad, en el que no hay lugar para la pausa, no existen estaciones, y no se repara en el paisaje. El único objetivo es lo siguiente, lo próximo, lo venidero, que una vez alcanzado, forma parte de un pasado al que no podremos volver por falta de tiempo.

A.M.D.G-

Agradecimientos

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

Agradezco al Doctor, al profesor, al ser humano que es Alejandro Toro, por haber insistido y confiado en mi persona, por la paciencia ante mi inconsistencia y por la dirección de este trabajo.

Gracias a las dos personas más leales que he conocido a Luis Guillermo Hernández y Mauricio Gonzales, a los cuales sin su ayuda jamás hubiera sido posible este trabajo.

A mi tío Jaime Muñoz y mis amigos Sergio Toro, Andrés Suarez Felipe Arroyave, Jaime Alfonso por permitirme entrar en su vida y acompañarme y no dejarme en los momentos más difíciles.

Gracias también a mis queridos compañeros, que me ayudaron y me permitieron compartir experiencia durante este tiempo de convivir dentro y fuera del salón de clase, Diego Zapata, Carlos Cardona, Laura Catalina Córdoba, Luis Tobón, Juan Camilo Sánchez, Sergio Zapata, Guillermo Idárraga, Alejandro Vásquez

A mi madre, a mi abuela y a Karen que me acompañaron en proceso que significó la maestría y que, de forma incondicional, entendieron mis ausencias y mis malos momentos.

Gracias a todos

Resumen

La influencia de la rugosidad superficial en un contacto rueda riel ha sido una preocupación en los sistemas ferroviarios desde la introducción del reperfilado de la rueda y el riel como estrategias de mantenimiento. Actualmente, no hay indicaciones bien definidas con respecto a las topografías superficiales en el reperfilado de estos componentes. Existe, de esta manera, una necesidad de establecer directrices iniciales para trabajar con las texturas superficiales de estos componentes con el fin de minimizar los costos de reperfilado y mejorar el rendimiento de componentes rueda-riel. Este trabajo tiene por objeto investigar la interacción de diferentes factores que involucran el acabado superficial inicial en las ruedas, la lubricación, y condiciones rodante-deslizantes, en el desgaste y el daño superficial de los componentes rueda-riel, a través de la simulación experimental en el laboratorio usando un tribómetro de tipo disco sobre disco. Para el desarrollo de este trabajo se ha fijado un valor de acabado superficial establecidos en el parámetro de rugosidad Ra, con un valor inicial para el riel y dos valores de rugosidad diferentes para la rueda, un diseño de experimentos (DOE) se ha utilizado para llevar a cabo las pruebas y analizar los efectos sobre el desgaste (pérdida de masa) que tienen estos factores. Los resultados mostraron que diferentes niveles de rugosidad inicial superficial, y diferentes condiciones de lubricación afectan el desgaste de algunos pares de materiales en los resultados de laboratorio.

Palabras clave: Desgaste por rodadura, Reperfilado, Acabado superficial, Sistemas ferroviarios.

Abstract

The influence of surface roughness in a rail/wheel contact has been a concern for railway systems since the introduction of rail grinding as a maintenance strategy. Currently, there are no well-defined guidelines regarding the surface topographies of ground rails and wheels. There is thus a need to establish initial guidelines to work with the surface topographies for the rails and wheels in order to minimize grinding costs/time and improve rail/wheel performance. This study is aimed at investigating the correlations among lubrication, rolling/sliding conditions and the influence of initial surface roughness of wheels and rails on their wear behavior through experimental simulation in the laboratory. A twin-disc rolling/sliding testing machine has been used in this experimental work. We fixed a value of initial roughness for a rail specimen and two different roughness values were produced for wheels specimens. A Design of Experiment approach (DOE) was used to conduct experiments and to analyze the effects on wear (mass loss) results. The results show that the levels of initial surface roughness and the lubrication condition of the specimens in some material pairs influence wear and the resultant surface damage

Keywords: Rolling Contact Wear, rail grinding, surface roughness, railway systems.

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	1
Introducción	2
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
1.1 Fenómeno de Interacción Rueda Riel:	5
1.2 Mecánica de contacto interacción Rueda/Riel	7
1.2.1 Introducción	7
1.2.2 Esfuerzos de contacto normales	7
1.2.3 Fuerza de deslizamiento (problema tangencial)	10
1.2.4 Limite del “Shakedown”	13
1.3 Fenómenos de desgaste en sistemas Rueda/Riel	14
1.3.1 Desgaste en el periodo de acomodamiento (running-in) en el sistema Rueda/Riel	15
1.3.2 Mecanismos de Desgaste en Sistemas Rueda/Riel	16
1.3.3 Lubricación en sistemas rueda riel:	23
1.3.4 Materiales empleados en sistemas rueda/riel:.....	25
1.3.5 Estado del Arte.....	26
2. Objetivos	33
2.1 Objetivo General:.....	33
2.1.1 Objetivos Específicos:	33
3. Materiales y Métodos	35
3.1 Introducción	35
3.2 Materiales	35
3.2.1 Composición Química	35
3.3 Proceso de Obtención de Probetas	36
3.3.1 Obtención Probetas Rueda.	36
3.3.2 Obtención Probetas Riel	37
3.4 Tratamientos térmicos	39
3.4.1 Tratamiento térmico de las probetas de Rueda	39
3.4.2 Tratamiento térmico de las probetas de Riel.	40
3.4.3 Ensayo de dureza bajo la norma ASTM E92-82.....	41
3.5 Obtención del acabado superficial inicial	41
3.5.1 Acabado superficial de las probetas de rueda.....	42

3.5.2	Acabado superficial de las probetas de riel.....	43
3.6	Ensayos de desgaste en tribómetro disco sobre disco	46
3.6.1	Condiciones de experimentación:	49
3.7	Diseño Experimental	50
3.7.1	Niveles y Factores	50
3.7.2	Procedimiento general de ensayo:.....	53
3.7.3	Variables de salida:	54
4.	Resultados y Discusión.....	57
4.1	Análisis microestructural.....	57
4.1.1	Microestructura de la Rueda	57
4.1.2	Microestructura del riel.....	58
4.2	RESISTENCIA AL DESGASTE	58
4.2.1	Probetas de riel.....	58
4.2.2	Probetas de Rueda.....	68
4.2.3	Tribosistema Rueda/Riel.....	78
4.3	Análisis Estadístico de Resultados	82
4.4	Análisis de superficie y material deformado.....	91
4.4.1	Condiciones de menor desempeño Tribológico.	91
4.4.2	Condiciones de mejor desempeño tribológico.....	95
4.4.3	Evolución de la calidad superficial	97
5.	Conclusiones y recomendaciones	105
5.1	Conclusiones.....	103
5.2	Recomendaciones.....	105
	Bibliografía	108
A.	Anexo 1: curva de tratamiento térmico del acero R260	113
B.	Anexo 2: Ensayo cuatro bolas grasa Ossagol v	114
C.	Anexo 3: Resultados Análisis estadístico riel	116
D.	Anexo 4: Resultados análisis estadístico rueda riel	118
E.	Anexo 5: Definición de parámetros de rugosidad superficial derivados de la curva de Abbot-Firestone.....	116

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Fuerzas Verticales y Horizontales en el contacto rueda-riel.....	6
Figura 1-2: Configuración de pista recta y curva.....	7
Figura 1-3: Distribución de esfuerzos normales de Hertz en el área de contacto	8
Figura 1-4: Esfuerzo de contacto conjunto Rueda/Riel al girar en una curva	9
Figura 1-5: Zonas de Contacto durante la interacción Rueda/Riel a)posicion[3]	10
Figura 1-6: Relación entre fuerzas de tracción y deslizamiento longitudinal.....	11
Figura 1-7: Mapa de Shakedown	14
Figura 1-8: Curvas de variación de volumen de desgaste y rugosidad superficial ...	15
Figura 1-9: cambio del coeficiente de fricción y rugosidad	16
Figura 1-10: Grietas y desprendimiento de material en un caso de desgaste	17
Figura 1-11: Micro-contactos y adhesión en el sistema Rueda/Riel [7]	18
Figura 1-12: Micro-contactos y adhesión	19
Figura 1-13: Configuración de pista recta y curva [8]	20
Figura 1-14: Desgaste oxidativo.	20
Figura 1-15: Tasas de desgaste para material R8T.en pruebas de rodadura deslizamiento en el tribómetro “twin disc machine”[9].....	22
Figura 1-16: Curva esquemática de Stribeck [13]	23
Figura 1-17: Distribución de presión de una rueda de 43cm contra un riel.[16].....	27
Figura 1-18: Distribución de presión y esfuerzo cortante principal	28
Figura 1-19: Textura inicial de las probetas ensayadas	29
Figura 1-20: Evolución del parámetro de rugosidad Rz con el número de ciclos	29
Figura 1-21: Endurecimiento de la superficie con el aumento del ciclaje.	30
Figura 1-22: Efecto del número de ciclos iniciales en seco en la vida a RCF.....	31
Figura 1-23: Superficies desgastadas de las probetas de Riel y Rueda.	32
Figura 1-242: Desgaste específico de Riel y Rueda para probetas Con nivel alto	32
Figura 3-1: Proceso de Corte y obtención de probetas del componente Rueda.....	37
Figura 3-2: Proceso de Corte y obtención de probetas del componente Riel.....	38
Figura 3-3: Dimensiones Probetas antes y después de tratamientos térmicos	38
Figura 3-4: Corte transversal y toma de durezas para las probetas	41
Figura 3-5: .Proceso de reperfilado de una rueda del Sistema Metro de Medellín ...	43
Figura 3-6: Acabado superficial Probetas Riel	44
Figura 3-7: Medición de rugosidad en rieles con rugosímetro portátil	44
Figura 3-8.Montaje para Esmerilar las probetas que representan el riel	45
Figura 3-9. . Máquina de ensayos tipo Disco-Disco.....	47
Figura 3-10.. Dispositivo de medición de carga en el experimento	47

Figura 3-11.. ..Sistema de Sujeción de las probetas de experimentación.....	48
Figura 3-12. Configuración de las probetas en un ensayo Disco-Disco [22].....	48
Figura 3-13. Esquema General Diseño experimental.....	52
Figura 3-14. Procedimiento de extracción de probetas para análisis metalográfico.	55
Figura 3-15. Procedimiento Extracción Muestra de material para micro dureza	55
Figura 4-1: Microestructura de material probetas rueda alemana nital 2%.	57
Figura 4-2: Microestructura de material Probetas Riel R260 nital 2%.	58
Figura 4-3: Pérdida de masa promedio del riel a 0% deslizamiento.....	59
Figura 4-4: Pérdida de masa y variación de parámetros de amplitud Ra, Rq.	60
Figura 4-5: Pérdida de masa y variación de parámetros de amplitud Rz.	61
Figura 4-6: Pérdida de masa y variación de parámetros de contacto Rk, Rpk; Rvk 0%	62
Figura 4-7: Pérdida de masa y variación de parámetros de simetría y distribución de picos Rsk, Rku a 0%.....	63
Figura 4-8: Pérdida de masa promedio del riel bajo rodadura-deslizamiento 2%.....	64
Figura 4-9: Pérdida de masa y variación de parámetros de amplitud Ra, Rq con rodadura-dslizamiento 2%	65
Figura 4-10. Pérdida de masa y variación de parámetros de amplitud Rz con rodadura- deslizamiento 2%.....	66
Figura 4-11: Pérdida de masa y variación de parámetros Rk, Rvk, Rpk con rodadura y deslizamiento 2%.....	67
Figura 4-12: Pérdida de masa y variación de parámetros Rsk, Rku con rodadura y deslizamiento a 2%.....	68
Figura 4-13: Pérdida de masa Promedio Acumulada para rueda 0%.	69
Figura 4-14: Pérdida de masa y variación de parámetros de amplitud Ra, Rq.	70
Figura 4-15. Pérdida de masa y variación de parámetros de amplitud Rz.....	71
Figura 4-16: Pérdida de masa y variación de parámetros de contacto Rk, Rpk; Rvk	72
Figura 4-17: Pérdida de masa y variación de parámetros de simetría y distribución de picos Rsk.	73
Figura 4-18: Pérdida de masa Promedio Acumulada con rueda rodadura- deslizamiento 2%.....	74
Figura 4-19: Pérdida de masa y variación de parámetros de amplitud Ra, Rq con rodadura-deslizamiento 2%.....	75
Figura 4-20. Pérdida de masa y variación de parámetros de amplitud Rz con rodadura deslizamiento 2%.....	75
Figura 4-21. Pérdida de masa y variación de parámetros Rk, Rvk, Rpk con rodadura y deslizamiento a 2	77
Figura 4-22. Pérdida de masa y variación de parámetros Rku, Rsk con rodadura y deslizamiento 2%.....	78
Figura 4-23. Relación Pérdidas de masa acumuladas (Ruedas/ Tribosistema) a 0% deslizamiento.....	79
Figura 4-24. Relación Pérdidas de masa acumuladas (Rueda/ Tribosistema) con rodadura- deslizamiento 2%.....	81

Figura 4-25. Relación Pérdidas de masa acumuladas (Riel/Tribosistema) con rodadura-deslizamiento 0% y 2%. 82

Figura 4-26. Gráfico de cubos (medias de los datos) para la Rueda 83

Figura 4-26. Gráfica de residuos variable respuesta masa Rueda 84

Figura 4-28. Estadístico denominado Anderson-Darling..... 85

Figura 4-29. Gráfica de Pareto de efectos estandarizados 86

.Figura 4-30. Grafica Normal de efectos estandarizados 87

Figura 4-31. Gráfica de efectos principales para Masa Rueda 88

Figura 4-32. Gráfica de efectos principales para Masa Riel..... 89

Figura 4-33. Gráfica de efectos principales para Masa Rueda+Riel 91

Figura 4-34. Probetas de riel más afectados, condición, “3,2 seco 0%” 92

Figura 4-35. Probetas de riel más afectado, condición, “3,2 seco 2%” 93

Figura 4-36. Rueda Con menor desempeño bajo la condición de Rueda 6,3 Lub 2%. .. 94

Figura 4-37. Rueda Con menor desempeño bajo la condición de Rueda 6,3 seco 0%... 94

Figura 4-38. Riel Con mejor desempeño, y contra cuerpo de la condición “rueda 6,3 seco 0%”.
a) b)..... 95

Figura 4-39. Rueda Con menor pérdida de masa. Condición de Rueda 3,2 seco 0%..... 96

Figura 4-40. Rueda Con menor pérdida de masa. Condición de Rueda 3,2 seco 2%..... 96

Figura 4-41. Superficie de riel con piedra grano 16 97

Figura 4-42. Superficie de Ruedas Mecanizadas con [3,2 μ m y 6,3 μ m] 97

Figura 4-43. Superficie final Rueda menor desempeño: ensayo “6,3 seco 0%” 98

Figura 4-44. Superficie desgastada Riel después de 220.000 ciclos Ensayo “6,3 seco 0%” 99

Figura 4-45. Superficie desgastada de rueda después de 220.000 ciclos Ensayo “6,3 lub 2%” 100

Figura 4-46. Superficie desgastada de riel después de 220.000 ciclos Ensayo “6,3 lub 2%” 101

Figura 4-47. Microdurezas Para probetas riel con alto y bajo desempeño 101

Figura 4-48. Microdurezas Para probetas de rueda con alto y bajo desempeño 102

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Características de los regímenes moderado y severo	21
Tabla 3-1: Composición Química Riel R260 (posterior año 2000)	36
Tabla 3-2: Composición Química Rueda Alemana.	36
Tabla 3-3: Tratamiento Térmico probetas Rueda	40
Tabla 3-4: Ciclos térmicos para el material del Riel R260.	40
Tabla 3-5: Acabado superficial de rueda derecha, eje 09, Vagón U28.	42
Tabla 3-6: Condiciones de mecanizado. Probeta rueda.	43
Tabla 3-7: Parámetros de rugosidad medidos en vía	44
Tabla 3-8: Parámetros de maquinado para acabado superficial Riel.....	46
Tabla 3-9: Factores considerados en el diseño experimental.....	51
Tabla 3-10: Arreglo experimental Ensayos En Minitab.....	53
Tabla 4-1: Efectos y Coeficientes estimados para Masa Rueda.....	86
Tabla 4-2: Efectos y Coeficientes estimados para Masa RIEL	89

Introducción

En las últimas dos décadas ha ocurrido un aumento en las exigencias de los sistemas de transportes ferroviarios a nivel mundial, sobre los cuales se requieren conexiones más frecuentes y desplazamientos más rápidos, con mayores capacidades de carga tanto en tráfico de pasajeros como de mercancía. El sistema de transporte masivo del Metro de la ciudad de Medellín no ha sido la excepción a estos requerimientos, donde ha pasado de movilizar en el año 1995 un total de 233.935 usuarios diariamente [1] a movilizar en el 2013 un total 555.342 [2]. Tales exigencias pueden tener efectos específicos sobre el desgaste de las vías y componentes, generando fenómenos de fatiga, sobre los cuales se hace necesario realizar intervenciones de mantenimiento para no restringir la productividad de la infraestructura y así minimizar los costos de operación.

El reperfilado de rieles es una de las actividades de mantenimiento que actualmente se emplean para minimizar los fenómenos de fatiga asociados a altas exigencias de operación, mediante esta actividad es posible la eliminación de defectos superficiales tales como ondulaciones, grietas superficiales (*head-checks*) y sub-superficiales en los rieles, del mismo modo las ruedas de los vagones requieren de un reperfilado en un torno para remover los defectos de la superficie y así restaurar o generar un perfil deseado que permita minimizar y retrasar la aparición y propagación de defectos en dichos componentes ferroviarios.

El efecto de estas intervenciones genera una rugosidad específica, cuya influencia en el contacto rueda riel ha sido una preocupación para las compañías ferroviarias desde la introducción del reperfilado como estrategia de mantenimiento. Existe, en algunos sistemas ferroviarios una necesidad de establecer directrices bien definidas con respecto a las topografías de las superficies de los componentes rueda-riel ya sean superficies nuevas o re-perfiladas con el fin de mejorar el rendimiento de los componentes y minimizar el tiempo de reperfilados sucesivos. Esta tesis se refiere a la influencia de diferentes factores que involucran condiciones de lubricación (capa límite) y de rodadura -deslizamiento así como la influencia del acabado superficial inicial de la rueda en un sistema rueda-riel, y su respuesta sobre el comportamiento al desgaste y el daño de las superficies en contacto. Los resultados presentados en esta tesis se basan en condiciones de laboratorio controladas que simulan el contacto rueda-riel.

Un tribómetro denominado disco-disco fue utilizado para simular condiciones de contacto rueda-riel; las probetas para este experimento fueron obtenidas de rieles bajo denominación R260 de fabricación posterior al año 2000 y una rueda de fabricación alemana, ambos suministrados por el sistema Metro de Medellín. Un diseño de experimentos (DOE) se empleó para direccionar los ensayos de laboratorio y analizar los resultados de pérdida de masa como variable de salida en función de tres factores, rugosidad (A), lubricación (B), deslizamiento (C), cada uno con dos niveles de trabajo, logrando así establecer relaciones entre mecanismos de desgaste, propiedades mecánicas y la influencia de dichos factores en el tribosistema rueda/riel.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Uno de los modos de falla más importantes en componentes de maquinaria es el relacionado con el desgaste de las superficies en contacto, debido a que generan pérdida de material, cambios dimensionales y problemas durante el funcionamiento como ruido, consumo excesivo de energía y costos de reparación. En el caso de los sistemas ferroviarios es de gran interés el estudio de las condiciones de interacción entre los componentes rueda-riel, los cuales a través de las exigencias a las que se someten presentan serias dificultades en términos de duración y cambio en las condiciones de operación. El cambio en estas condiciones está relacionado con la ocurrencia de fenómenos de deformación plástica y/o desgaste, los cuales a su vez son función de las propiedades mecánicas, condiciones de contacto, efectos ambientales y las características microestructurales de los materiales.

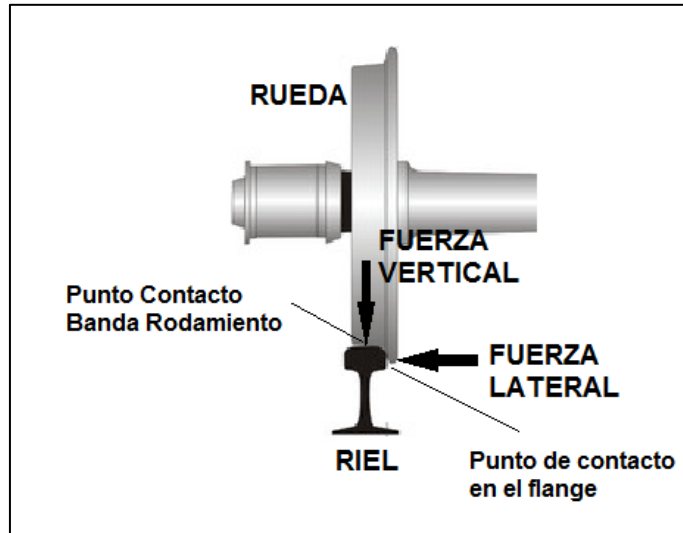
1.1 Fenómeno de Interacción Rueda Riel:

La alta eficiencia energética de los sistemas de transporte ferroviario se hace posible por las bajas pérdidas en el contacto de rodadura entre las superficies del conjunto rueda-riel, el cual se da en un área muy pequeña. Sin embargo, varios fenómenos no deseados pueden ocurrir entre estos dos componentes, (ver figura.1-1) donde se presentan altas fuerzas de contacto verticales, fuerzas laterales y longitudinales, que inducen tensiones que pueden causar fatiga. Las fuerzas de tracción y frenado pueden conducir al deslizamiento de la rueda, lo que resulta en aumentos de temperatura en el riel y formación de planos en las ruedas, transformaciones de fase indeseables en el material y grietas térmicas.

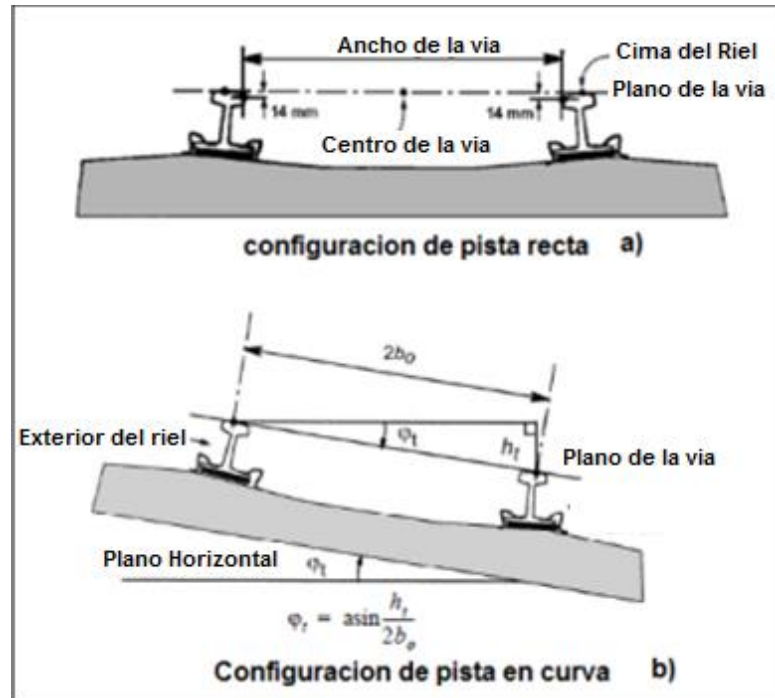
Estos fenómenos pueden crear irregularidades y desgastar las geometrías de contacto del perfil de la rueda y el riel, resultando en variaciones en la dinámica del vehículo, provocando un aumento adicional de las fuerzas de contacto, vibraciones y ruido. La consecuencia puede ser la incomodidad y molestias para los pasajeros así como el

aumento de los costos de mantenimiento de los componentes rueda/riel. Los casos graves pueden incluso dar lugar a un descarrilamiento o fractura del riel.

Figura 1-1: Fuerzas Verticales y Horizontales en el contacto rueda-riel.



Para estudiar los fenómenos de contacto en el sistema rueda/riel, es importante tener claridad sobre algunos conceptos básicos; en este sentido se puede indicar que cuando un vehículo ingresa en una curva, los rieles se especifican de la siguiente manera: “Riel alto” se denomina a aquel elemento que está situado en el punto más alto de la vía, esto debido al llamado canto (ver figura 1-2b) que es la diferencia de nivel de altura entre dos rieles. El Riel más interior está en un nivel más bajo que el riel exterior y es llamado “Riel bajo”. La distancia entre los extremos interiores de las cabezas de los dos rieles se denomina ancho de vía (ver figura 1-2a).

Figura 1-2: Configuración de pista recta y curva

1.2 Mecánica de contacto interacción Rueda/Riel

1.2.1 Introducción

La mecánica de contacto de sistemas ferroviarios establece relaciones entre los esfuerzos, el deslizamiento y la geometría del sistema rueda/riel y condiciones de operación de la vía. El objetivo fundamental del estudio del contacto es determinar el tamaño, la forma de la región de contacto así como magnitud de los esfuerzos normales y tangenciales que allí se generan.

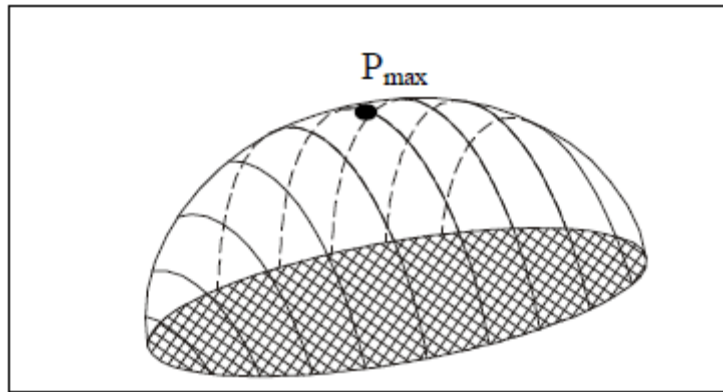
1.2.2 Esfuerzos de contacto normales

Como el punto de contacto entre rueda y riel en sistemas ferroviarios no se presenta de manera uniforme sobre toda la rueda o el perfil de riel, la forma de los perfiles cambia con el tiempo debido al desgaste (proceso en gran parte generado por las cargas y la condición de deslizamiento durante el contacto). Con el propósito de predecir cómo pueden evolucionar los perfiles, se requiere alcanzar una adecuada comprensión de los esfuerzos de contacto normales, los cuales entre otros, los responsables de la aparición

de fatiga por contacto de rodadura o “rolling contact fatigue” por sus siglas en inglés (RCF), de los componentes ferroviarios.

En un sistema ferroviario, dos cuerpos que se tocan en un punto, específicamente en las superficies de rodadura de la rueda y del riel, presentan una deformación en el área de contacto, la cual puede ser definida mediante el radio de la curvatura del punto de contacto y la carga aplicada, con lo cual se obtiene un área de contacto elíptica ver (Figura 1-3) con semiejes mayores a lo largo de los ejes longitudinales del riel y donde la presión máxima estaría definida por (ver Ecuación 1.1) [3]

Figura 1-3: Distribución de esfuerzos normales de Hertz en el área de contacto



$$P = \sqrt[3]{\frac{3FE^2}{2\pi^3 R_e^2 (1-V^2)^2}} \quad (1.1)$$

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

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1.2)$$

Se tiene que R1 y R2 son el radio de contacto del riel y la rueda en la banda de rodadura, este enfoque, sin embargo, debe realizarse bajo las siguientes suposiciones: 1) que las superficies en contacto son lisas y no hay efecto de las asperezas, 2) que el material tiene una respuesta elástico- lineal, 3) que se tiene un contacto sin fricción y 4) que las dimensiones del área de contacto deben ser pequeñas en comparación con los radios de

curvatura de los cuerpos en contacto. Para un tren urbano la presión máxima de Hertz puede estar en un rango de 600 Mpa entre la banda de rodadura de la rueda y la cabeza del riel, y hasta de 2700 Mpa en la zona de contacto de la pestaña de la rueda con la esquina del riel [3].

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

Durante el movimiento del vehículo la posición del juego de ruedas en relación con la vía presenta diferentes combinaciones de zonas de contacto durante la interacción de la rueda con la vía. En la figura 1-5 se muestran las tres diferentes regiones de contacto con las respectivas condiciones de esfuerzo; éstas se describen a continuación.

Figura 1-4: Esfuerzo de contacto conjunto rueda/riel al girar en una curva a) posición de los ejes trasero y delantero. b) Esfuerzos de contacto en eje delantero y trasero [4]

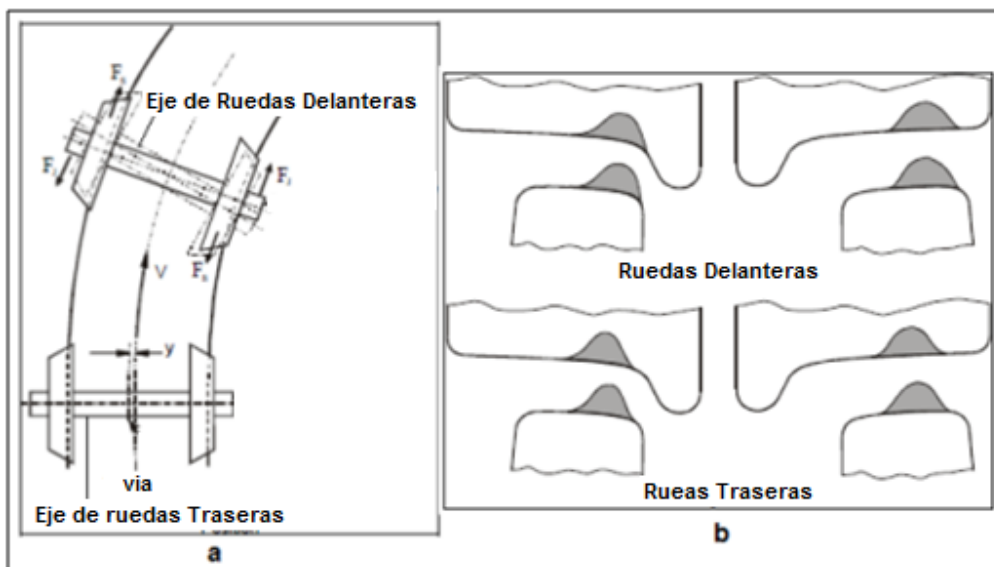
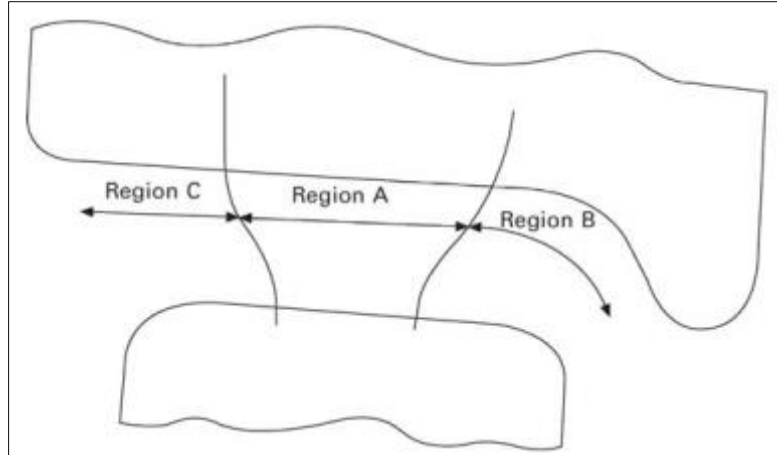


Figura 1-5: Zonas de Contacto durante la interacción Rueda/Riel a)posicion[4]

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

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

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

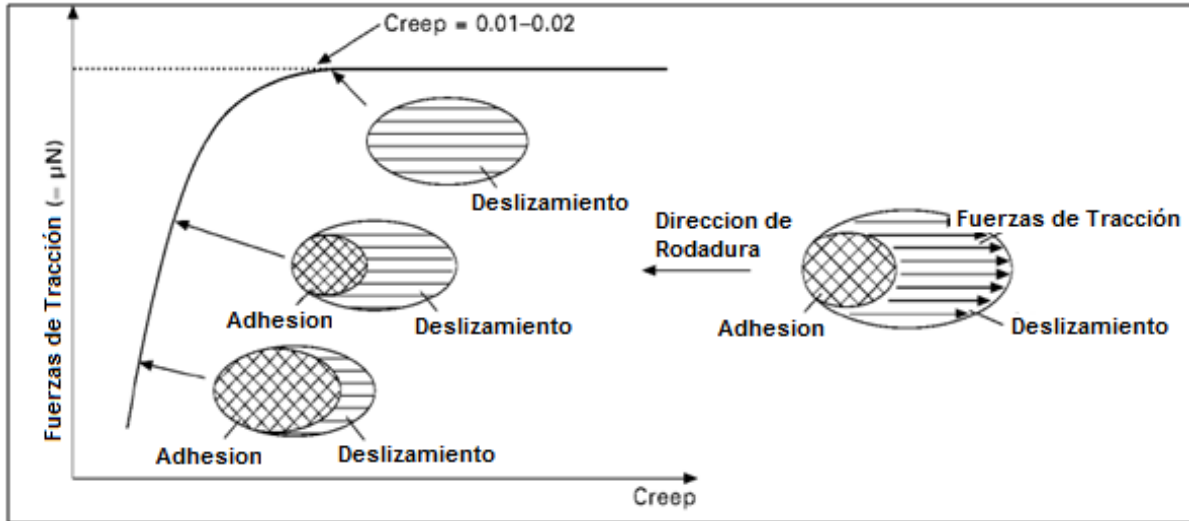
1.2.3 Fuerza de deslizamiento (problema tangencial)

Los resultados de la solución del problema normal son utilizados para resolver el problema tangencial, donde las fuerzas de tracción (deslizamiento), y torque (spin) se distribuyen sobre la región de contacto.

Se dice que dos cuerpos están rodando juntos uno contra otro, si existe una diferencia entre las velocidades angulares medida sobre sus ejes, siendo estos paralelos entre los elementos. Partiendo de esta premisa, en un punto tangente O va existir un plano común para ambos sólidos en donde va a existir una componente de velocidad V para cada una de las superficies en contacto. La velocidad angular de rodadura va a ser la diferencia entre cada una de las velocidades angulares ω_1 y ω_2 de los cuerpos en movimiento y sobre el plano tangente en el punto O. Así como los sólidos están rodando y tienen una velocidad asociada a esto, existirá una velocidad de deslizamiento que sería la diferencia entre las velocidades lineales V_1 y V_2 en ese punto. De donde se desprende el término velocidad de rodadura U definida como el promedio de las dos velocidades lineales

Cuando las superficies entran en contacto por causa de las cargas aplicadas, los sólidos experimentarán una deformación en los puntos de contacto, formándose una zona con dimensiones establecidas por la teoría de Hertz. Es posible determinar su tamaño si se conocen el valor de las cargas y propiedades del material. Si los dos cuerpos comienzan a girar en presencia de fricción, los puntos dentro de la zona de contacto experimentarán un deslizamiento relativo entre ellos, denominado (*slip*) o adhesión denominada (*stick*), en la cual los puntos en el contacto sufrirán un desfase respecto al movimiento de todo el sólido, lo que es conocido como *creep*. Cuando los cuerpos comienzan a rodar, las deformaciones en los sólidos generadas por los esfuerzos de tensión producen un alargamiento del material en la zona de contacto llevando a un pequeño aumento en el radio del elemento, esto provoca que un punto ubicado en el centro del cuerpo al realizar una vuelta, que es descrita por su perímetro $2\pi R$, y un punto externo en contacto recorra una distancia más grande, esta fracción de aumento en la distancia, se conoce como relación de *creep* ξ [5]

La figura 1-6 muestra la variación de la zona de contacto conforme se aumenta el porcentaje de deslizamiento observándose el incremento del área de la zona de *slip* hasta el punto en que en la zona de contacto hay deslizamiento 100%.

Figura 1-6: Relación entre fuerzas de tracción y deslizamiento longitudinal [6]

Cuando se genera el contacto rueda/riel, se presenta una región de no deslizamiento o adhesión (stick) y una regiones de deslizamiento (slip). Esta zona de deslizamiento está relacionada directamente con las deformaciones elásticas de las superficies en contacto, por lo que siempre se tendrá un elemento de micro-deslizamiento dentro de la zona, que hace su aporte a la resistencia al movimiento.[6]

Entre más grande sea el valor de la fuerza de tracción, más grande es la proporción de la región de deslizamiento en el parche de contacto hasta que la fuerza de tracción alcance su máximo nivel y es en este instante cuando el parche de contacto ya no puede absorber más esfuerzo de tracción, lo que significa que con el incremento de la fuerza de tracción, la región de deslizamiento incrementa y la región de no deslizamiento disminuye resultando en un contacto de rodadura-deslizamiento, sin embargo cuando la fuerza de tracción aumenta hasta la saturación, la región de no deslizamiento(stick) desaparece resultando en un contacto deslizando.

Cuando las fuerzas de tracción son aplicadas en la superficie, el esfuerzo cortante máximo aumenta y su posición se mueve muy cerca a la superficie. Debido a la condición de rodadura-deslizamiento se produce una acumulación cíclica de deformación plástica debajo de la superficie del material, este es el comportamiento conduce a la fatiga de contacto por rodadura.

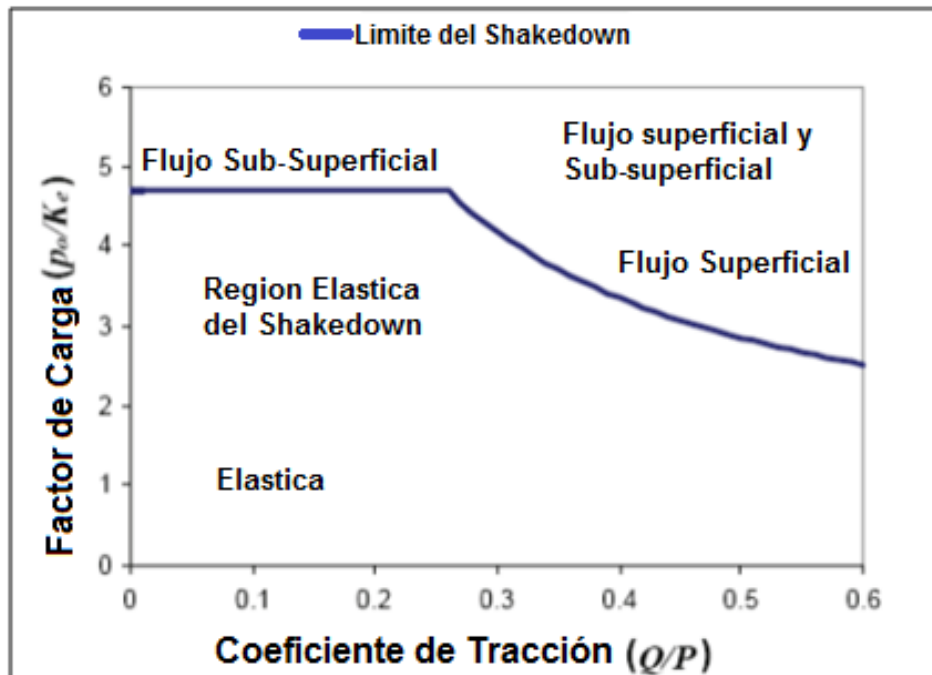
1.2.4 Límite de “*Shakedown*”

Si los esfuerzos producidos en la rueda, bajo las condiciones de contacto con el riel están por debajo del límite elástico del material de la rueda, no tendrá lugar ninguna deformación permanente. Sin embargo, en la práctica, las tensiones suelen superar el límite elástico del material, causando un flujo plástico y variaciones de esfuerzos cerca de la superficie y en algunos casos el flujo plástico aumenta el límite elástico de los aceros. Esfuerzos residuales provocan una menor probabilidad de que se presente fluencia plástica del material durante los ciclos de carga subsiguientes. El efecto combinado es conocido como "*shakedown*".

Para este efecto se establece un límite - conocido como el "límite de Shakedown" generado por el aumento del endurecimiento que el material de la rueda puede alcanzar. Si las tensiones están por encima de este límite, la deformación plástica permanente se producirá y aumentará con el paso de cada revolución de la rueda, de continuar esa condición, el límite por deformación plástica para el material será superado y se producirán grietas en la superficie generando el fenómeno conocido como "ratchetting"

En la (figura 1-7) se presenta el mapa de *shakedown*, el cual ilustra la relación entre fricción en el contacto rueda riel y la capacidad de carga. Aquí se presenta el comportamiento límite del material en términos adimensionales de la presión de contacto P_0/k como una función del coeficiente de fricción, ($\mu=T/N$), donde P_0 es la presión normal de contacto, k es el límite del esfuerzo cortante, T es la fuerza tangencial (tracción) y N es la carga Normal

En coeficientes de fricción relativamente bajos, se produce acumulación por deformación plástica en la sub-superficie. Para coeficientes de fricción arriba de 0,3 la fluencia plástica es mayor sobre la superficie. La posición más negativa, en términos de deterioro del material es la región de ratchetting, donde la deformación se acumula hasta que la ductilidad del material es superada y ocurre pérdida de masa en forma de partículas o una grieta es iniciada.[7]

Figura 1-7: Mapa de *Shakedown* [7]

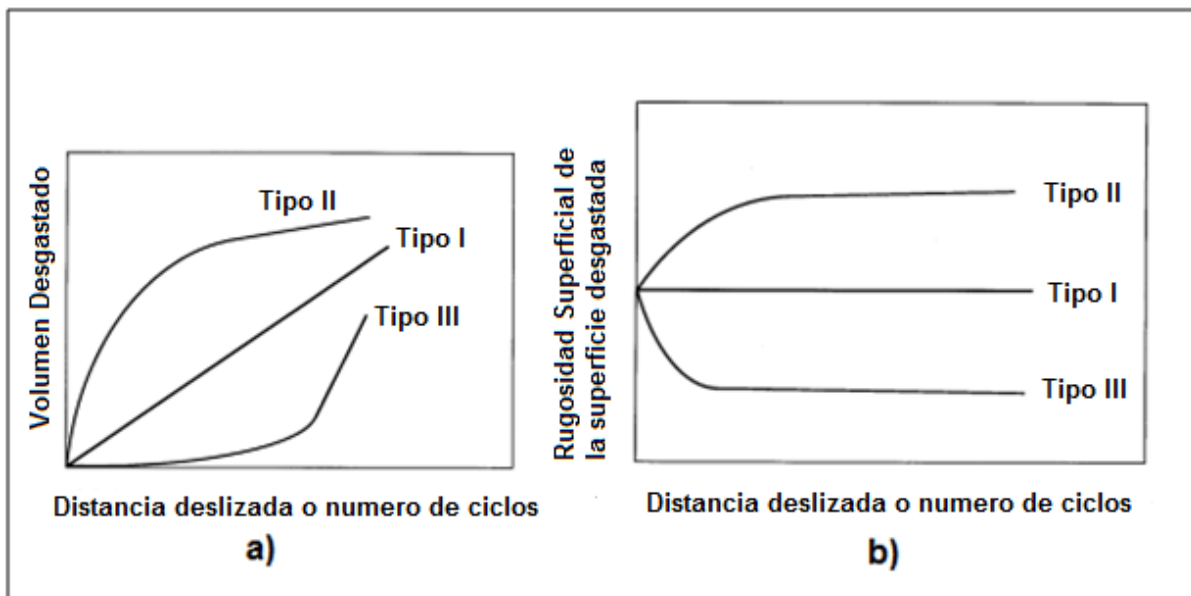
1.3 Fenómenos de desgaste en sistemas Rueda/Riel

El desgaste es reconocido como un fenómeno que corresponde a la remoción de material de una superficie debido a la interacción con otra superficie. Muchas maquinas a nivel industrial pierden durabilidad y desempeño debido al desgaste. Por lo tanto, el control del desgaste se ha convertido en una fuerte necesidad para avanzar y tener una tecnología más confiable.

Un método para conocer los requerimientos de un material, son los mapas de desgaste, que se han propuesto para predecir los modos de desgaste y las tasas de desgaste. Estos mapas son considerados una de las mejores herramientas para describir condiciones tribológicas, selección de materiales en un rango de condiciones de operación. El desgaste como se profundizará en esta sección, es el resultado de remover material de una superficie ya sea por separación física debido a la micro- fractura, por disolución química, o por uniones en la intercara de contacto.

Existen diferentes tipos de desgaste: adhesivo, abrasivo, por fatiga y corrosivo. El modo de desgaste dominante cambia por una u otra razón, que incluyen cambios en las propiedades de la superficie del material y la respuesta dinámica de la superficie causados por el calentamiento debido a la fricción, con lo cual se genera la formación de una película química. A continuación se presenta la (figura 1-8) donde el gráfico a) muestra las curvas que representan los modos de desgaste, según el volumen de pérdida de material con el avance de la distancia deslizada y el grafico b) presenta 3 tipos de desgaste con la variación de la rugosidad superficial [8].

Figura 1-8: Curvas de variación de volumen de desgaste y rugosidad superficial vs distancia deslizada [8]

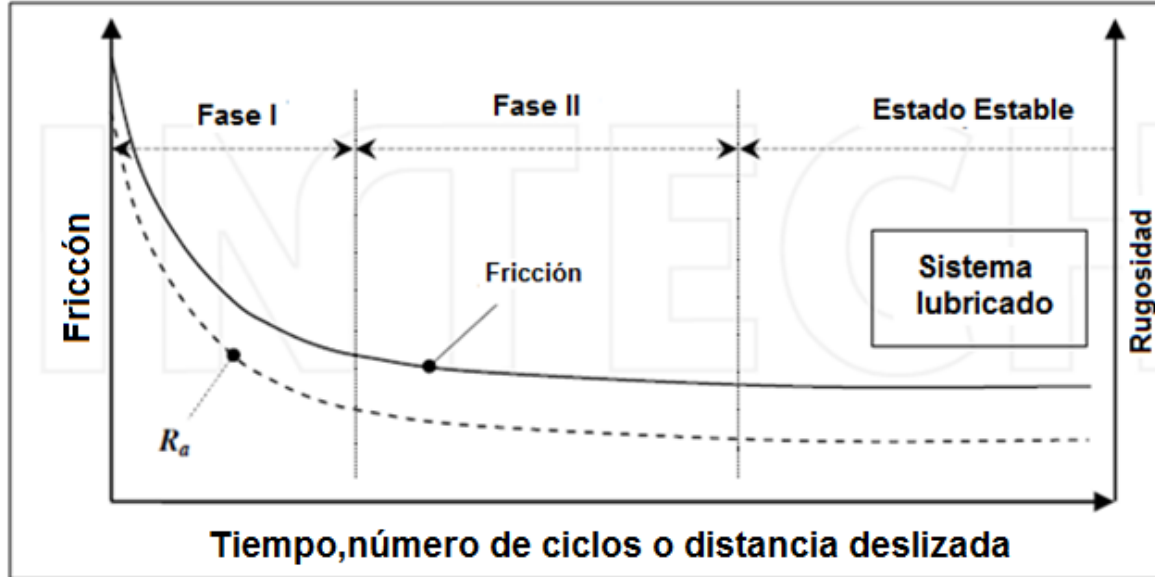


1.3.1 Desgaste en el periodo de acomodamiento (running-in) en el sistema Rueda/Riel

Definición de Running-ing:

Por definición, Summer-Smith (1994) describe el "running-in" como: "La eliminación de los puntos altos en las superficies de contacto por desgaste o deformación plástica bajo condiciones controladas, generando una mejor conformabilidad en el contacto y un menor riesgo de avería durante el funcionamiento normal. A continuación se presenta la (figura 1-9) donde se tiene el cambio del coeficiente de fricción y la rugosidad en función del tiempo y el número de ciclos.

Figura 1-9: cambio del coeficiente de fricción y rugosidad como una función del tiempo, el número de ciclos y/o distancia deslizada bajo condiciones constantes de operación.[9]



En este gráfico es posible ver en la fase de acomodamiento los cambios generados del coeficiente de fricción y la rugosidad en la topografía de la superficie, dichos cambios son necesarios para ajustar o reducir al mínimo el flujo de energía que se presenta entre superficies en movimiento (Whitehouse, 1980).[9] Sobre la base de la (figura 1-9) tenemos la fase I que está indicada por la repentina disminución de la rugosidad de la superficie y el coeficiente de fricción. En la fase II, la micro-dureza y el esfuerzo residual en la superficie son incrementados por el endurecimiento por trabajo y los cambios en la geometría afecta el comportamiento de contacto, que conducen a una ligera disminución del coeficiente de fricción y rugosidad de la superficie. Después se produce un estado estable de condiciones, en el cual no se presentan cambios significativos en el coeficiente de fricción, donde se consigue la plena condición de servicio y se pueden aplicar adecuadamente las especificaciones de diseño [9]

1.3.2 Mecanismos de Desgaste en Sistemas Rueda/Riel

Antes de analizar los mecanismos de desgaste, es necesario primero caracterizar las posibles situaciones de desgaste, las cuales están relacionadas con la naturaleza del movimiento durante el contacto y el número de ciclos. En el caso del sistema rueda riel

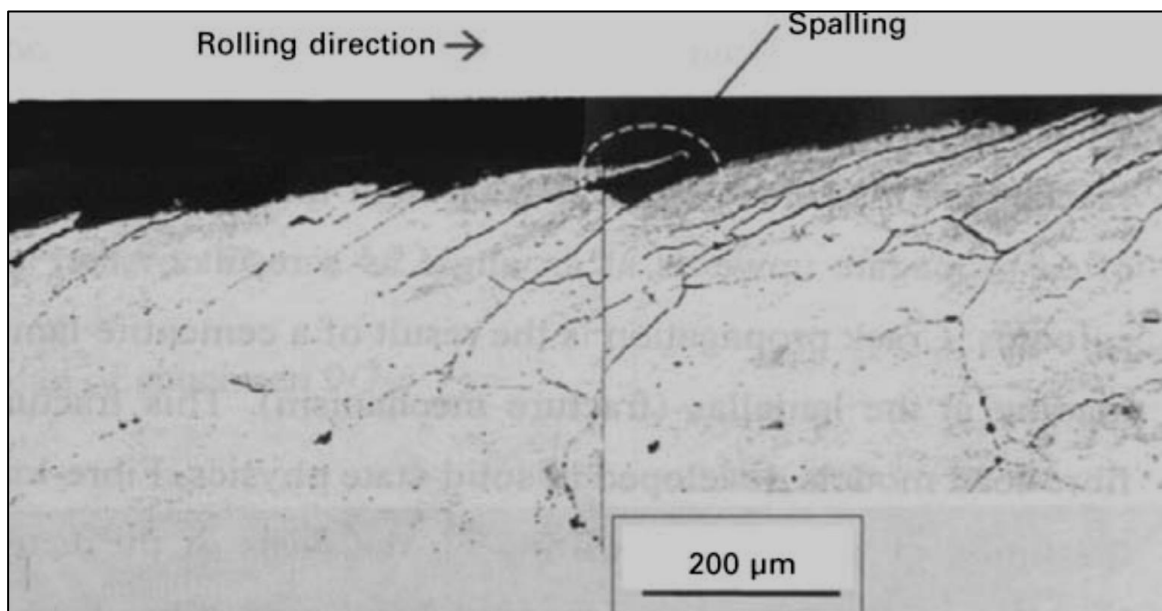
consideramos el concepto de rodadura y deslizamiento. Nominalmente en condiciones de rodadura, el contacto rueda/riel se divide en regiones de deslizamiento (microdeslizamiento) y adhesión, tal como se mencionó en la sección 1.2.3

Condiciones de rodadura:

Con movimiento de rodadura, el principal mecanismo de desgaste es la fatiga de contacto. Este tipo de fenómeno involucra la formación y propagación de grietas, que finalizan en el desprendimiento de partículas de la superficie, en un proceso conocido como ratcheting, donde estas grietas tienden a formarse bajo la superficie y se propagan hacia la misma hasta emerger. En los casos en los cuales fuerzas relevantes de tracción están involucradas las grietas se forman también a partir de la superficie.

La (figura 1-10) muestra la sección de un disco fabricado de un componente de riel que ha sido puesto en contacto de rodadura contra un disco fabricado de un componente rueda, en un tribómetro denominado "Twin disc machine" para simular el contacto bajo rodadura/deslizamiento. En esta figura se muestra como, bajo ciclos repetidos de carga, se producen grietas y deformación en la superficie del material, generando desprendimiento de partículas, lo que podría generar rompimiento de riel.[10]

Figura 1-10: Grietas y desprendimiento de material en un caso de desgaste Rueda/Riel [10]

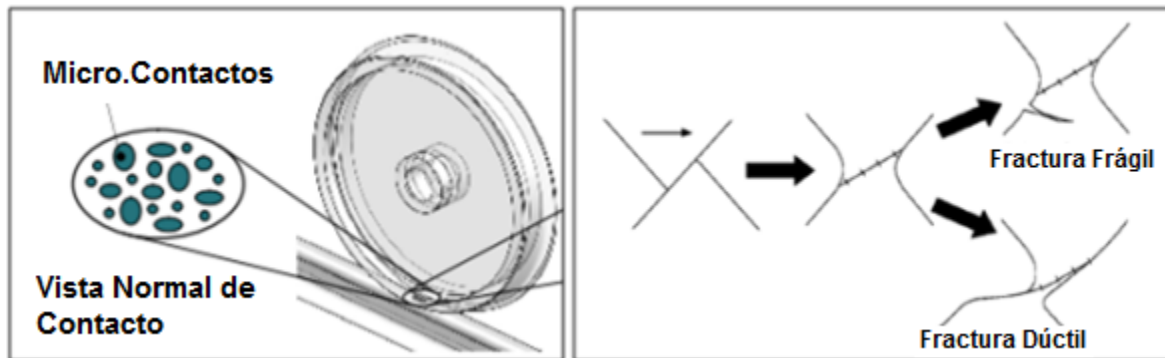


Condiciones de deslizamiento

Un diverso número de mecanismos de desgaste pueden ocurrir con el del deslizamiento. El deslizamiento es causado como resultado de dos componentes que se mueven a diferentes velocidades, y donde puede ocurrir fenómenos de desgaste oxidativo, bajo la influencia de pequeñas cargas y bajas velocidades de deslizamiento, mientras que fenómenos de desgaste desgate adhesivo, se presenten posiblemente en curvas, posiblemente en el punto de contacto entre la esquina del riel y la pestaña de la rueda. Si partículas de arena o potenciadores de fricción están presentes en este contacto se puede producir un desgaste abrasivo. Si en el contacto se tienen condiciones muy altas de deslizamiento se puede producir alta generación de calor, lo que finalizaría en rompimiento del material, tal como sucede en curvas muy ajustadas.

Desgaste adhesivo: El concepto básico de mecanismos adhesivos se basa en el contacto real entre superficies que ocurre en un discreto número de puntos o micro-contactos al interior de una aparente área de contacto, en estos puntos pueden presentarse uniones entre las asperezas de la superficie ver (figura 1-11)

Figura 1-11: Micro-contactos y adhesión en el sistema Rueda/Riel [11]



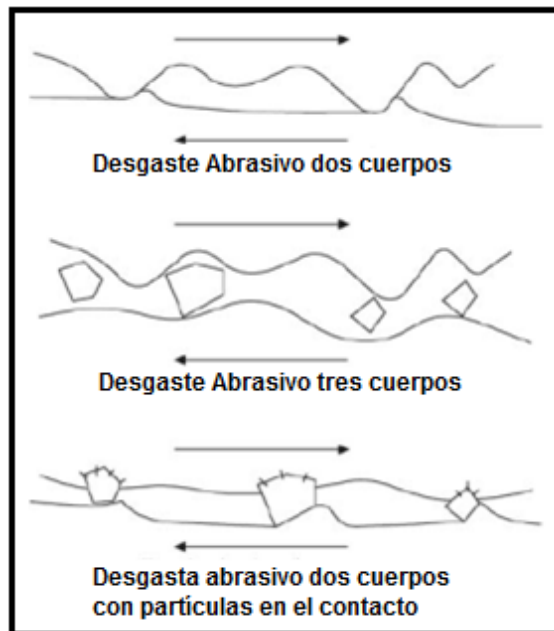
Cuando las superficies se mueven entre ellas, estas uniones se pueden romper y formar otras nuevas, por lo general las asperezas más suaves se desprenden y son adheridas a la superficie más dura, lo que puede conducir a un tipo de fractura frágil, para posteriormente desprenderse y generar partículas de desgaste.

Un daño severo puede dar lugar al desprendimiento de grandes trozos de material lo que se conoce como “Galling” o “Scoring”. Si el desgaste adhesivo termina en el rompimiento de un contacto lubricado, el término “Scuffing” es mejor usado para describir la aparición de este fenómeno de desgaste.

Desgaste Abrasivo:

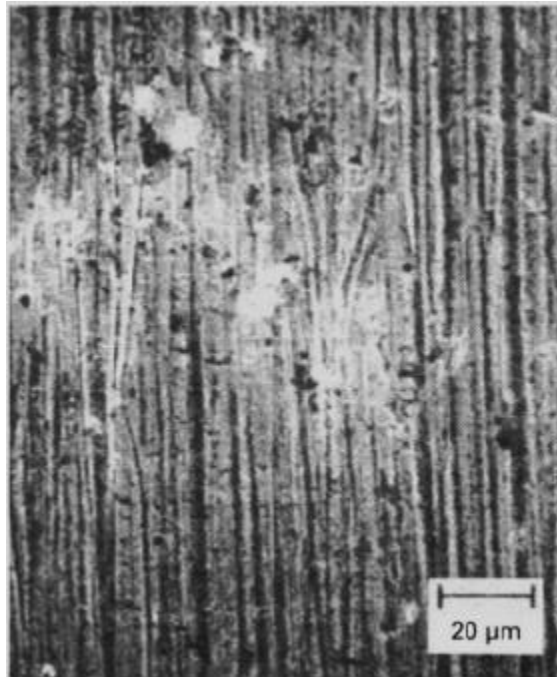
El desgaste abrasivo consiste en el daño de la superficie de los componentes en contacto, debido al movimiento relativo de cualquiera de las asperezas más duras presentes en la superficie, lo que se denomina desgaste abrasivo de dos cuerpos, mientras que el atrapamiento de partículas duras en la superficie se conoce como desgaste abrasivo de tres cuerpos, ver (figura 1-12). Tales partículas pueden ser introducidas entre las superficies más blandas desde el ambiente exterior, o pueden haber sido formadas in situ por oxidación, por algún proceso químico o mecánico.

Figura 1-12: Tipos de desgaste abrasivo[12]



El desgaste por abrasión de dos cuerpos presenta una topografía superficial característica que consiste en largas ranuras paralelas que se producen en la dirección de deslizamiento como se puede observar en la figura 1-13.

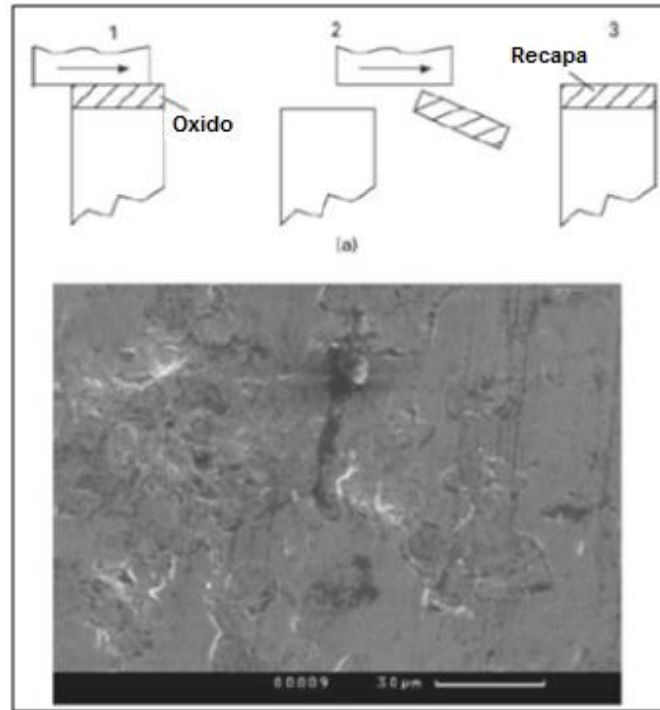
Figura 1-13: Imagen de desgaste abrasivo en una superficie [13]



Desgaste oxidativo:

El proceso de desgaste oxidativo implica la formación de óxidos en la superficie del material. Este tipo de desgaste depende fundamentalmente de las temperaturas generadas en el contacto y por la humedad relativa en el ambiente. y las tasas de desgaste son usualmente menores que las observadas en los procesos de desgaste mecánico. El proceso de eliminación de material se ilustra en la (figura 1-14), así como la superficie de un acero ensayado en laboratorio.

Figura 1-14: Desgaste oxidativo a) Esquema del mecanismo de remoción de material b) Aspecto típico de la superficie desgastada [14]



Tasas de desgaste y transiciones:

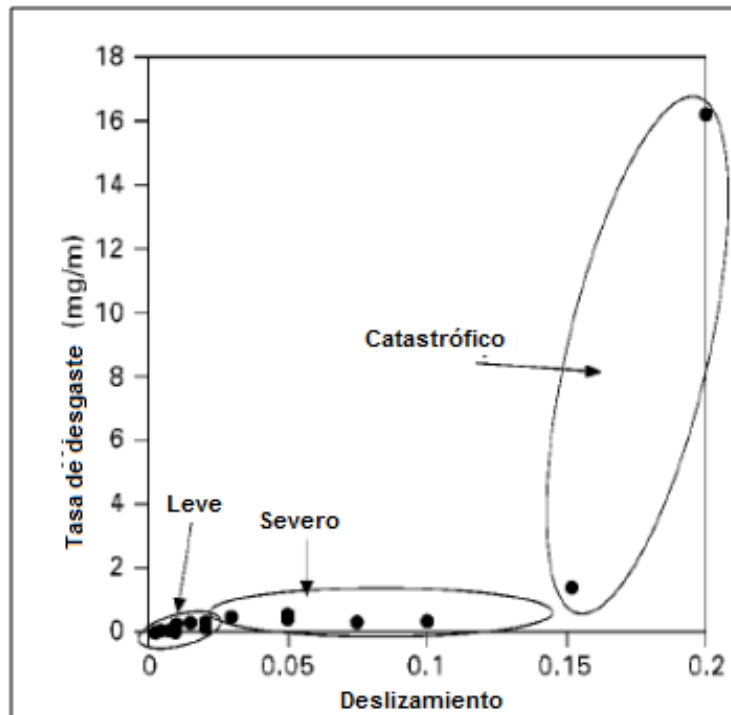
El desgaste se clasifica a menudo como suave, moderado o severo dependiendo de la tasa de desgaste aunque no existe ningún valor numérico en particular de este parámetro que sirva de referencia. En general para cualquier par de materiales en contacto como los examinados en laboratorio bajo condiciones rodantes deslizantes, el aumento de la carga normal, la velocidad de deslizamiento o la temperatura conduce a alguna etapa o un salto repentino en que se aumenta la velocidad de desgaste. Las diferencias entre los dos regímenes se muestran bajo la descripción de leve y severo en la (tabla 1-1)

Tabla 1-1: Características de los regímenes moderado y severo

Desgaste moderado	Desgaste severo
Se generan superficies lisas donde las superficies finales a menudo son más suaves que la original	Se producen en superficies rugosas, con rasguños profundos, donde las superficies finales resultan mucho más duras que las originales
Partículas desgastadas (debris) extremadamente pequeñas, comúnmente 10nm de diámetro	Partículas desgastadas (debris) más grandes, comúnmente arriba de los 0,01mm de diámetro

Las tasas de desgaste normalizadas a manera general para cualquier par de materiales exhiben valores de 10^{-4} — 10^{-3} son típicas para un desgaste moderado mientras en el caso de desgaste severo pueden alcanzar niveles en el intervalo de 10^{-3} — 10^{-2} . Los mecanismos de desgaste más asociados a una condición severa son los mecanismos adhesivos o térmicos, donde el aumento de las temperaturas de contacto y el debilitamiento térmico puede conducir a cambios significativos en la respuesta de los materiales. Los diferentes regímenes de desgaste se han observado en pruebas de rodadura/deslizamiento en contacto rueda riel, como se puede observar en la figura 1-15, donde se presentan las tasas de desgaste de un material de rueda de denominación R8T, empleadas en un tribómetro de tipo disco sobre disco.

Figura 1-15: Tasas de desgaste para material R8T. En pruebas de rodadura deslizamiento en el tribómetro disco sobre disco [15]

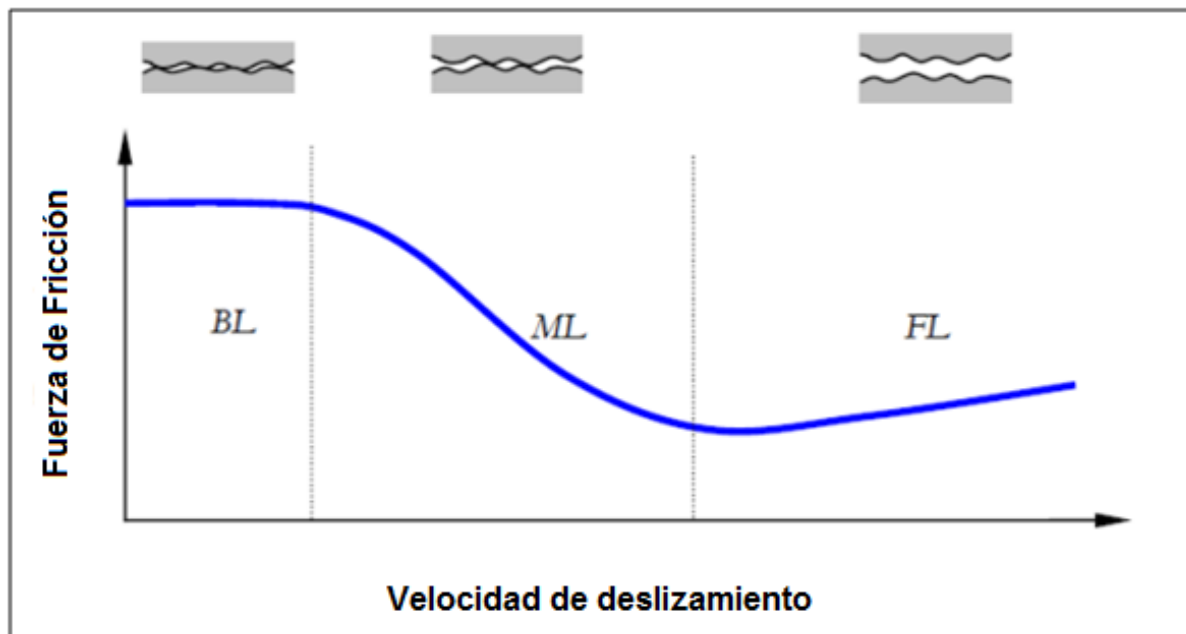


1.3.3 Lubricación en sistemas rueda riel:

Un lubricante se puede definir como cualquier material interpuesto entre dos superficies que reducen la fricción y/o el desgaste entre ellas [16]. En el caso de los sistemas ferroviarios los lubricantes se usan para controlar el desgaste, pero no para reducir significativamente la fricción, ya que para una adecuada operación (tracción para el arranque y frenado) se requieren ciertos valores mínimos de coeficientes de fricción, para acelerar y frenar usualmente requiere de coeficientes de fricción por encima de 0.2; sin embargo, locomotoras y carros pesados modernos podrían demandar mayores valores. Por otro lado coeficientes de fricción por encima de 0.4 incrementan la posibilidad de fatiga superficial de ruedas y rieles [17].

El efecto general de la adición de un lubricante se estudió en rodadura y deslizamiento para rodamientos por Stribeck [18], quien relaciono la fuerza de fricción, la velocidad de deslizamiento, la viscosidad y la carga normal usando la hoy llamada curva de Stribeck. Dicha su curva establece tres regímenes diferentes de lubricación. El primero corresponde a la lubricación límite (BL), régimen, que se produce a velocidades de deslizamiento relativamente bajas cuando la carga es soportada principalmente por el contacto entre las asperezas de la superficie de los cuerpos en contacto. En el segundo régimen, corresponde a la lubricación mixta (ML), donde la carga es soportada por las asperezas y la acumulación de presión hidrodinámica en el lubricante. El tercer régimen, es la lubricación de película completa,(FL) o hidrodinámica donde las superficies en contacto están completamente separadas por la película de lubricante y la fuerza de fricción consiste en el esfuerzo cortante en el lubricante. Estos regímenes de lubricación y la curva de Stribeck se han presentado esquemáticamente por Söderberg [19], como se presenta en la (figura 1-16)

Figura 1-16: Curva esquemática de Stribeck [19]



En algunas situaciones se presenta un cuarto régimen denominado, lubricación elastohidrodinámica (EHL) y se produce cuando la deformación elástica de la superficie ayuda a mantener la película lubricante estable. La deformación elástica de las superficies en el contacto rueda-riel pueden mejorar las propiedades de lubricación debido al aumento del área de contacto. Para aplicaciones ferroviarias, la lubricación se aplica en el contacto de la pestaña de la rueda con la esquina del riel, que es una condición de alta carga, en la cual se produce un régimen de lubricación (BL) o lubricación de capa límite.

Para prevenir el fenómeno de “seizure” (adhesión severa) y las altas tasas de desgaste, el lubricante debe cumplir requisitos estrictos. Para mejorar el rendimiento del lubricante, diversos aditivos se pueden añadir, los cuales son principalmente de dos tipos: antidesgaste (AW) y de extrema presión (EP).

La formulación de estos aditivos depende de las propiedades del aceite base, y de los ingredientes como el azufre y el fosfato que se pueden encontrar en el análisis del contenido.

Para contactos en sistemas ferroviarios, varios dispositivos se han construido para lubricar la esquina del riel que limita con el ancho de la vía, la cual entra en contacto con la pestaña de la rueda, estos dispositivos son de tres tipos[19]:

- Lubricadores móviles - vehículos ferroviarios especialmente diseñados que aplican lubricante a la esquina del riel que limita con el ancho de la vía.
- Lubricadores a borde del camino - los dispositivos montados al lado de la pista que aplican lubricante a la esquina del riel que limita con el ancho de la vía.
- Engrasadores a bordo - dispositivos montados en el vehículo ferroviario o tren, donde el lubricante se aplica a la pestaña de la rueda; y este se transfiere a continuación al borde del riel que limita con el ancho de la vía.

1.3.4 Materiales empleados en sistemas rueda/riel:

La Resistencia de un tren para rodar tiene varios componentes, incluyendo resistencia a la aceleración, fuerzas del viento, resistencia mecánica de los componentes, y resistencia en el contacto rueda riel. Solo esta última condición, la resistencia en el contacto es la que tiene una fuerte influencia la selección de los materiales de riel y rueda. Varios factores influyen este contacto. Primero durante condiciones de rodadura las superficies del riel y la rueda son deformadas elásticamente, proceso durante el cual puede ocurrir movimiento relativo entre las mismas. Segundo, la energía puede ser disipada por la deformación plástica, y tercero fenómenos de adhesión pueden disipar también energía.

Alrededor del mundo ferroviario la mayoría de los componentes de rueda y riel son fabricados en aceros con composiciones de carbono-manganeso y, aceros perlíticos con estructuras laminares., ver tabla 1-2 .De manera general, las ruedas para vehículos de pasajeros tienden a tener bajos contenidos de carbono y durezas tan altas como los ejes de carga de los vehículos. Por otra parte, los rieles son aceros que tienen alrededor de 300 Brinell de dureza, y bajo esta condición son típicamente usados para rieles en pistas rectas(estándar), mientras que rieles en un rango de durezas de 340-390 Brinell tienden a ser usados en curvas donde las condiciones son mucho más severas(endurecidos). Sin embargo numerosos estudios han evaluado el uso de materiales con alto grado de dureza, como aceros bainíticos y martensíticos para la fabricación de ruedas y rieles [20].

Tabla 1-2: Composición química y durezas típicas de Ruedas y Rieles en vehículos de carga y pasajeros [20]

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

1.3.5 Estado del Arte

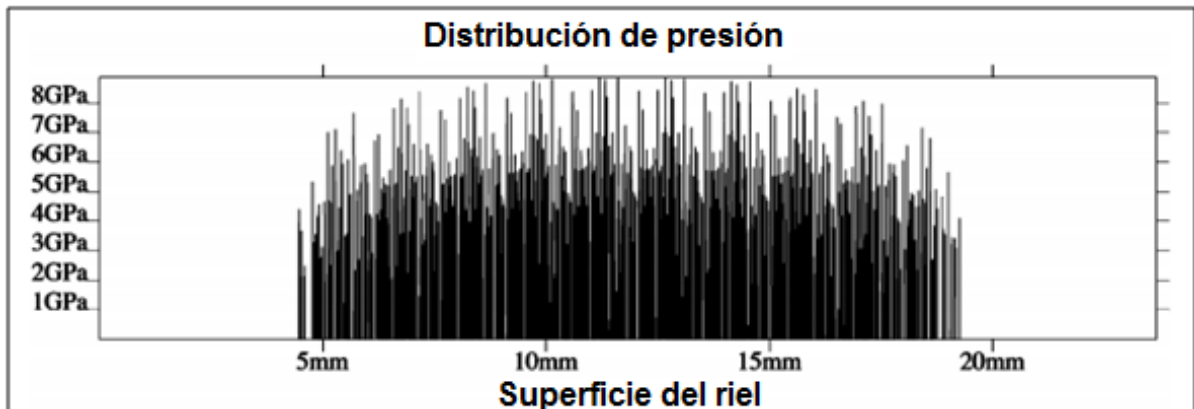
Conocer el estado de las superficies y la condición previa de esta al momento de entrar en contacto, permite predecir de cierta manera el comportamiento de la superficie y por ende el comportamiento de los componentes. Las variaciones de la topografía en las superficies permiten un mejor comportamiento de esta no solo frente a fenómenos de pérdida de masa, sino también frente al coeficiente de fricción.

Cuando se estudian fenómenos de contacto bajo modelación de ecuaciones de Hertz, se hacen ciertas consideraciones que en condiciones reales de contacto no suceden, tales como la uniformidad de la superficie y la isotropía del material, por lo que la verdadera área de contacto no se estaría considerando. Es por esta razón que la rugosidad superficial cobra gran interés al ser estudiada.

Trabajos anteriores hechos por Kapoor y Johnson [21] han mostrado que en un contacto conforme las asperezas juegan un papel importante, puesto que aún a bajas cargas, los esfuerzos presentes bajo capas delgadas son elevados, encontrando que las presiones reales en las asperezas son mucho más altas que las presiones nominales o promedio. Otros trabajos [22] han mostrado que estos esfuerzos bajo condiciones normales pueden exceder el "shakedown limit" del material, causando flujo plástico bajo las superficies de las asperezas. Estas altas presiones bajo la superficie se encuentran a pocas micras por debajo de esta, por lo que los esfuerzos son tan elevados, que pueden causar un flujo

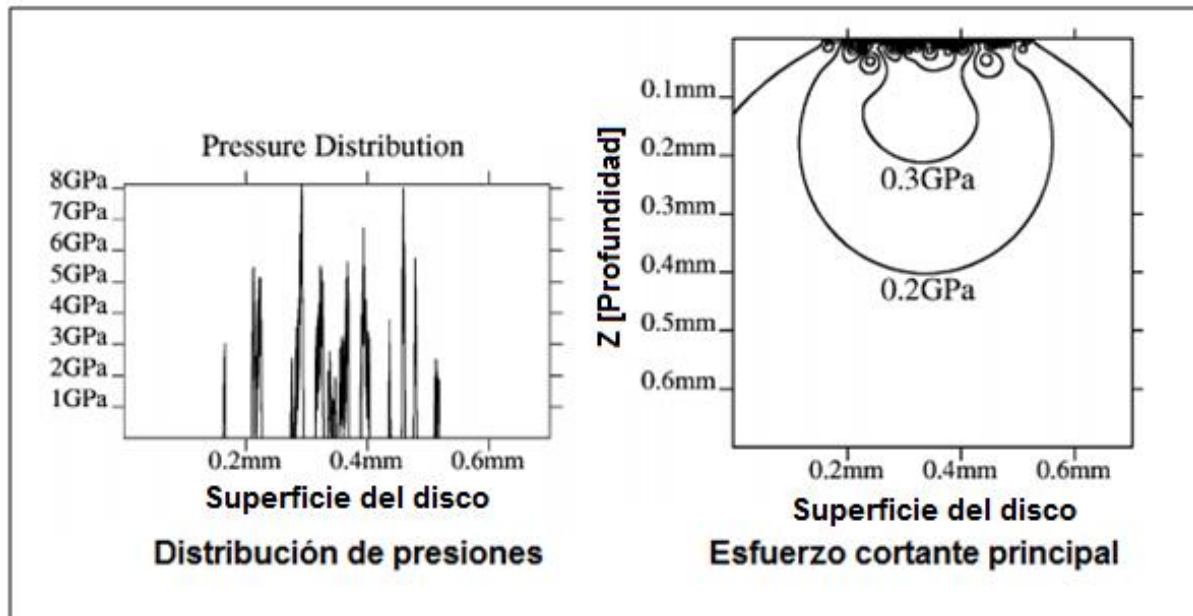
plástico, provocando un inicio de falla. En la figura 1-17, se observa la distribución de esfuerzos en un riel en contacto con una rueda, las mismas condiciones fueron analizadas idealmente (modelo hertziano) consiguiendo una presión de 1 GPa, este valor es ocho veces menor que la presión real en el contacto [22].

Figura 1-17: Distribución de presión de una rueda de 43cm contra un riel.[22]



De la misma manera se realizó el análisis en un tribómetro disco sobre disco, en donde se encontraron resultados similares. Es necesario aclarar que el ancho de la zona de contacto es mucho más pequeña por lo que las presiones son más sensibles a la rugosidad, en la (figura 1-18) se puede observar la distribución de presiones en el ancho de la superficie, donde las asperezas entran en contacto, así como la distribución de los esfuerzos cortantes bajo la superficie, en la cual se tiene un valor de 2 GPa a una profundidad de 2.2 μm aproximadamente.

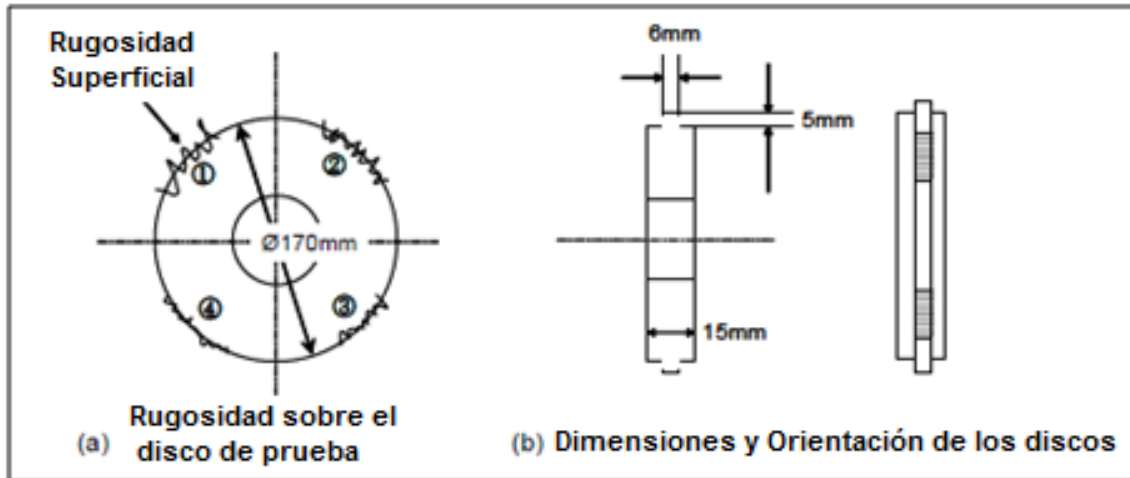
Figura 1-18: Distribución de presión y esfuerzo cortante principal usando el tribómetro Twin-Disc[22]



H. Chen, M. Ishida, han investigado la influencia de la rugosidad superficial inicial sobre la fatiga de contacto por rodadura (RCF) en sistemas ferroviarios, los autores llevaron a cabo experimentos por medio de un tribómetro disco sobre disco, fijando diferentes condiciones de textura superficial inicial en probetas de experimentación, para evaluar su influencia en la deformación plástica, el endurecimiento del material y variaciones en su topografía bajo diferentes ciclos de experimentación

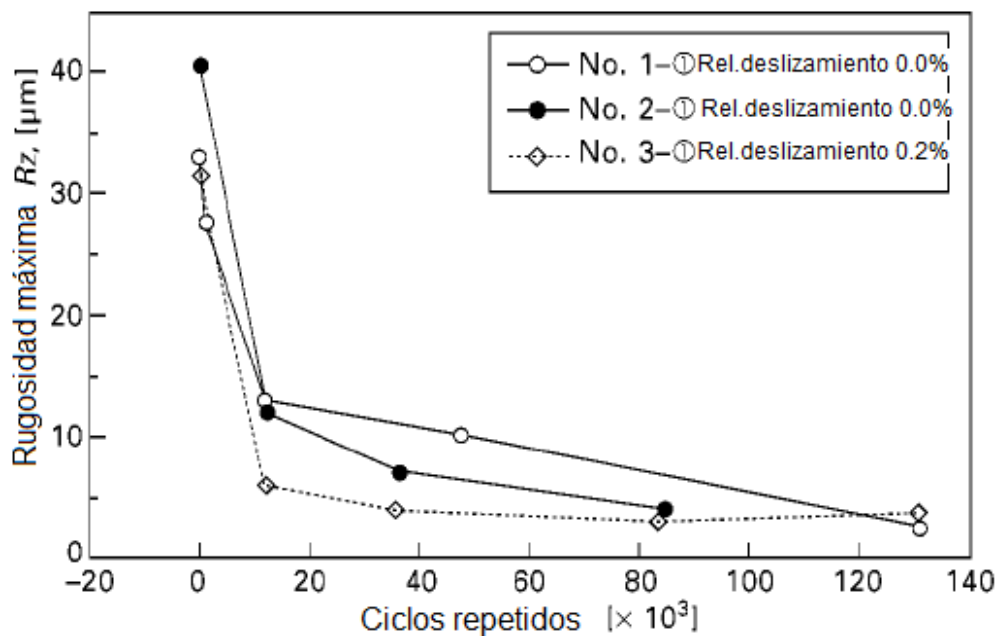
En la (figura 1-19) se pueden observar las probetas de experimentación y la dirección de la textura superficial inicial, dicha textura fue obtenida en la dirección perpendicular al rodamiento de las probetas durante el experimento, los valores de rugosidad fueron obtenidos bajo el parámetro Rz y se obtuvieron diferentes valores entre $10\mu\text{m}$ y $40\mu\text{m}$.

Figura 1-19: Textura inicial de las probetas ensayadas[23]



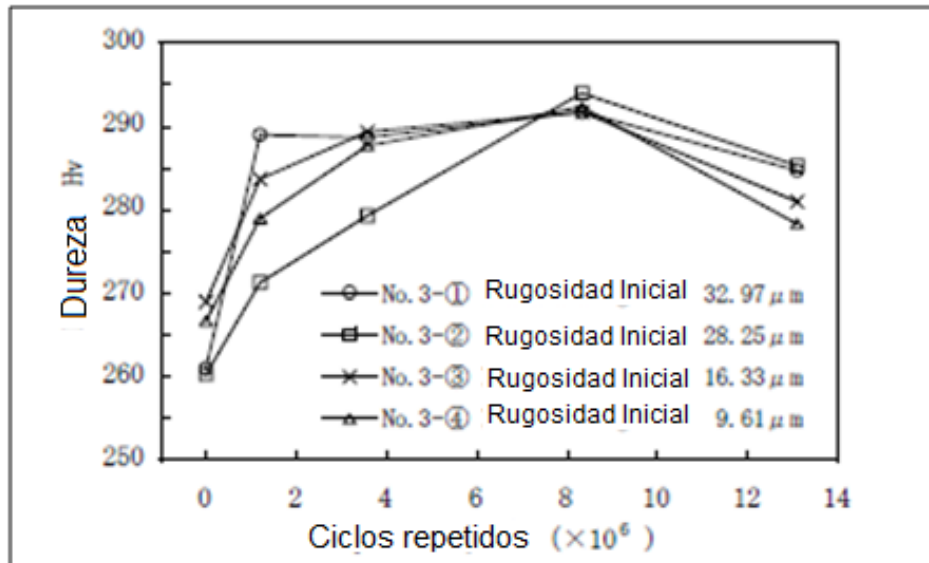
En la (figura 1—20) se puede revisar la variación de la rugosidad con el aumento del ciclaje, en la cual, la rugosidad inicial decae más rápido bajo la condición de deslizamiento respecto a la condición de rodadura. Para las pruebas realizadas se logró establecer que sin importar el valor inicial alto o bajo de Rz, la rugosidad de la superficie se estabilizaba entre los 80.000 ciclos y 100.000 ciclos

Figura 1-20: Evolución del parámetro de rugosidad Rz con el número de ciclos[23]



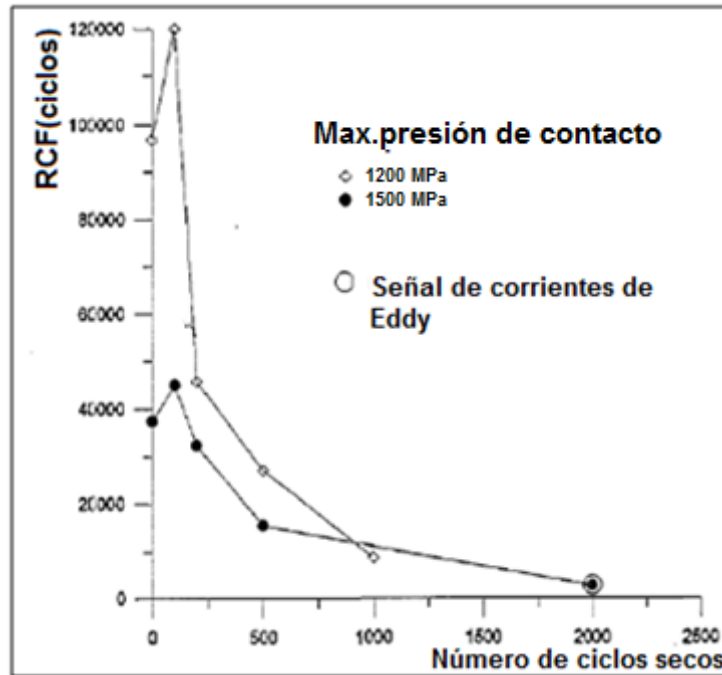
La dureza bajo diferentes valores de rugosidad inicial, sufrió un incremento desde el inicio hasta los 100.000 ciclos y luego una disminución hasta los 130.000 ciclos, lo cual resultó no ser claro al intentar establecer la influencia de la rugosidad inicial sobre la dureza de la superficie. Este comportamiento se puede observar en la (figura 1-21)

Figura 1-21: Endurecimiento de la superficie con el aumento del ciclaje.[23]



En este estudio se observó que la rugosidad inicial definida con el parámetro Rz para el componente riel disminuye, y se establece en un valor casi normal, independientemente del nivel inicial de Rz. Sin embargo no se logró establecer claramente una relación entre la rugosidad inicial con el endurecimiento superficial del material, ya que este aumentaba hasta cierto valor y a partir de allí iniciaba con un descenso.[23]

En el estudio de Tyfour et al [24]. se analizó el efecto de diferentes números de ciclos en seco previo a los ciclos en húmedo, en la vida de aceros para riel perlíticos, usando una máquina disk-on-disk. Se demostró como el número de ciclos en seco tiene un efecto marcado sobre la vida del riel; esto se explica por la acumulación de deformación plástica (ratchetting) que degrada y agrieta la superficie del material, haciéndola más susceptible a la entrada del líquido en los subsecuentes ciclos húmedos. Ver (figura 1-22)

Figura 1-22: Efecto del número de ciclos iniciales en seco en la vida a RCF[24]

En los trabajos realizados por Lundmark y Kassfeldt [24], se estudió la influencia de la topografía inicial de la superficie en el sistema rueda/riel bajo condiciones de rodadura deslizamiento, generando dos diferentes condiciones de rugosidad inicial para probetas que representan el riel entre $0,5\mu\text{m}$ y $2,0\mu\text{m}$ y dos condiciones de rugosidad para las probetas que representan la rueda entre $2\mu\text{m}$ y $14\mu\text{m}$, se han analizado los efectos en el desgaste, la fricción y el daño de la superficie.

Las probetas de riel fueron extraídas de materiales denominados UIC 1100 y un acero al boro, endurecido. Las probetas de rueda fueron extraídas de dos materiales, uno denominado blue light, que es utilizado en la fabricación de ruedas ferroviarias y de referencia comercial denominada (69-JDG-8), estas probetas fueron mecanizadas con un valor mayor de rugosidad, y el otro material utilizado fue un acero bainítico denominado (concept 30) y mecanizado con un menor valor de rugosidad. De los resultados obtenidos se encontró principalmente, que en todos los experimentos con el material denominado blue light, correspondiente a la probeta de rueda con mayor valor de rugosidad resultó un menor desgaste para la probeta del riel, la cual operaba como contra-cuerpo de las probetas de rueda, comparada con las probetas de menor valor de rugosidad del material (concept 30), ver (figura 1-23) [25]

Figura 1-23: Superficies desgastadas de las probetas de Riel y Rueda.[25]

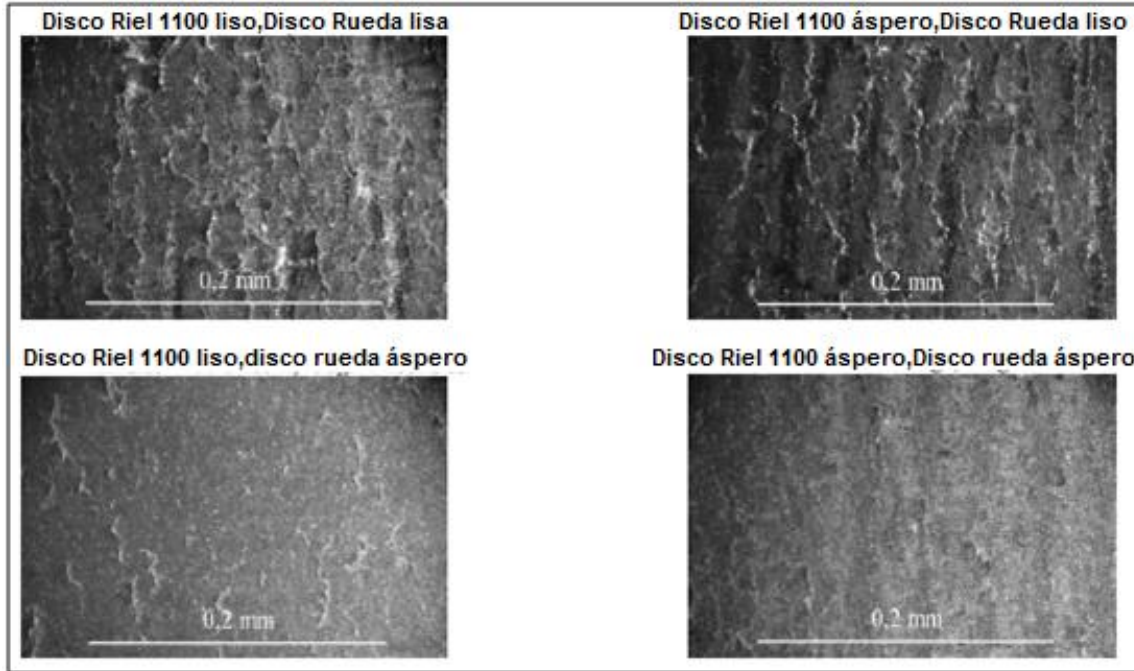
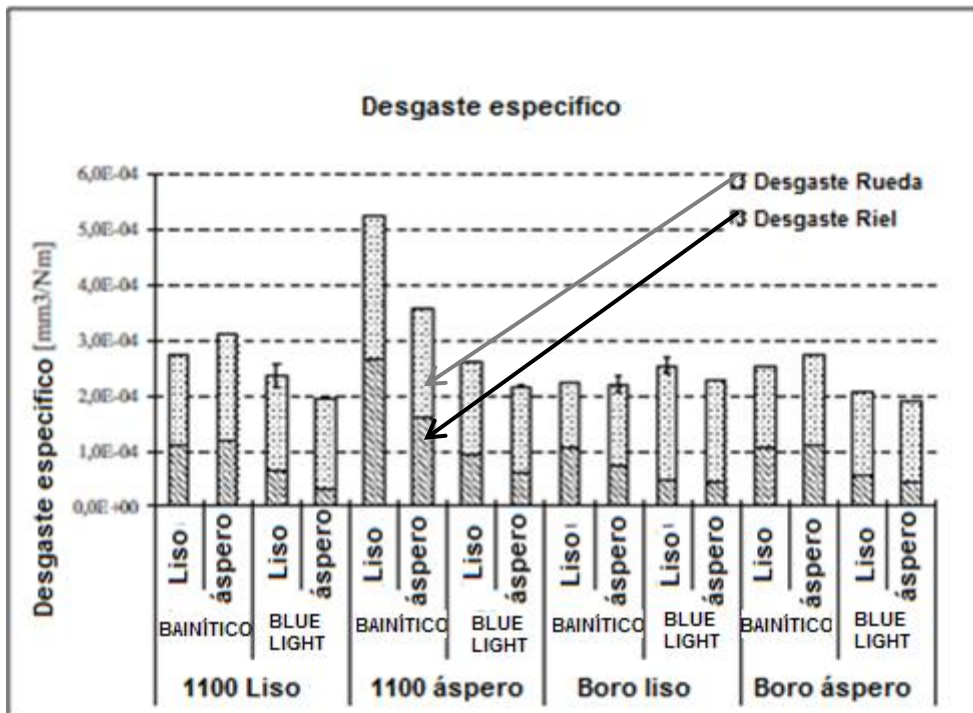


Figura 1-242: Desgaste específico de riel y rueda para probetas Con nivel alto y bajo de rugosidad[25]



2. Objetivos

2.1 Objetivo General:

Evaluar la resistencia al desgaste para aceros perlíticos, bajo la influencia de diferentes factores que involucran rodadura-deslizamiento, lubricación de capa límite y acabado superficial inicial.

2.1.1 Objetivos Específicos:

Establecer un diseño de experimentos que permita evaluar la influencia de los diferentes factores en la resistencia al desgaste de aceros perlíticos

Identificar los mecanismos de deterioro superficial y sub-superficial en pares tribológicos conformados por aceros perlíticos a partir de la medición de pérdidas de masa, cambios de calidad superficial inicial, y cambios de la microestructura.

Empleando condiciones de laboratorio controladas, determinar el efecto del acabado superficial inicial, la lubricación de capa límite y condición de rodadura deslizamiento en la resistencia al desgaste de los aceros perlíticos

3. Materiales y Métodos

3.1 Introducción

Este capítulo describe la metodología y los detalles experimentales realizados en el laboratorio para la obtención y preparación de las probetas empleadas en los ensayos de desgaste tipo Disco-Disco, así como la caracterización de la microestructura y de la composición química de rieles y ruedas. En este apartado además se describen los procedimientos y equipos empleados para la medición de las variables establecidas en el proceso de experimentación. Las anteriores técnicas son descritas de manera general a lo largo de este capítulo, ya que sirvieron para determinar las propiedades y condiciones de partida para la realización de los ensayos.

3.2 Materiales

Los materiales seleccionados fueron extraídos de ruedas y rieles suministrados por el Metro de Medellín y que han sido empleados en este sistema ferroviario. Se utilizaron rieles con designación R260 y ruedas de fabricación alemana, el proceso detallado para obtener las probetas de Riel y Rueda se presenta en la sección 3.3.

3.2.1 Composición Química

Como primera actividad se realizó un análisis de composición química de las ruedas y rieles utilizados en el Metro de Medellín. Para el análisis se empleó un espectrómetro de emisión óptica Shimadzu modelo OES 5500 instalado en la Universidad de Antioquia.

Análisis de Composición Química Riel R260

La (Tabla 3-1) presenta la composición química del riel R260 del cual fueron extraídas todas las muestras para este estudio.

Tabla 3-1: Composición Química Riel R260 (posterior año 2000)

% EN PESO																
RIEL GRADO R260	(C)	(Si)	(Mn)	(S)	(P)	(Ni)	(Cr)	(Mo)	(Al)	(Cu)	(Pb)	(Sn)	(Ti)	(V)	(Sb)	(Ca)
	0.736	0.270	1.056	0.023	0.032	0.021	0.026	0.006	0.000	0.002	0.000	0.000	0.016	0.003	0.000	0.000

Análisis de Composición Química Rueda Alemana

La (Tabla 3-2).muestra la composición química de las ruedas de fabricación Alemana, de las cuales fueron extraídas todas las muestras para este estudio

Tabla 3-2: Composición Química Rueda Alemana

% EN PESO																
RUEDA ALEMANA	(C)	(Si)	(Mn)	(S)	(P)	(Ni)	(Cr)	(Mo)	(Al)	(Cu)	(Pb)	(Sn)	(Ti)	(V)	(Sb)	(Ca)
	0.534	0.277	0.693	0.004	0.008	0.107	0.142	0.043	0.017	0.069	0.000	0.002	0.004	0.001	0.000	0.000

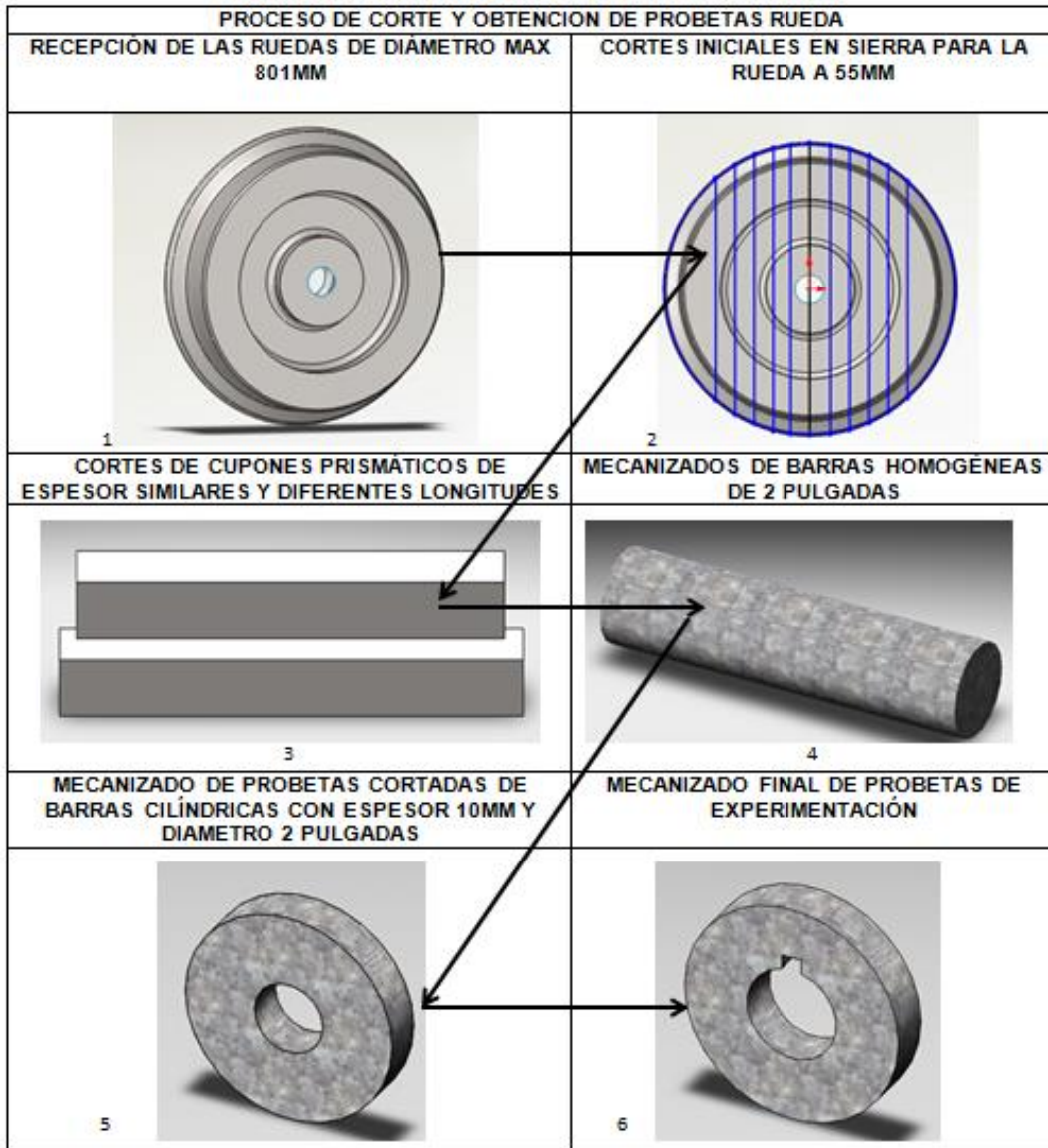
3.3 Proceso de Obtención de Probetas

3.3.1 Obtención Probetas Rueda

Las probetas de la rueda fueron obtenidas de una sola rueda de fabricación Alemana buscando eliminar variables no controlables que pudieran afectar la experimentación y/o variaciones de calidad entre diferentes proveedores.

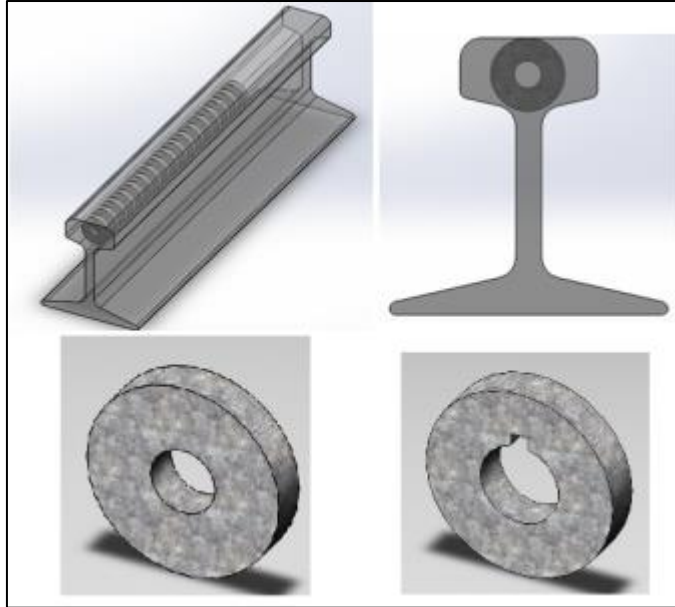
La rueda fue cortada en sierra circular partiendo de una distancia de 15 cm desde el exterior tal como se observa en la (Figura 3-1). Los cortes se realizaron con una separación entre sí de 54 mm aproximadamente. Estos tramos se obtuvieron con geometrías diferentes, y finalmente se llevaron a la forma de cupones prismáticos, para ser finalmente montados en el torno hasta obtener barras cilíndricas.

Figura 3-1: Proceso de corte y obtención de probetas del componente Rueda

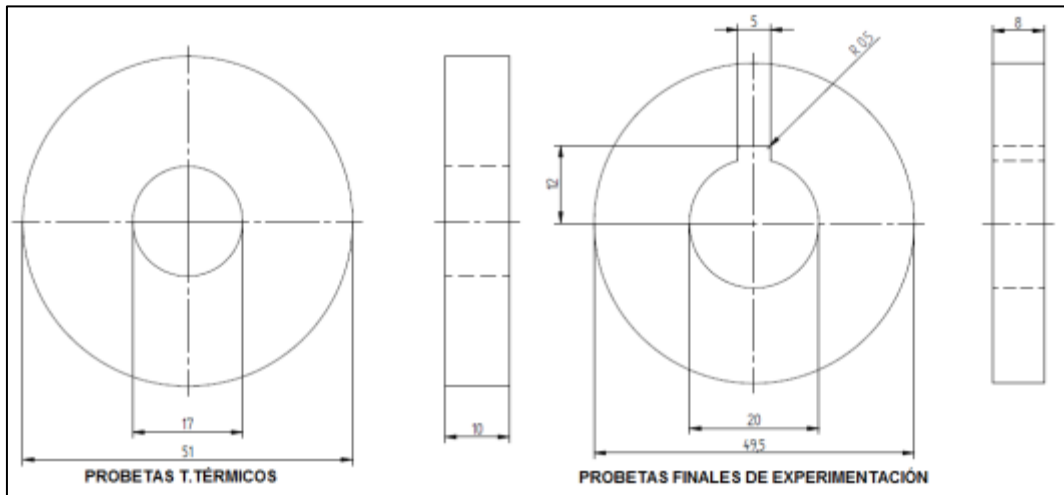


3.3.2 Obtención Probetas Riel

Para las probetas de riel se empleó un solo tramo de riel bajo denominación R260, esto buscando obtener homogeneidad y reducir variables como la composición química entre coladas para un mismo proveedor y/o variaciones de calidad entre diferentes proveedores. En la (Figura 3-2) se muestran el riel y las zonas de donde se extrajeron las probetas, las dimensiones finales de éstas son iguales a las de las probetas extraídas de la rueda.

Figura 3-2: Proceso de Corte y obtención de probetas del componente Riel

Finalmente, como se observa en las figuras (3-1) y (3-2), después de obtener las arandelas de diámetro 2" y espesor 10 mm, se fabricaron las probetas de experimentación en dos etapas: la primera antes de realizar tratamientos térmicos y la segunda después de efectuar los mismos, con el propósito de obtener un acabado superficial inicial en las probetas de rueda y de riel, procedimiento que se explicara en las sección 3.5. Ver (Figura 3-3).

Figura 3-3: Dimensiones probetas antes y después de tratamientos térmicos

3.4 Tratamientos térmicos

Para llevar a cabo las pruebas de desgaste en el tribómetro tipo Disco-Disco fue necesario preparar las probetas extraídas de los componentes de rueda riel suministrados por el Metro de Medellín a través de un tratamiento térmico para garantizar las propiedades en todo el volumen de las muestras, dado que las mismas fueron obtenidas directamente de los componentes sin tratar térmicamente por lo cual podrían tener variaciones en la micro estructura y la dureza.

Los tratamientos se llevaron a cabo en un horno marca SOLO el cual posee un controlador de temperatura electrónico Tipo PID con una temperatura máxima de 1200°C y precisión de 5°C, ubicado en el laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín

3.4.1 Tratamiento térmico de las probetas de Rueda

Los tratamientos térmicos del material de la rueda fueron diseñados con base en el diagrama TTT del acero AISI 1050.

Inicialmente se normalizaron todas las probetas con el fin de homogenizar la microestructura y con el propósito de tener las condiciones de partida estándar para todos los ensayos. El normalizado se llevó a cabo llevando las muestras a temperatura de austenización de 870°C y sosteniéndolas allí por aproximadamente 30 minutos para luego enfriarlas *al aire* sin corrientes bruscas hasta temperatura ambiente.

Después del normalizado se realizaron tratamientos isotérmicos en las probetas para obtener microestructuras y niveles de dureza que se encontraran dentro de la Norma UIC 812.3-0[26]. Para mantener una temperatura constante en las probetas luego de austenización se emplearon sales térmicas ASTM AS-140 y el enfriamiento final fue en aceite con agitación manual. En la (Tabla 3-3) se recoge información sobre el tratamiento térmico realizado.

Tabla 3-3: Tratamiento Térmico probetas Rueda

	Temperatura de austenización	Tiempo sostenimiento a temperatura de austenización	Temperatura de sales	Tiempo sostenimiento a la temperatura de sales
Tratamiento1	840°C	30 minutos	520-530°C	30 segundos

3.4.2 Tratamiento térmico de las probetas de Riel.

Las probetas del material del riel también fueron normalizadas con el fin de homogenizar la microestructura y de tener condiciones estándar de trabajo. En el anexo 1 se puede encontrar el diagrama TTT empleado para hacer el diseños del ciclo térmico del material de riel R260.

Para este tratamiento se llevaron las probetas a temperatura de 870°C y se sostuvieron allí por aproximadamente 30 minutos, luego fueron enfriadas al aire sin corrientes bruscas hasta temperatura ambiente.

Después del normalizado se realizaron tratamientos isotérmicos en las probetas para obtener microestructuras y niveles de dureza que se encontraran dentro de la Norma UIC 860. Se calentaron las probetas a temperatura de austenización de 1100°C y se sostuvieron durante 5 minutos, Para mantener una temperatura constante en las probetas luego de la austenización se emplearon sales térmicas ASTM AS-140 a una temperatura de 550°C y se sostuvieron las probetas por aproximadamente 80 segundos para finalmente enfriarlas en aceite levemente agitado ver (Tabla 3-4). Los ciclos térmicos completos a los que fueron sometidas las probetas se presentan detallados en el anexo 1.

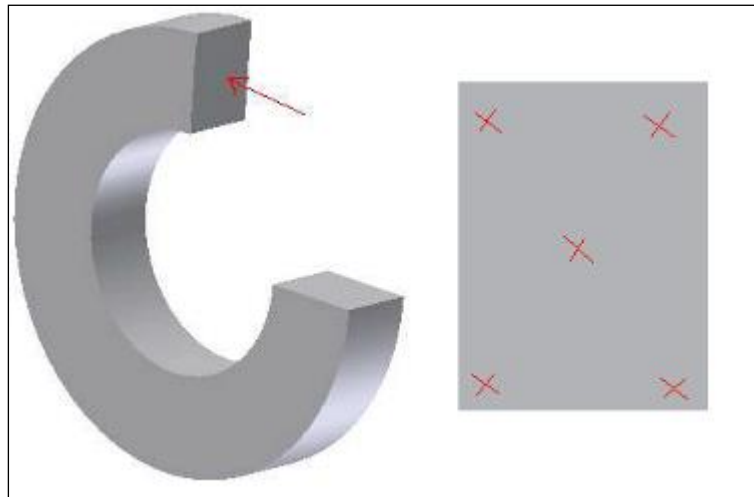
Tabla 3-4: Ciclos térmicos para el material del Riel R260

Microestructura	Temperatura De Austenización	Sostenimiento a Temperatura de Austenización	Temperatura de las sales AS-140	Sostenimiento en las Sales AS-140
Perlita	1100 °C	5 minutos	550 – 555 °C	80 segundos

3.4.3 Ensayo de dureza bajo la norma ASTM E92-82

Una vez realizados los tratamientos térmicos se hicieron registros de dureza en las muestras obtenidas tanto de la rueda como del riel, para ello se realizó un corte transversal de cada una de ellas y se hicieron cinco tomas de dureza en los puntos especificados. Ver (Figura 3-4)

Figura 3-4: Corte transversal y toma de durezas para las probetas de rueda y riel.



3.5 Obtención del acabado superficial inicial

Para definir la rugosidad de las probetas se consultaron los manuales y normas pertenecientes al Metro de Medellín y se hicieron también mediciones en sitio después de efectuar un proceso de reperfilado en un componente de rueda. En la norma UIC 812-5 OR [27] se encuentra consignado el valor medio de rugosidad R_a en el estado de entrega en diferentes puntos de la rueda antes del montaje en los trenes. Para la rueda se estableció un valor inferior de $R_a = 3.2 \mu m$ y un valor superior de $6.3 \mu m$ los cuales se definieron luego de hacer diferentes mediciones de una rueda recién re-perfilada. La rugosidad del riel fue definida completamente a partir de mediciones de un riel en vía y del estado del arte encontrado en anteriores investigaciones.[28]

3.5.1 Acabado superficial de las probetas de rueda

Se realizaron Mediciones de Rugosidad en el Vagón U28 CMB EJE 09 Rueda derecha, la cual fue reperfilada con una profundidad de avance 1 mm/Rev y una velocidad de 60 m/min, ver (Figura 3-5). En la (tabla 3-5) se presentan los valores de Ra y Rsm obtenidos después de un proceso de reperfilado.

Tabla 3-5: Acabado superficial de rueda derecha, eje 09, Vagón U28.

Ra[μm]	Rsm[μm]
10,9	1014
13,47	1434
12,75	347
18,03	1146

En condiciones reales de reperfilado de las ruedas del sistema Metro de Medellín se utilizan para el mecanizado pastillas de Tungsteno las cuales tienen cuatro filos para usar, y estos son cambiados cada 4 operaciones de reperfilado, las ruedas son revisadas cada 20.000km aproximadamente y se pueden re-perfilar hasta que tienen un diámetro mínimo de 803 mm.

Finalmente luego de hacer las mediciones de rugosidad, se definió emplear para las probetas extraídas del componente Rueda dos diferentes tipos de acabado superficial, con parámetros $Ra_1=3,2 \mu\text{m}$ y $Ra_2=6,3 \mu\text{m}$ respectivamente, ya que reproducir exactamente los parámetros de acabado superficial de una rueda no se consideró recomendable debido al reducido tamaño de las probetas. En consecuencia los acabados superficiales para estas probetas fueron obtenidos mediante mecanizado en torno, buscando reproducir el proceso de reperfilado de las ruedas que se da en campo real. Las condiciones de mecanizado y los parámetros de rugosidad superficial obtenidos para las condiciones iniciales en laboratorio se muestran en la (Tabla 3-6).

Figura 3-5: Proceso de reperfilado de una rueda del Sistema Metro de Medellín**Tabla 3-6:** Condiciones de mecanizado. Probeta rueda.

Velocidad de Avance	1,85mm/rev
Profundidad de Corte	0,02mm
Revoluciones torneado	460 rpm
Radio pastilla de corte	0,4mm
Parámetro promedio rugosidad Ra [μm]	Entre 2,8 y 3,5
Parámetro promedio rugosidad Rq [μm]	Entre 4,0 y 4,5

Para estas condiciones se seleccionó un $\lambda_c=2,5\text{mm}$, utilizando un filtro gaussiano según recomendaciones de la norma ISO 11562:1996. Este filtro es ideal para superficies de rugosidad media.

Longitud mínima $L_m=2,500\text{mm}$

$L_t=L_m \times n$ donde se seleccionó $n=1$; $L_t=2,5\text{mm}$

3.5.2 Acabado superficial de las probetas de riel

Para el caso de las probetas extraídas de riel se utilizó el reperfilado o esmerilado empleando piedras abrasivas con número de grano #16 las cuales van montadas en un dispositivo que hace girar los discos a una velocidad de 3600 a 4000 rpm.

Este procedimiento permite eliminar grietas sub-superficiales y dar paso a una nueva superficie libre de defectos. Ver (Figura 3-6). Posterior al reperfilado de rieles se procedió a realizar medición en sitio con un rugosímetro portátil Mitutoyo Surf Test, ver (figura 3-7), y se obtuvieron los resultados mostrados en la (Tabla 3-7).

Figura 3-6: Acabado superficial Probetas Riel

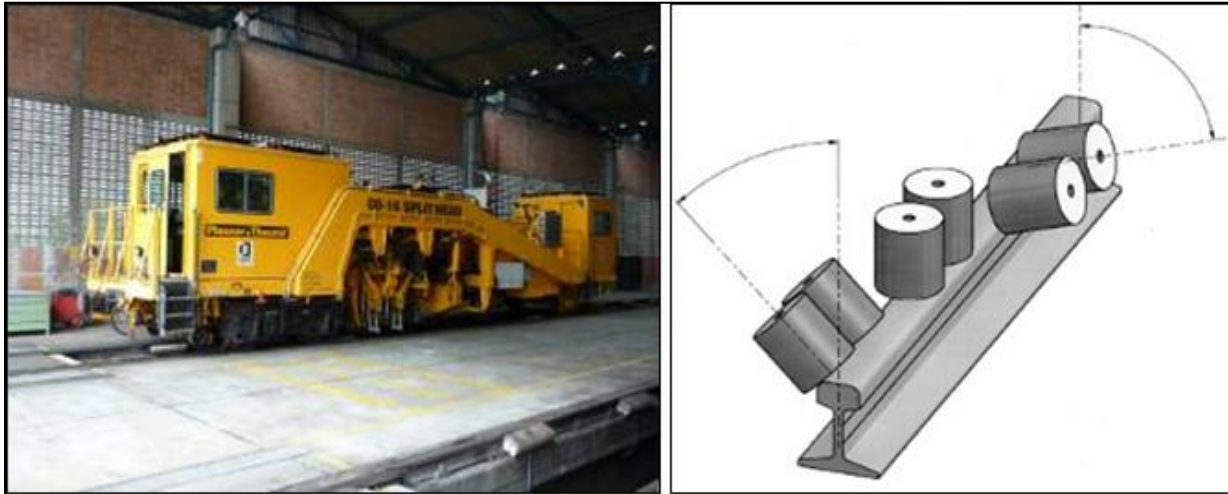
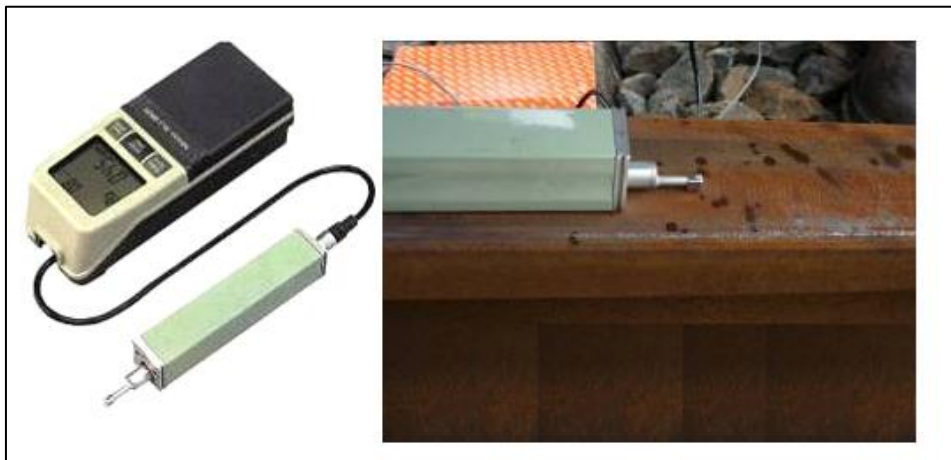


Figura 3-7: Medición de rugosidad en rieles con rugosímetro portátil



Para estas condiciones se seleccionó un $\lambda_c=0,800\text{mm}$

Longitud mínima $L_m=0,800\text{mm}$

$L_t=L_m \times n$ donde se seleccionó $n=3$; $L_t=2,400\text{mm}$

Se tomó un pre travel $\lambda_c/2$; longitud total avance del palpador $2,800\text{mm}$

Tabla 3-7: Parámetros de rugosidad medidos en vía

RUGOSIDAD MEDIDA EN UN RIEL ,EN TRAMO DE VÍA DE MANTENIMIENTO	
Ra[μm]	Rsm[μm]
1,52	78
2,12	137
2,97	78
0,55	45

Para obtener el acabado superficial de las probetas que representan el riel se realizó el montaje mostrado en la (Figura 3-8) en el cual la probeta es posicionada en un sistema autocentrante similar al de un torno, mientras que la piedra de esmeril - suministrada por el Metro de Medellín - se acopla al eje de un motor eléctrico. Este montaje permitió reproducir la condición de acabado superficial que se realiza en el riel. En la (tabla 3-8) se presentan los parámetros operacionales del reperfilado llevado a cabo en el laboratorio.

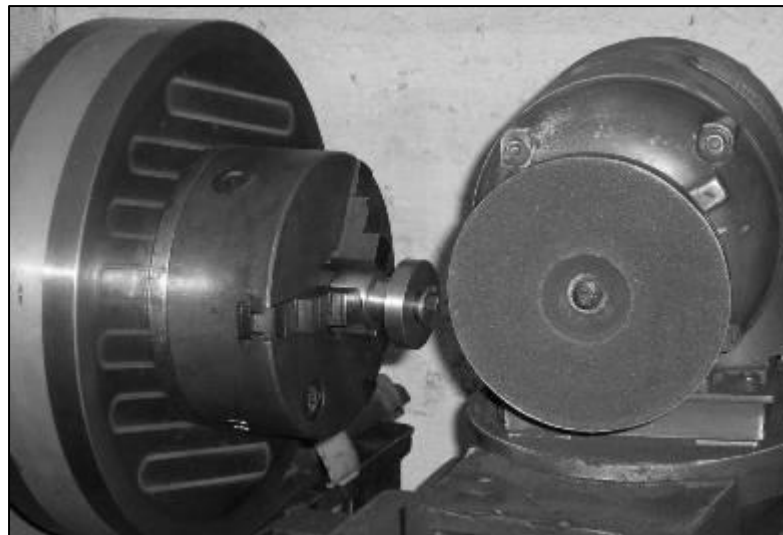
Figura 3-8. Montaje para Esmerilar las probetas que representan el riel

Tabla 3-8: Parámetros de maquinado para acabado superficial Riel

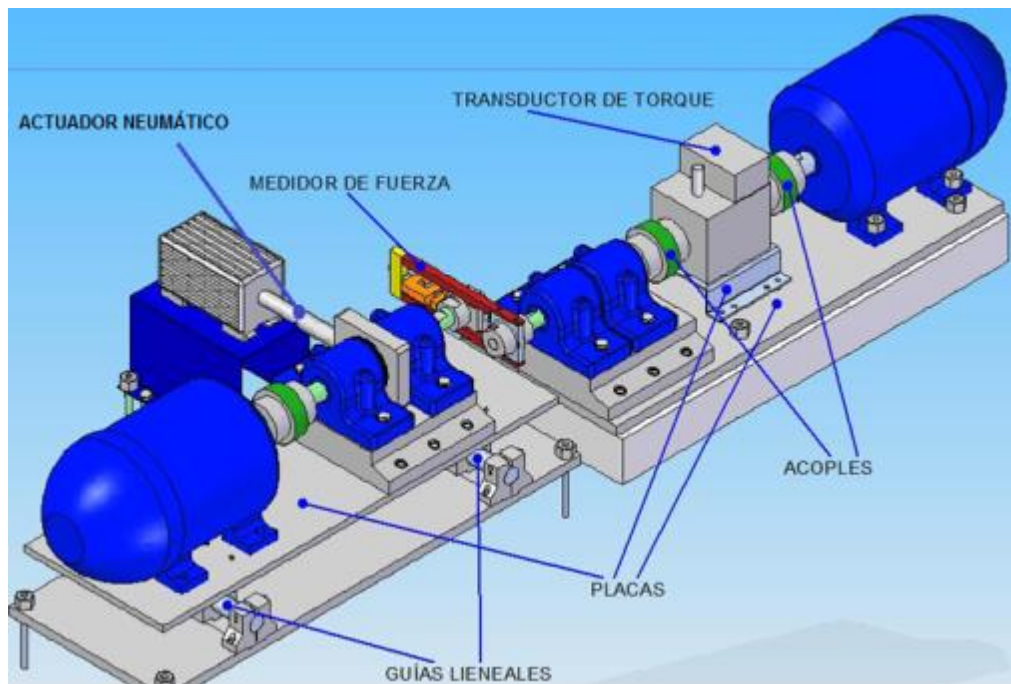
Velocidad rotacional probeta	500rpm
Velocidad Rotacional piedra	3600 rpm
Piedra grano #	16
Profundidad de Corte	0,05mm
Velocidad de avance	4mm/s
Parámetro promedio rugosidad Ra μm	Entre 1,0 y 2,0
Parámetro promedio rugosidad Rq μm	Entre 2,7 y 3,8

Es importante resaltar que el reperfilado de los rieles en campo se encuentra condicionado por parámetros de velocidad de la piedra, ángulo y profundidad que se genere, así como el tamaño de grano de la piedra empleada [29].

3.6 Ensayos de desgaste en tribómetro disco sobre disco

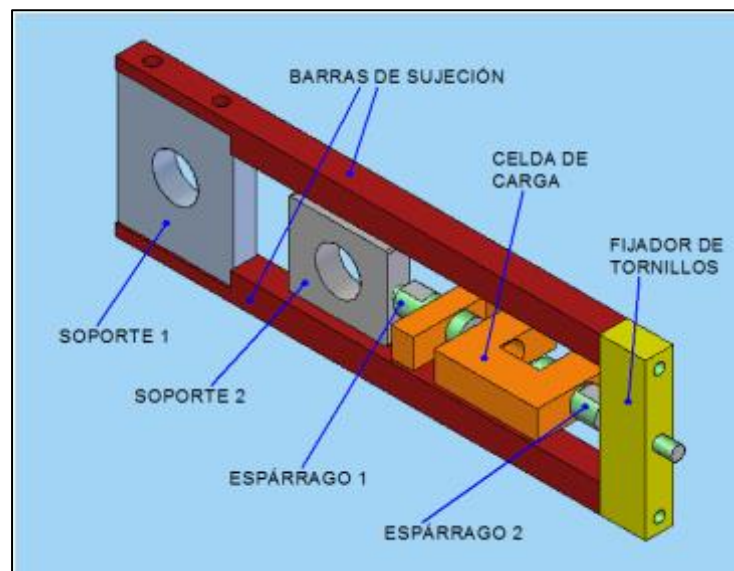
La máquina en la que se llevaron a cabo los ensayos para esta investigación se denomina Tribómetro Disco Sobre Disco y pertenece al Laboratorio de Tribología y Superficies de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. La máquina de pruebas es un dispositivo donde dos discos son puestos a rodar uno contra otro mediante la aplicación de una carga normal determinada. La (Figura 3-9) muestra esquemáticamente el tribómetro.

Figura 3-9. . Máquina de ensayos tipo Disco-Disco



El tribómetro cuenta con un dispositivo para medir la carga del experimento y la presión efectiva aplicada a las probetas. El dispositivo para calibrar consta de una celda de carga en S y tiene una capacidad de 500 kgf la cual se puede observar en la (Figura 3-10).

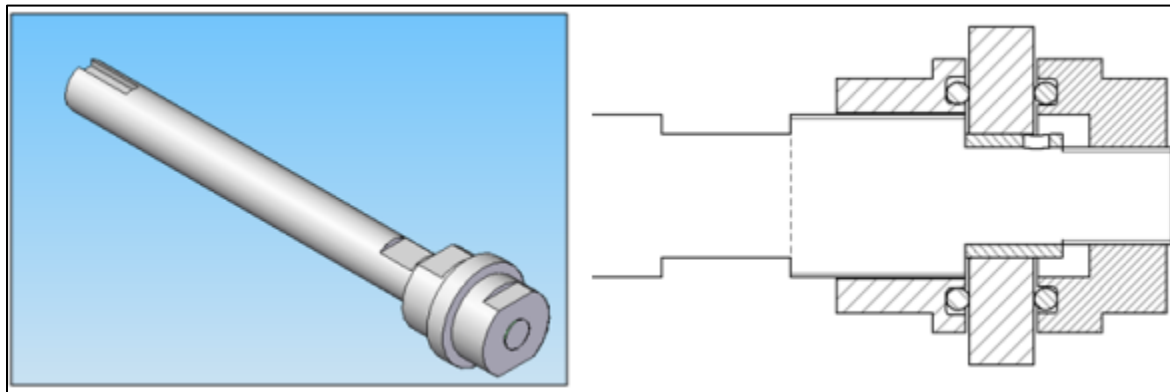
Figura 3-10. Dispositivo de medición de carga en el experimento



Ejes y sistemas de sujeción

El tribómetro tiene un sistema de sujeción de probetas que consiste en 2 tuercas con diferentes geometrías, cada una de ellas con un O-ring para evitar tanto el contacto metal-metal entre las probetas así como filtraciones de lubricante usado. En el sistema de sujeción se utiliza un buje de bronce sobre el eje para que al introducir y sacar probetas con el paso el tiempo no se vaya desgastando el eje sino el buje como elemento de recambio. Las tuercas se utilizan como un método de ajuste en la probeta, además permite cierta versatilidad ya que se pueden utilizar probetas de diferentes tamaños en la máquina. Ver (Figura 3-11)

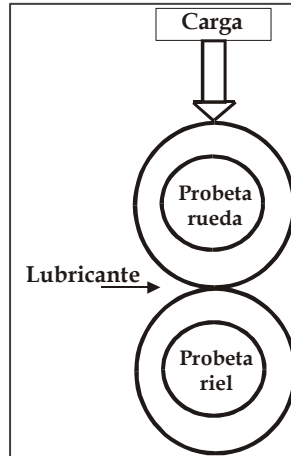
Figura 3-11. Sistema de sujeción de las probetas de experimentación



Configuración de Experimentación

En esta máquina es posible ensayar dos probetas con geometría cilíndrica montadas sobre ejes paralelos y cargadas radialmente una sobre la otra con una fuerza constante. Si las dos probetas giran a la misma velocidad, ellas experimentan un contacto de rodadura pura, pero si uno de los discos gira más rápido que el otro se puede evidenciar el fenómeno combinado de rodadura y deslizamiento (Figura 3-12)

Figura 3-12. Configuración de las probetas en un ensayo Disco-Disco [30]



El porcentaje de deslizamiento se define ajustando la velocidad de rotación de cada eje y está dado por la ecuación (3.1)

$$D(\%) = \frac{200(R_R N_R - R_W N_W)}{R_R N_R + R_W N_W} \quad (3.1) [31]$$

Donde:

R_R = Radio de probeta de riel

R_W = Radio de probeta de rueda

N_R = RPM de probeta de riel

N_W = RPM de probeta de rueda

3.6.1 Condiciones de experimentación:

Las condiciones de experimentación en el tribómetro disco sobre disco para la presente investigación fueron las siguientes:

Condiciones de carga y presión: Con una carga de 318 kgf (3116.4 N) medida con la celda de carga y bajo las condiciones de contacto y dimensionales de las probetas se estableció una presión fija de contacto de 1GPa.

Condiciones de rodadura y deslizamiento: En el tribómetro disco sobre disco se establecieron dos condiciones de velocidad, una condición de rodadura donde ambos

motores fueron puestos a girar a 1000 rpm y otra, bajo una condición de rodadura-deslizamiento, donde el motor de rueda se mantuvo en 1000 rpm y el de riel se programó a 980 rpm. Es importante notar, sin embargo, que en la máquina utilizada existe una tendencia a igualarse las velocidades de giro de los 2 ejes con el tiempo de ensayo debido a una acción de arrastre mecánico y regeneración eléctrica.

Tiempos de experimentación: Los tiempos de experimentación fueron iguales para todos los ensayos, en este sentido un ensayo completo corresponde al tiempo de 220 minutos en los cuales las probetas alcanzan a generar 220.000 ciclos; sin embargo, se realizaron mediciones intermedias de masa y calidad superficial hasta completar el ciclaje deseado. Dichas mediciones intermedias se llevaron a cabo a los [7.000], [15.000], [40.000], [75.000], [100.000], [140.000], [180.000] y [220.000] ciclos.

Condiciones de Lubricación: Se establecieron 2 condiciones de lubricación: pruebas no lubricadas o secas y pruebas en las que se empleó por inmersión una grasa denominada Ossagol V (ver anexo 2) garantizando el contacto lubricado permanente en el contacto.

3.7 Diseño Experimental

3.7.1 Niveles y Factores

Una vez identificadas las condiciones de experimentación se procedió a definir la técnica de diseños factoriales como la más adecuada para el análisis del proceso de experimentación.

Para seleccionar el diseño experimental fue necesario identificar los factores que intervenían en el proceso de desgaste en el contacto rueda riel, tanto fijos como variables. Se definieron de manera exploratoria un total de 3 factores para la experimentación en pruebas de laboratorio: Rugosidad (A), Lubricación (B), Deslizamiento (C) y una vez seleccionados los factores se determinó un conjunto de 2 niveles para cada factor, obteniendo un arreglo de experimentos 2^3 .

Rugosidad(A): Se refiere al acabado superficial inicial de las probetas de riel y rueda antes de ejecutar el ensayo. En este sentido se establecieron dos condiciones de

acabado superficial para la probeta de la rueda con un Ra en un nivel alto de 6,3 μm y Ra bajo con un valor de 3,2 μm . Estos valores de rugosidad se eligieron a partir de mediciones en campo. Por otra parte la rugosidad inicial de la probeta riel se dejó considerado como un sólo valor o un parámetro de entrada en el e experimento.

Lubricación (B): Se refiere a las condiciones de contacto (seca o lubricada), como es una descripción cualitativa establecimos el nivel bajo Seco y el nivel alto Lubricado.

Deslizamiento (C): Se refiere a la Relación de velocidad entre las dos probetas en la cual se establecieron dos niveles, un nivel Alto para la condiciones de Rodadura y deslizamiento equivalente al 2% de deslizamiento relativo y un nivel bajo para la condición de rodadura equivalente a 0%. Estos últimos fueron seleccionados a partir de valores típicos que se encontraron en pruebas de laboratorio.[32]

En la (Tabla 3-9) se puede visualizar un resumen de los factores y niveles de la presente investigación.

Tabla 3-9: Factores considerados en el diseño experimental

Factores	Dominio Experimental	
	Nivel(-)	Nivel(+)
Rugosidad (μm)	3,2	6,3
Lubricación	seca	Grasa Ossagol V
%Deslizamiento	0%	2%

Factores Fijos

Presión de Contacto: La presión de contacto durante los ensayos fue mantenida constante y se definió a partir de la información disponible en la literatura acerca de valores de presión críticos que se presentan en sistemas ferroviarios urbanos [33-34].

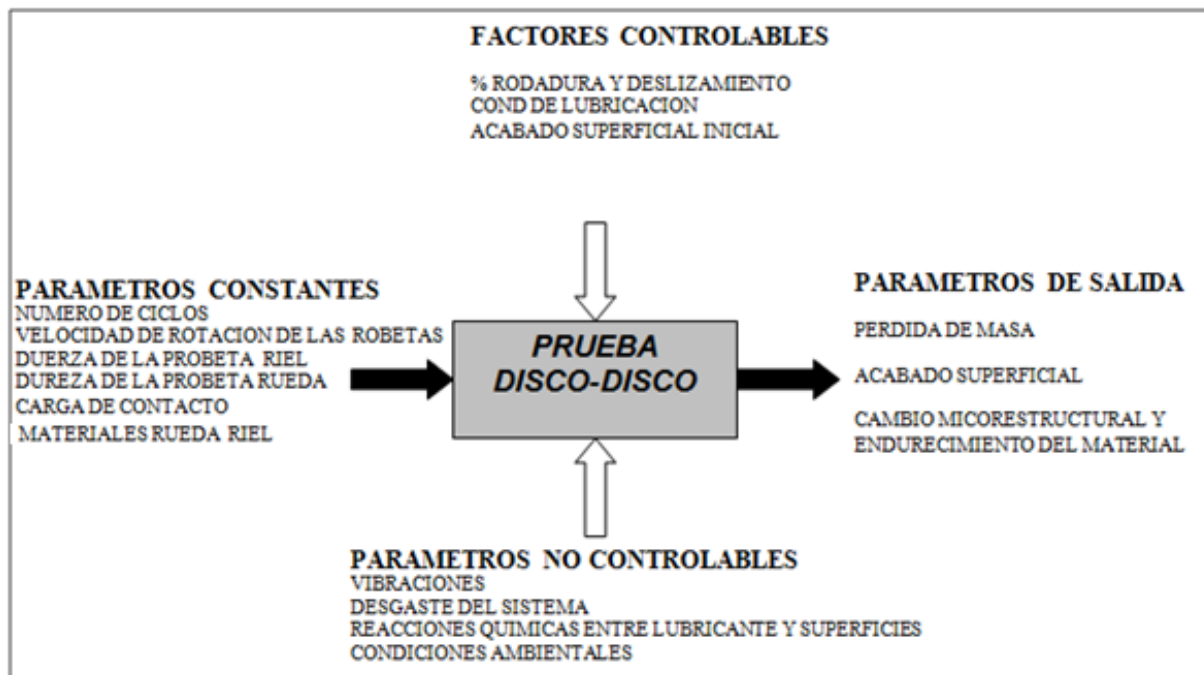
El acabado superficial inicial Riel: Se estableció un acabado superficial inicial para las probetas de riel.

Condiciones ambientales: las condiciones de temperatura y humedad se consideraron constantes dentro del laboratorio Durante los ensayos se verificó la temperatura ambiente, humedad y presión atmosférica.

Materiales: Los materiales de las probetas de experimentación fueron extraídos de componentes suministrados por el Metro de Medellín, donde se empleó un riel de Designación R260 y una rueda de Fabricación alemana.

En la figura 3-13 se presenta un esquema general de los factores fijos y variables que afectan el diseño experimental

Figura 3-13. Esquema General Diseño experimental



A partir de la definición los tres factores (lubricación, rugosidad y deslizamiento), cada uno con dos niveles, fue posible definir un diseño factorial completo 2^3 . Para cada una de las corridas presentadas se realizaron tres réplicas con el fin de facilitar el análisis y una mejor estimación del error experimental.

Luego de tener las probetas en condiciones óptimas se desarrollaron los ensayos, para lo cual se hizo un arreglo aleatorio del orden de las corridas en el programa estadístico MINITAB, ver (Tabla 3-10).

Tabla 3-10: Arreglo experimental ensayos en minitab

OrdenEst	Orden Corrida	RUGOSIDAD	COND.LUBRICACION	% DESLIZAMIENTO
3	1	3,2	LUBRICADO	0
21	2	3,2	SECO	2
5	3	3,2	SECO	2
4	4	6,3	LUBRICADO	0
1	5	3,2	SECO	0
23	6	3,2	LUBRICADO	2
17	7	3,2	SECO	0
10	8	6,3	SECO	0
8	9	6,3	LUBRICADO	2
11	10	3,2	LUBRICADO	0
7	11	3,2	LUBRICADO	2
15	12	3,2	LUBRICADO	2
18	13	6,3	SECO	0
16	14	6,3	LUBRICADO	2
22	15	6,3	SECO	2
19	16	3,2	LUBRICADO	0
6	17	6,3	SECO	2
12	18	6,3	LUBRICADO	0
9	19	3,2	SECO	0
20	20	6,3	LUBRICADO	0
24	21	6,3	LUBRICADO	2
13	22	3,2	SECO	2
14	23	6,3	SECO	2
2	24	6,3	SECO	0

3.7.2 Procedimiento general de ensayo:

Luego de tener las probetas con las condiciones iniciales de operación con la microestructura, dureza y acabado superficial determinados se realizaron las pruebas en el tribómetro disco-disco para hacer el respectivo ensayo; luego se verificaron las condiciones ambientales (humedad y temperatura) seguido del establecimiento de los parámetros de carga, porcentaje de deslizamiento y velocidad angular en la máquina. Dado que se tiene conocimiento de la velocidad angular de la probeta se estipuló el tiempo del ensayo para cada número de ciclos donde se hicieron las mediciones

intermedias hasta llegar a 220000 ciclos. Cuando la probeta fue ensayada hasta el número de ciclos de interés, se le realizó una limpieza con ultrasonido durante 5 minutos en un baño de alcohol con el fin de desprender virutas y suciedades que hicieran parte de la misma, luego se pesó para evaluar la pérdida de masa y por último se hizo la medición del acabado superficial.

3.7.3 Variables de salida:

Pérdida de masa: la pérdida de masa fue evaluada utilizando una balanza electrónica SARTORIUS con poder de resolución de 0.01 mg.

Acabado superficial: Fue medido antes y después de cada ensayo usando la estación semi-automática Mitutoyo SV-3000 ubicada en el Laboratorio de Tribología y Superficies. Los parámetros que fueron relacionados fueron parámetros de amplitud Ra,Rq,Rz parámetros de contacto Rk,Rpk,Rvk y parámetros de simetría y distribución Rku,Rsk. Todos los parámetros se midieron al inicio del ensayo y luego con paradas intermedias a los 7000, 15.000, 40.000, 75.000, 100.000, 140.000, 180.000 y 220.000 ciclos.

Cambios microestructurales: Cada muestra metalográfica extraída de las probetas de ensayo se analizó en un corte longitudinal con respecto a la dirección de giro (Figura 4.14), con el propósito de identificar los inicios de la falla y su evolución en el tiempo, para esto se usó el microscopio estereoscópico Leica GZ6 y el microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 5910LV instalados en el Laboratorio de Metalografía y de Microscopía Avanzada respectivamente, buscando establecer relaciones entre mecanismos de desgaste y fallas en la microestructura, vale aclarar que la preparación metalográfica fue igual a la realizada para el análisis de las microestructuras iniciales de ensayo, ver (Figura 3-14).

Microdureza bajo la superficie: En este trabajo se realizaron mediciones de microdureza bajo la superficie, en un corte longitudinal con respecto a la dirección de giro (Figura 3-15), estas mediciones se llevaron a cabo en un microdurómetro SHIMADZU serie M con una resolución de 0.5 μm y con una carga de 100 gf siguiendo los lineamientos de la norma ASTM E-384-09.

Figura 3-14. Procedimiento de extracción de probetas para análisis metalográfico.

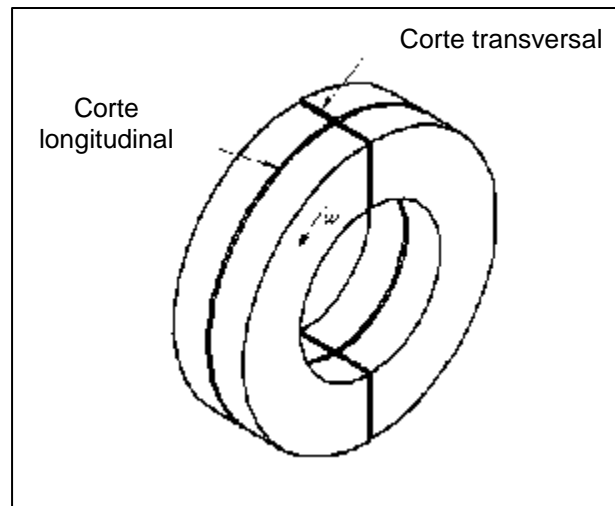
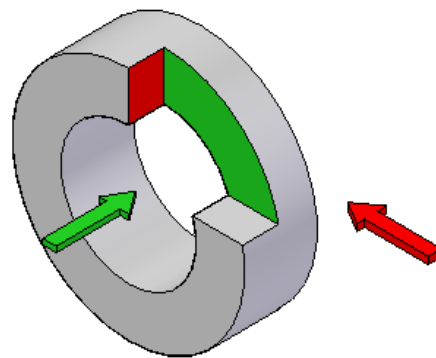
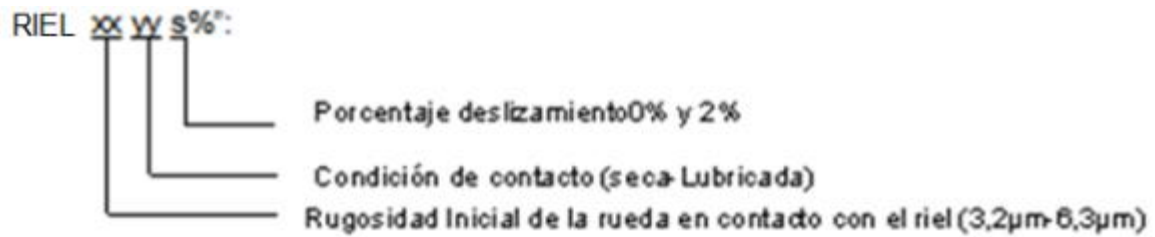


Figura 3-15. Procedimiento Extracción Muestra de material para micro dureza

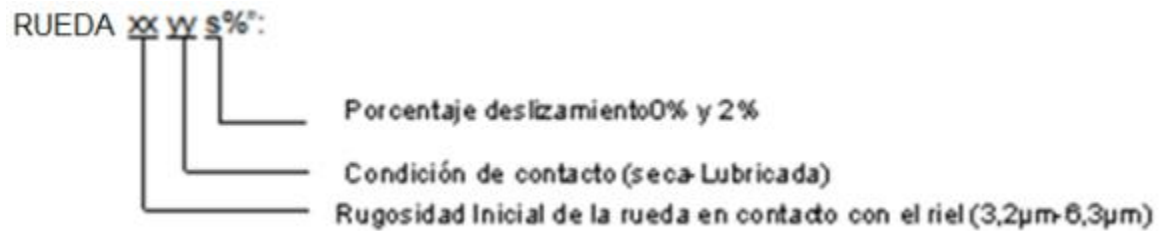


Identificación de las muestras: Los resultados de las variaciones de pérdida de masa y calidad superficial de las probetas presentadas en los resultados corresponden a la siguiente denominación:

Para una probeta de material de Riel en contacto con una probeta de rueda bajo todas las posibles condiciones las curvas informativas se designan de la siguiente manera



Para una probeta de material de Rueda en contacto con una probeta de Riel bajo todas las posibles condiciones las curvas informativas se designan de la siguiente manera:



Es importante considerar que todas las probetas de riel inician con una rugosidad fija, este parámetro solo se modifica en las probetas de material rueda.

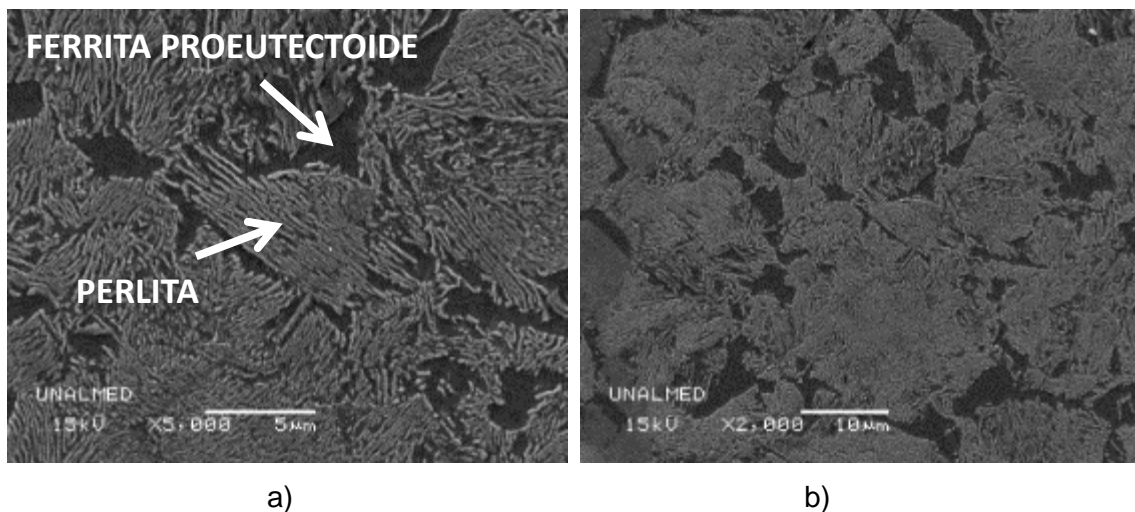
4. Resultados y Discusión

4.1 Análisis microestructural

4.1.1 Microestructura de la Rueda

La (figura 4-1) presenta la microestructura del material de la rueda alemana después de ser sometida a los respectivos tratamientos térmicos, la cual está compuesta por una mezcla de perlita fina y perlita gruesa. Al realizar diferentes tomas de dureza sobre las probetas se obtuvieron valores entre 280 y 290 HV, los cuales son del mismo orden que presentan las ruedas empleadas por el Metro de Medellín.

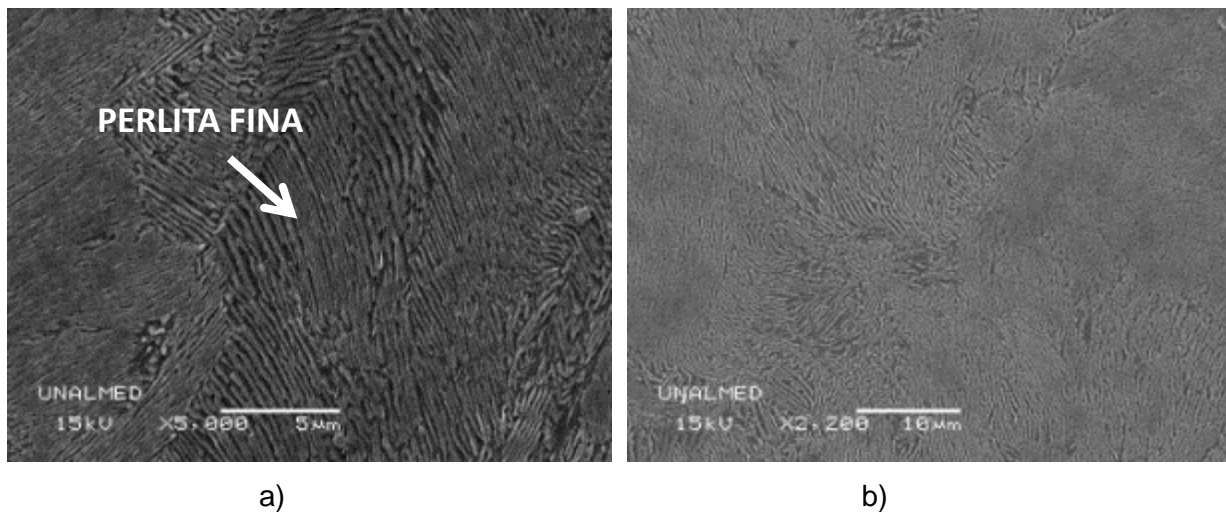
Figura 4-1: Microestructura de material de las probetas de rueda alemana. Perlita fina + Perlita gruesa. Nital 2%. a) 5000X, b) 2000X.



4.1.2 Microestructura del riel

En la (figura 4-2) se observa la microestructura del riel R260, compuesta por perlita fina. En la medición de dureza se utilizaron los mismos parámetros definidos para la rueda y, se encontró, una dureza entre 340 y 360 HV, la cual es semejante a la que presentan los rieles en el sistema férreo del Metro de Medellín.

Figura 4-2: Microestructura de material Probetas Riel R260. Perlita fina. Nital 2%. a) 5000X, b) 2200X.



4.2 Resistencia al desgaste

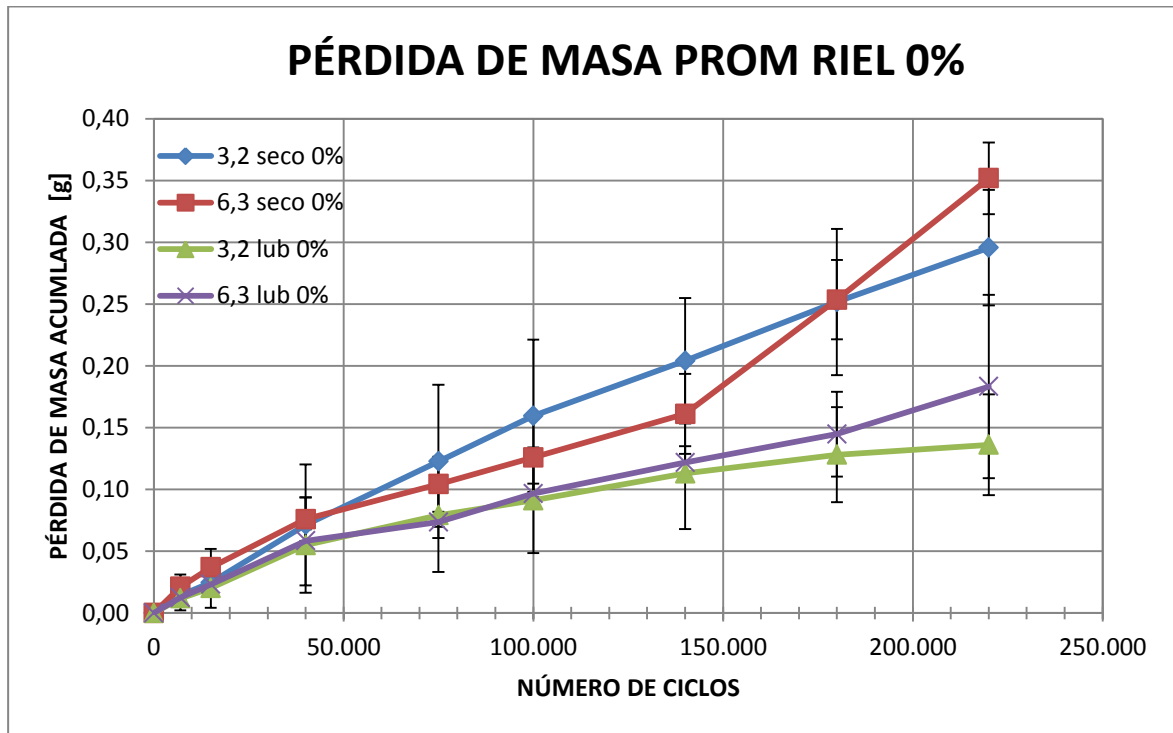
4.2.1 Probetas de riel

En la Figura 4-3 se presentan por separado los valores de pérdida de masa acumulada de las probetas de riel que se emplearon como contracuerpo con las probetas de la rueda, las cuales utilizaron 2 condiciones de acabado superficial inicial ($R_a = 3,2 \mu\text{m}$ y $R_a = 6,3 \mu\text{m}$), 2 condiciones de contacto (seca y lubricada) y 0% de deslizamiento.

Efecto del acabado superficial: Al analizar la figura 4-3 para las curvas bajo una misma condición de contacto, se presenta una leve tendencia a perder más masa en probetas con un mayor nivel de R_a inicial. En seco a partir de los 140mil ciclos y en lubricada a partir de los 180mil ciclos; estas incrementan sus pérdidas de masa en la rueda más rugosa conforme avanza el tiempo (o los ciclos aumentan).

Efecto de la condición de lubricación: Al evaluar las curvas de pérdida de masa con una misma condición de Ra inicial en la (figura 4-3), en todos los casos se puede apreciar que las pérdidas de masa son mayores en condiciones secas respecto a las lubricadas.

Figura 4-3: Pérdida de masa promedio del riel a 0% deslizamiento.

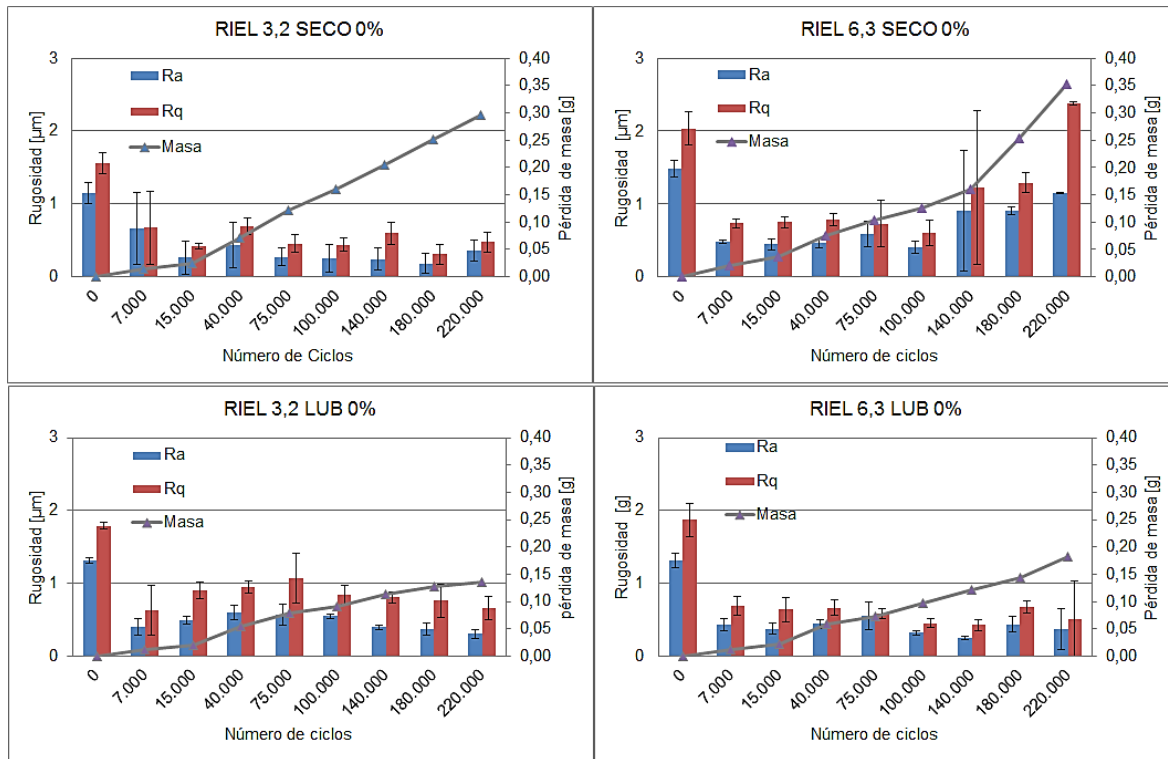


En general hasta los 40.000 ciclos no hay diferencias marcadas en la respuesta de las probetas frente a las diversas condiciones de ensayo empleadas. Con el propósito de establecer una relación entre pérdidas de masa y los cambios de la superficie se presentan en las figuras 4-4 a 4-7 las variaciones de los parámetros de amplitud Ra, Rq y Rz, parámetros de contacto tales como Rpk, Rvk, Rk (extraídos de la curva de Abbott-Firestone) y parámetros de simetría y distribución de picos Rsk, RKu en función del tiempo de ensayo (número de ciclos).

Evaluación de los parámetros de rugosidad con la pérdida de masa para riel 0%.

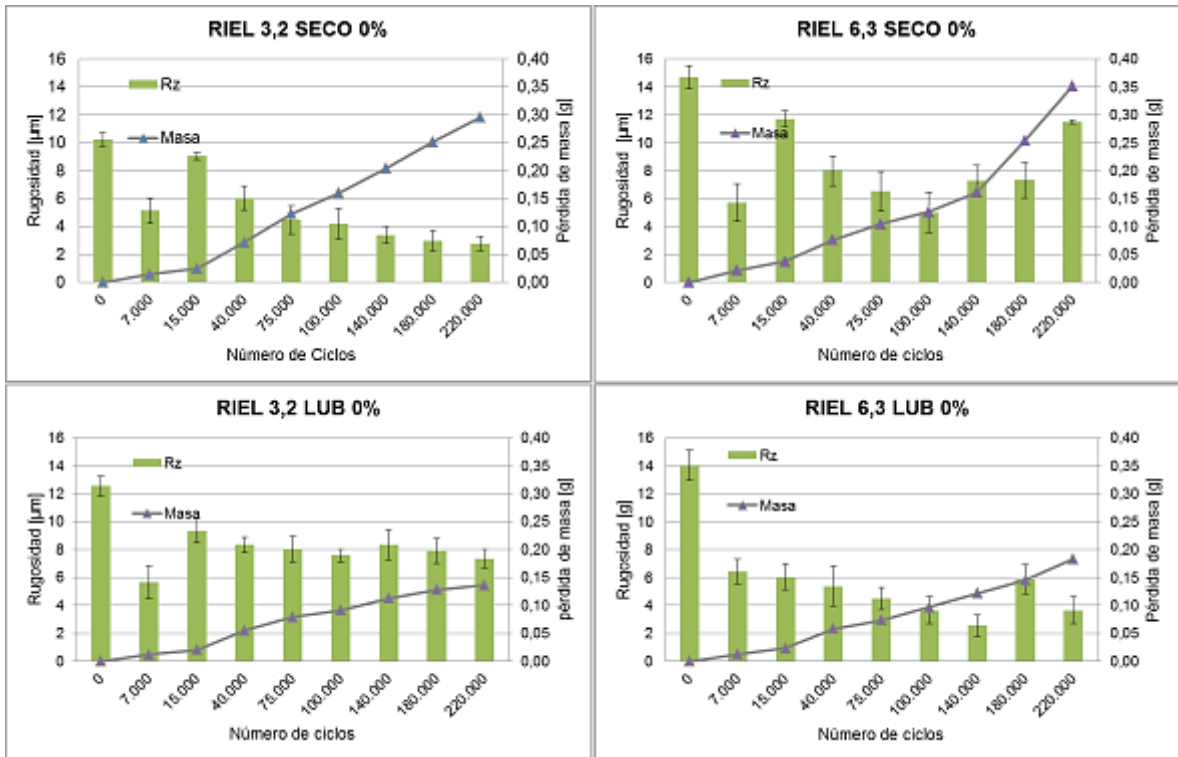
Al analizar los cambios de Ra y Rq (Figura 4-4) se puede apreciar que durante los primeros ciclos del ensayo se presenta un descenso rápido hasta un valor estable determinado y a partir de allí los parámetros permanecen casi constantes hasta el final de la prueba, mientras que la pérdida de masa varía de manera más dinámica con cambios de pendiente, que en principio no presentan relación aparente con los parámetros de amplitud media de la rugosidad.

Figura 4-4: Pérdida de masa y variación de parámetros de amplitud Ra, Rq.



El parámetro Rz Ver (Figura 4-5), presentó una ligera tendencia a disminuir con el tiempo de ensayo, lo cual puede atribuirse a la gradual remoción de material de los picos más grandes de la superficie, en los que los esfuerzos de contacto son mayores y más fácilmente se logra la falla localizada del material. Sin embargo, en 7.000 ciclos hay un mínimo relativo en tres de las condiciones mostradas y en 15.000 ciclos un máximo relativo. Lo cual se discute más abajo cuando se analicen los parámetros de simetría y distribución.

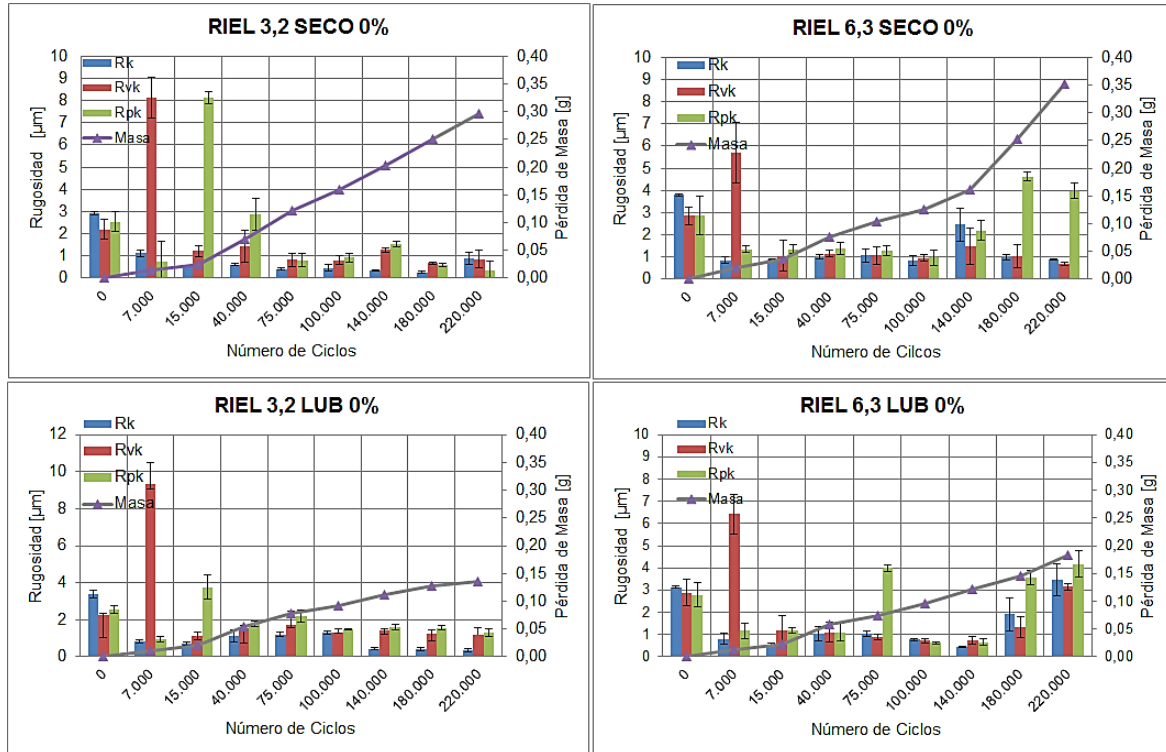
Figura 4-5: Pérdida de masa y variación de parámetros de rugosidad Rz.



En la figura 4-6 se presentan los parámetros de la curva de Abbott-Firestone, al evaluar el parámetro Rk se aprecia una disminución gradual a partir de los ciclos iniciales, aunque en algunos casos aparecen fluctuaciones atípicas con tendencia a incrementar su valor, como en el caso del ensayo “Riel 6,3 seco 0” alrededor de los 140.000 ciclos y en el caso del ensayo “Riel 6,3 Lub 0%” alrededor de los 180.000 y 220.000 ciclos. Sin embargo, puede decirse que en general existe una leve tendencia a aumentar la pérdida de masa justo en los puntos donde el parámetro Rk aumenta, lo cual es consistente con el hecho de que el valor de dicho parámetro está inversamente relacionado con la capacidad de carga de la superficie. El parámetro Rvk, por otro lado, es usado para evaluar la probabilidad de ocurrencia de fenómenos como atrapamiento de debris y retención de lubricante, por lo que es también razonable que la curva de pérdida de masa presente pendientes menores en el caso de las pruebas lubricadas en los intervalos en los que Rvk aumenta, posiblemente por variación de la superficie, en la cual se presentan mayor profundidad en los valles. Ver (Figura 4-6)

El parámetro Rpk tiene en general un comportamiento muy uniforme en todas las pruebas a partir de los 15.000 ciclos. Sin embargo se presentan algunas fluctuaciones especialmente en los ensayos donde se usó un valor de Ra inicial de 6,3 μm .

Figura 4-6: Pérdida de masa y variación de parámetros de contacto en riel 0%



Al evaluar el comportamiento de los parámetros de simetría Rsk(skewness) y distribución de picos Rku (kurtosis),(Figura 4-7) es posible observar que el parámetro Rsk es prácticamente cero, al inicio de las pruebas – lo cual está acorde con el proceso de mecanizado utilizado para fabricar las probetas – y luego presenta una tendencia hacia valores negativos que se revierte a partir de 40.000 ciclos, justo cuando el valor de Rz presenta en casi todas las pruebas un máximo relativo (en medio de su tendencia general a disminuir).

Este comportamiento es bastante interesante y puede ser usado para identificar diferentes etapas en el período de acomodación o running-in: inicialmente hay una disminución global de la rugosidad (un “alisamiento” de la superficie), con Rsk negativo y Ra, Rq y Rz bajando; luego comienzan a ocurrir desprendimientos localizados de

material y aparecen picos nuevos en la superficie cuya cantidad no es suficiente para que Ra y Rq aumenten pero sí para que Rz lo haga (cuyo valor es sensible justamente a la presencia de picos individuales), y Rsk se torna positivo. En este punto el período de acomodación termina y comienza el régimen estacionario con Ra y Rq casi constantes (superficies “acomodadas” o “asentadas”) pero con Rz variable, observamos los puntos donde Rsk es siempre positivo y $Rku > 3$ (se tiene una superficie con la presencia de picos puntiagudos y valles menos profundos). En las pruebas realizadas este régimen se mantuvo y no se llevó a las superficies a un nuevo cambio de condiciones de contacto o desgaste, el cual por ejemplo se podría estimular con un cambio en la carga o en el deslizamiento relativo.

Figura 4-7: Pérdida de masa y variación de parámetros de simetría y distribución de picos Rsk, Rku a 0%

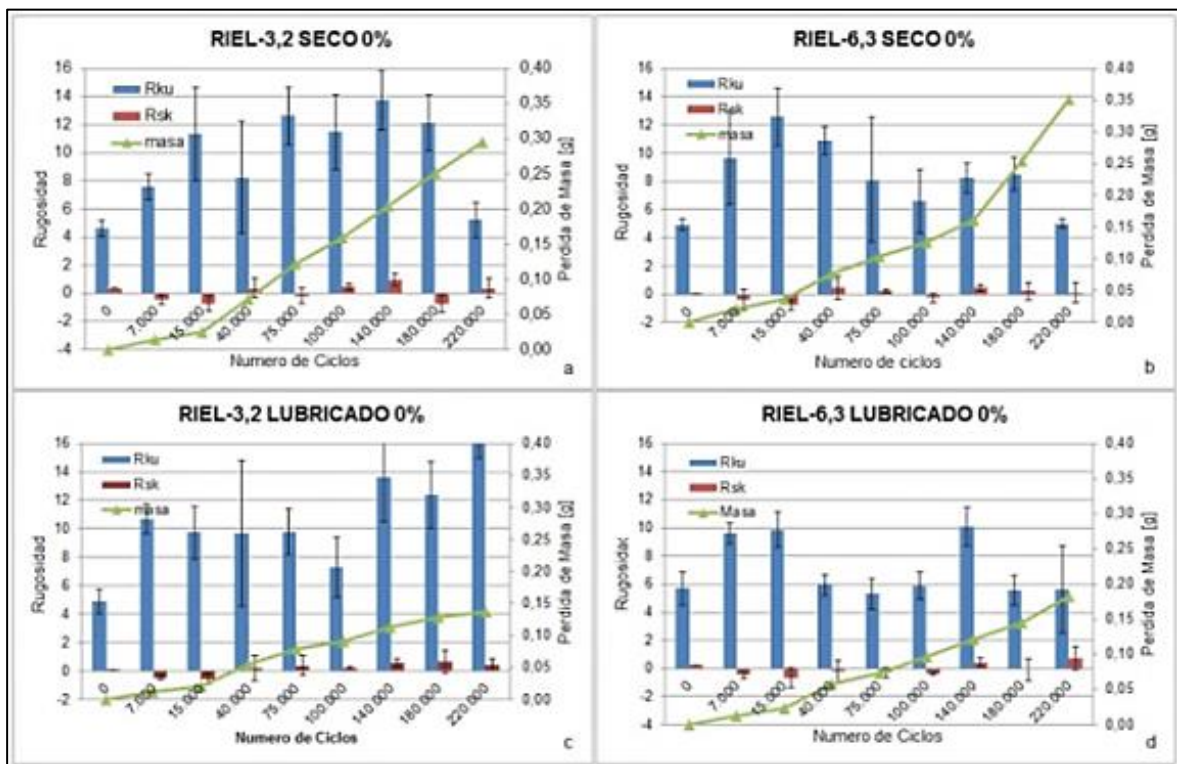
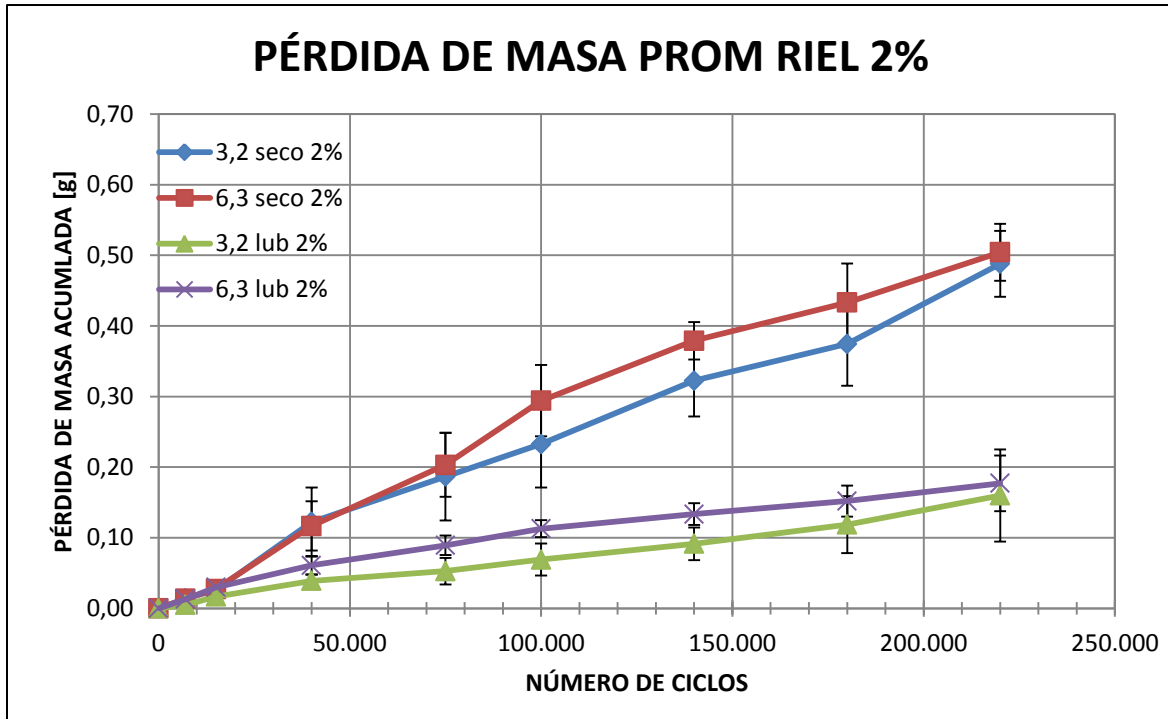


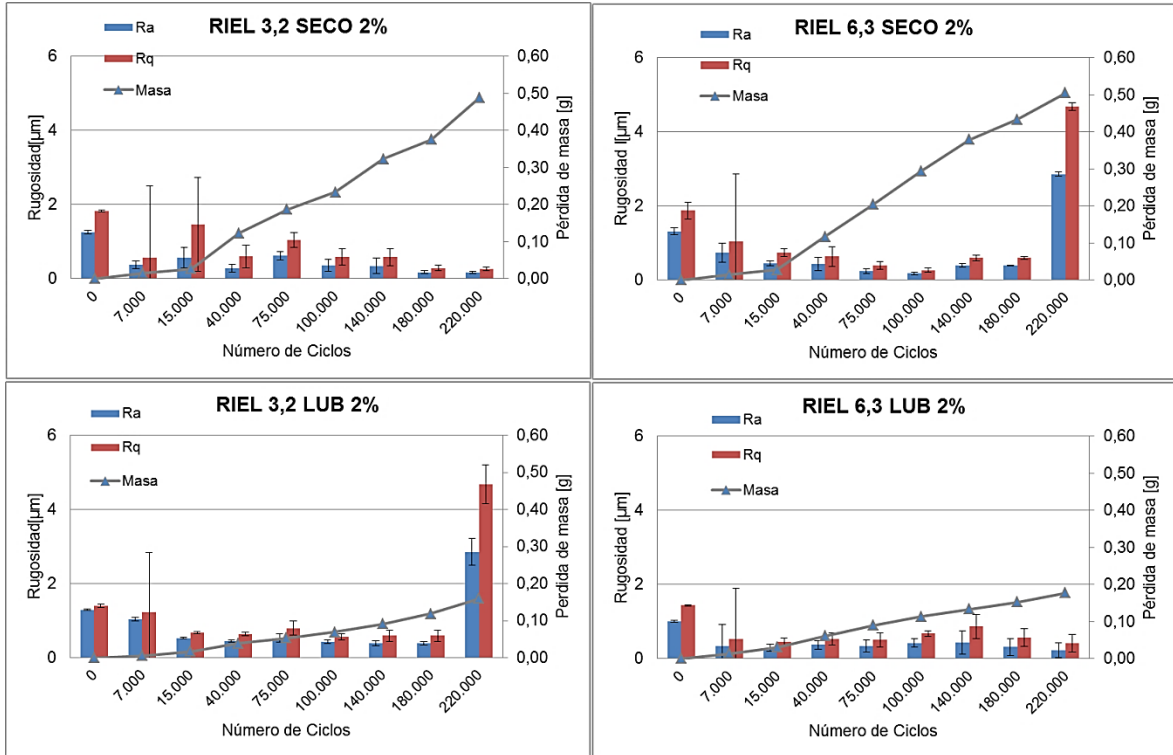
Figura 4-8: Pérdida de masa promedio del riel bajo rodadura-deslizamiento 2%

Efecto del acabado superficial: Respecto al efecto del acabado superficial inicial basados en R_a , la tendencia sigue mostrando que una condición de rodadura y deslizamiento equivalente al 2% una ligera tendencia a perder una mayor cantidad de masa empleando una condición superior con un nivel de rugosidad alto de $6,3 \mu\text{m}$ respecto al nivel inferior de $3,2 \mu\text{m}$ tanto para condiciones secas y lubricadas. Sin embargo al final del número de ciclos se evidencia como las curvas de pérdida de masa de los dos acabados superficiales tienden a encontrarse. (Figura 4-8)

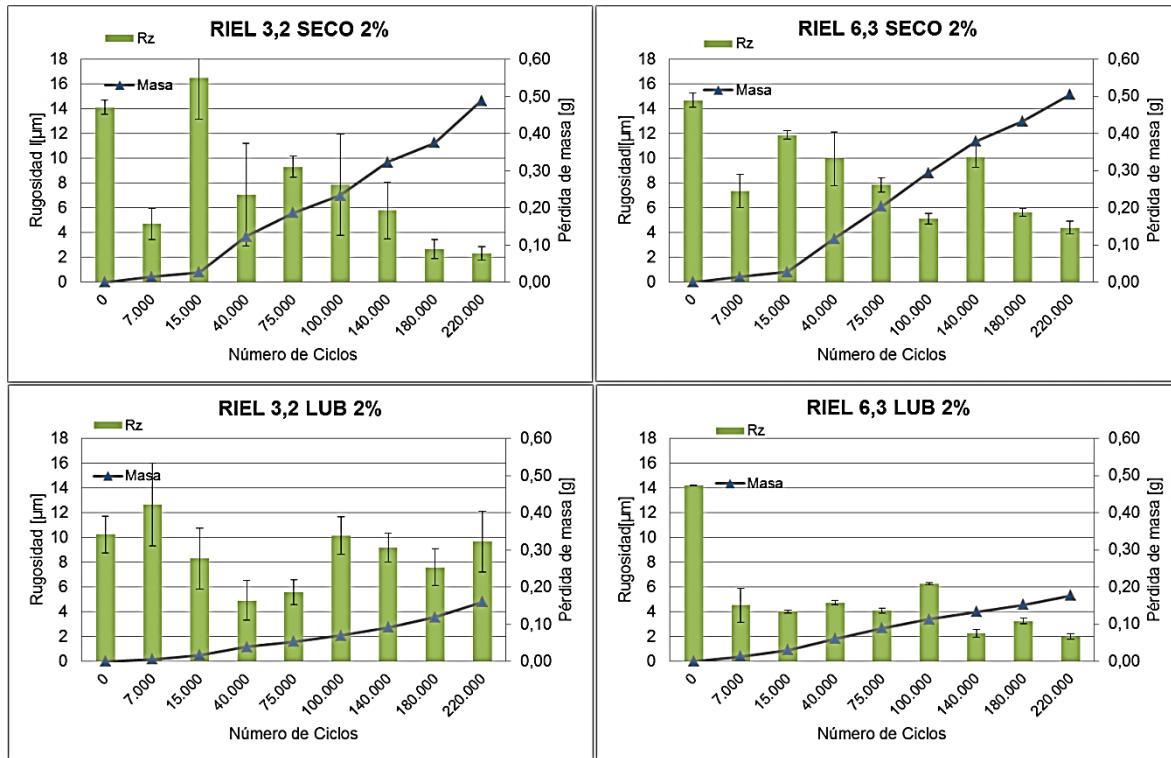
Efecto de la condición de lubricación: En la figura (Figura 4-8), se observa como en todas las configuraciones, para una misma condición de deslizamiento equivalente del 2% se evidencia una tendencia mayor de pérdida de masa en condiciones secas respecto a las lubricadas utilizando el lubricante Ossagol V.

Evaluación de los parámetros de Rugosidad con la pérdida de masa para riel 2%.

Figura 4-9: Pérdida de masa y variación de parámetros de amplitud Ra, Rq con rodadura-deslizamiento 2%



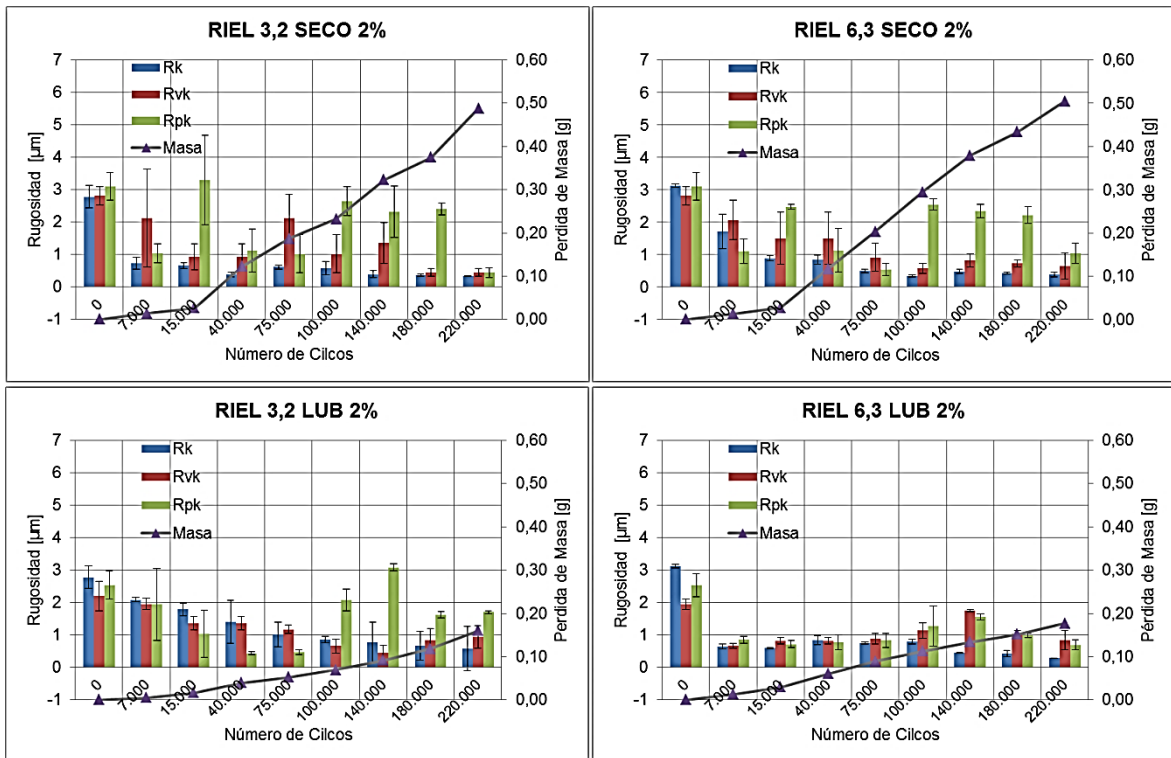
Al revisar la (Figura 4-9) es posible visualizar como los parámetros Ra y Rq disminuyen su valor rápidamente para todas las condiciones. Sin embargo, bajo las condiciones “Riel 3,2 Lub 2%” y “Riel 6,3 seco 2”, en el último periodo de medición correspondiente a los 220.000 ciclos, estos parámetros incrementan su nivel, hasta un valor por encima de la condición inicial. Esto puede deberse a desprendimientos localizados de material y a la aparición de picos nuevos en la superficie cuya cantidad influye para que Ra y Rq varíen. Sin embargo no se aprecia una correlación directa de los parámetros de amplitud con la curva de pérdida de masa.

Figura 4-10. Pérdida de masa y variación de parámetros de amplitud Rz con rodadura-deslizamiento 2%

De manera general para las cuatro condiciones de experimentación presentadas en la (Figura 4-10) no se evidencia una tendencia definida en el comportamiento del parámetro Rz respecto a la curva de masa. Sin embargo para las figuras correspondientes a condiciones de contacto secas, se puede verificar que alrededor de los 15.000 ciclos se presenta un aumento en el parámetro Rz, en este mismo punto la curva de masa tiene una pendiente ligeramente mayor, lo cual evidencia una alta pérdida de masa respecto a los ciclos anteriores. Finalmente en los ensayos bajo condiciones lubricadas el parámetro Rz presenta un comportamiento fluctuante y la curva de masa tiene una tendencia más lineal en ambos casos.

Para las condiciones presentadas en la (figura 4-11), es posible observar como los parámetros Rk y Rvk descienden ligeramente y permanecen en un valor casi constante durante toda la prueba.

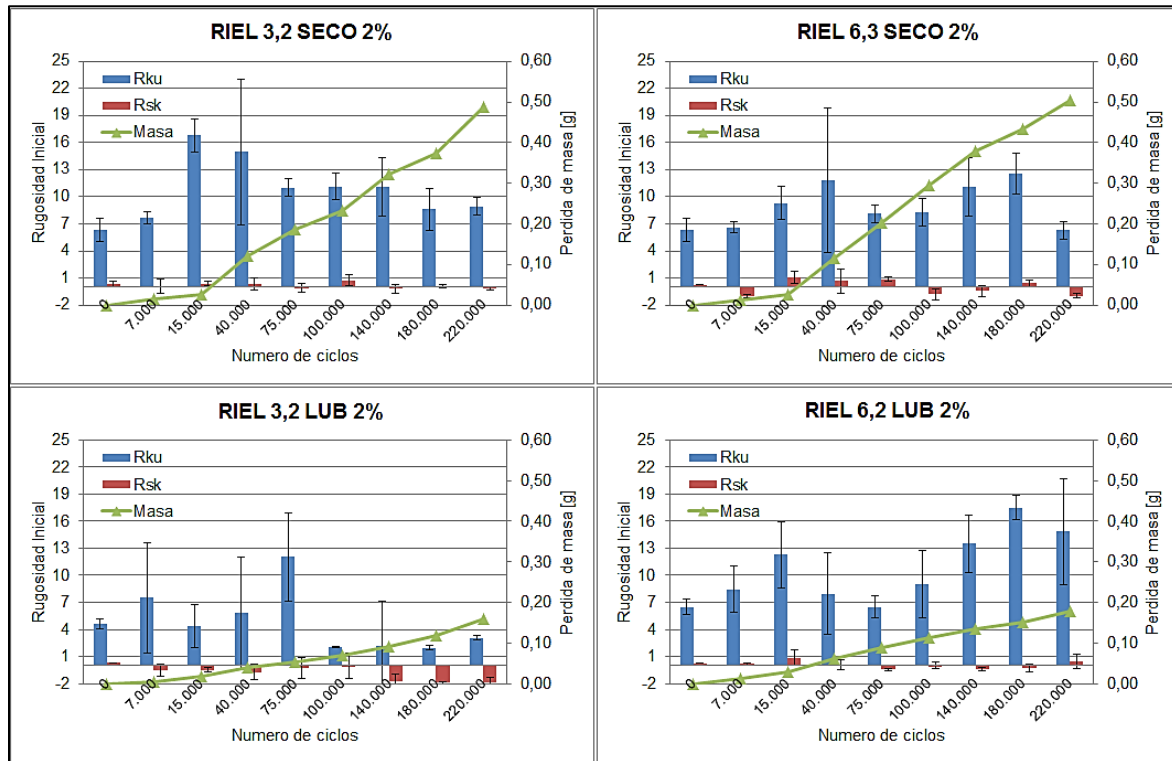
Figura 4-11: Pérdida de masa y variación de parámetros Rk, Rvk, Rpk con rodadura y deslizamiento 2%



Al evaluar el parámetro Rpk, se observan algunas fluctuaciones bajo todas las condiciones, sin embargo de manera general se percibe que a partir de los 100.000 ciclos hay un aumento progresivo, siendo más notable este aumento para condiciones secas. Al analizar las curvas de pérdida de masa no se identifica claramente una correlación entre los parámetros de contacto medidos y la respuesta en desgaste de las probetas. Esto indica que los mecanismos de desgaste dominantes durante las pruebas son más dependientes de lo que ocurre en la sub-superficie de las muestras, lo cual es propio de fenómenos de fatiga de contacto, y no tanto de la morfología de la superficie.

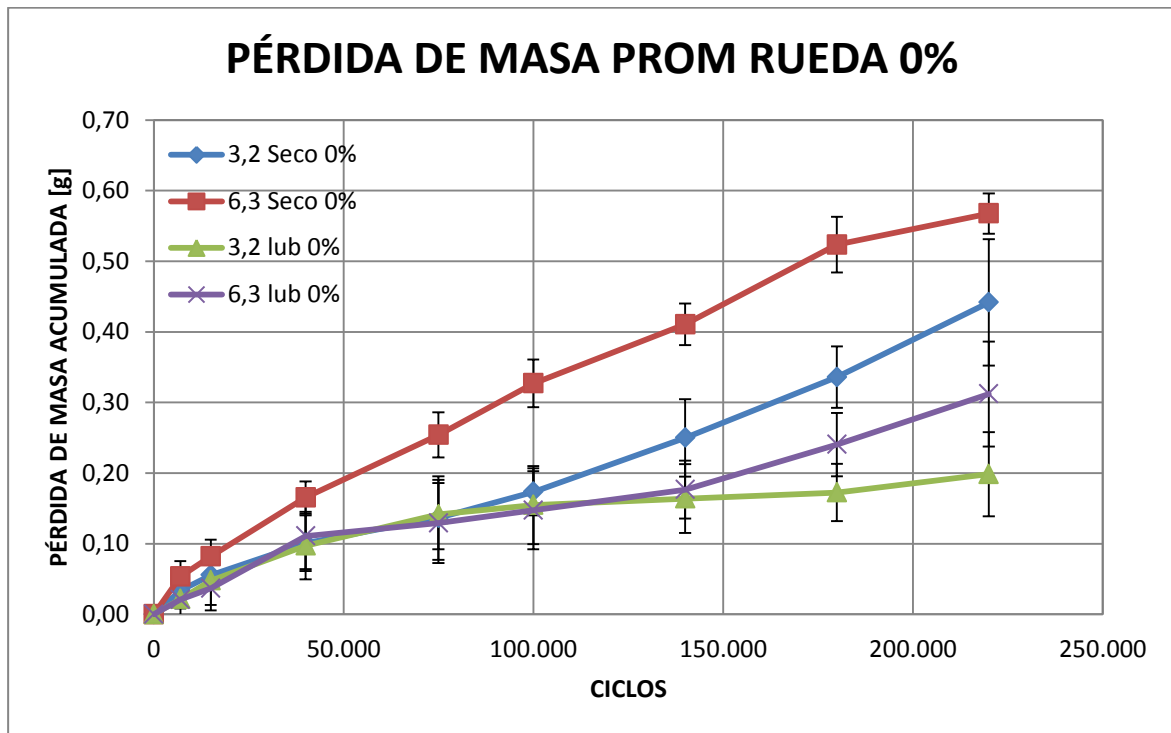
En la Figura 4-12 se observa una predominancia de valores de kurtosis (Rku) mayores a 3, lo cual marca una tendencia hacia una superficie con picos y valles pronunciados. Por otro lado, al evaluar el comportamiento del skewness se evidencian fluctuaciones positivas y negativas pero sin patrones definidos, lo cual puede asociarse a un proceso de remoción de material de la superficie en el que se desprenden residuos de diversas formas y tamaños.

Figura 4-12: Pérdida de masa y variación de parámetros Rsk, Rku con rodadura y deslizamiento a 2%



4.2.2 Probetas de Rueda

En la (Figura 4-13).Se presenta la curva de pérdida de masa acumulada para las probetas que representan la rueda bajo la condición 0% deslizamiento. Para analizar el comportamiento de estas probetas se realizó el mismo procedimiento efectuado para el análisis del riel.

Figura 4-13: Pérdida de masa Promedio Acumulada para rueda 0%.

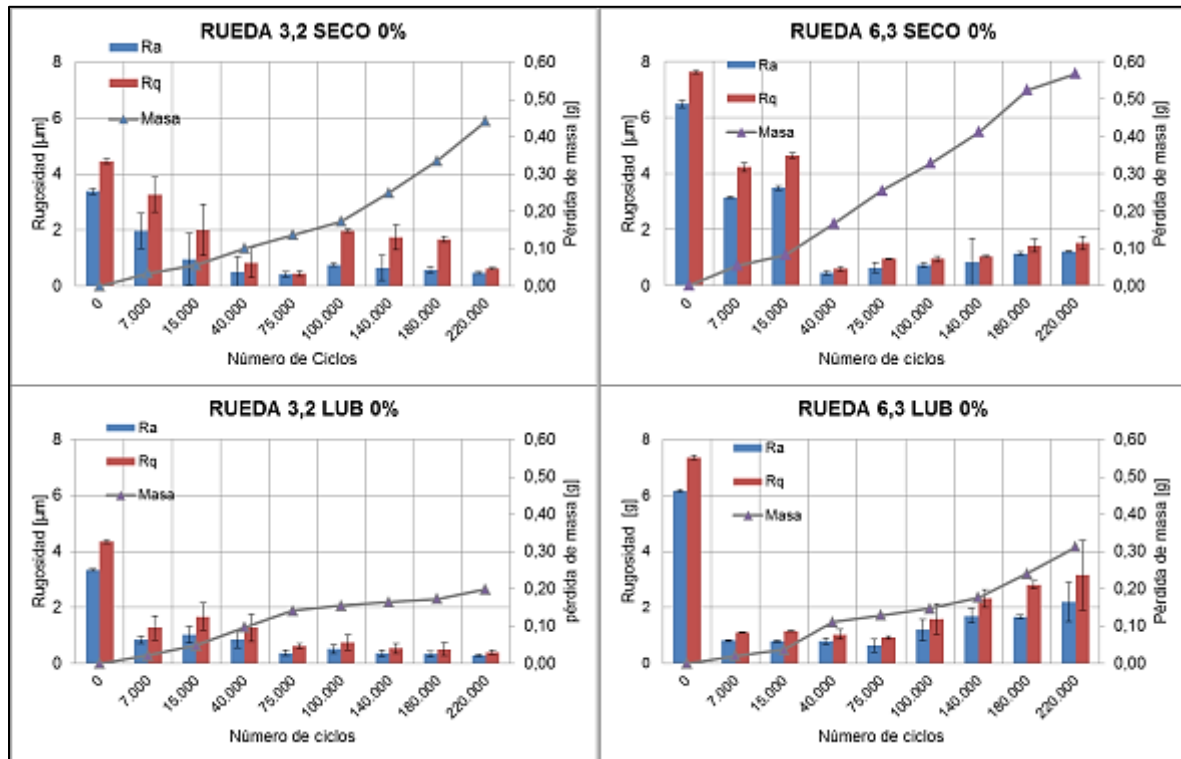
Efecto del acabado superficial: Al analizar una misma condición de contacto, sea ésta una condición seca o lubricada, se presenta una tendencia a perder mayor cantidad de masa utilizando un valor de inicial de Ra 6,3 μm en comparación con 3,2 μm . En este sentido al revisar las curvas de masa acumulada de la Figura 4-13 se tiene que a mayor nivel de Ra inicial se consiguen valores mayores de pérdida de masa al final de toda la prueba. Al revisar los primeros ciclos entre 7.000 y 40.000 ciclos se observan resultados similares excepto en la prueba (6,3 seco 0%) donde desde los primeros 7000 ciclos se evidencia un aumento significativo de pérdida de masa respecto a los otros ensayos.

Efecto de la condición de lubricación: Al evaluar las curvas de pérdida de masa bajo una misma condición de Ra inicial, se tiene que en todos los casos tanto a 0% y a 2% de deslizamiento las pérdidas de masa son mayores en condiciones secas respecto a las lubricadas. Este resultado es similar a lo observado en las probetas de riel.

Evaluación de los parámetros de Rugosidad con la pérdida de masa para rueda 0%.

Al revisar la figura 4-14 puede observarse un comportamiento muy similar en los parámetros Ra y Rq. Para las probetas que fueron mecanizadas con un Ra de 3,2 μm , los valores decaen gradualmente hasta el final del ensayo, mientras que las probetas que fueron mecanizadas con un Ra inicial de 6,3 μm presentan un descenso inicial notorio, seguido por un ligero incremento para ciclajes mayores..

Figura 4-14: Pérdida de masa y variación de parámetros de amplitud Ra, Rq.



Al evaluar el comportamiento del parámetro Rz en la (Figura 4-15), se identifica de manera general un descenso con el número de ciclos, lo cual puede atribuirse a la gradual remoción de material de los picos más grandes de la superficie, sin embargo cerca de los 75.000 ciclos la curva de masa presenta una pendiente positiva más inclinada, con excepción del ensayo rueda 3,2 lubricado, y se generan algunas

fluctuaciones, debido esto tal vez a la transformación del perfil, al perder material, lo cual se analiza con la variación de los parámetros de contacto y de simetría.

Figura 4-15. Pérdida de masa y variación de parámetros de amplitud Rz

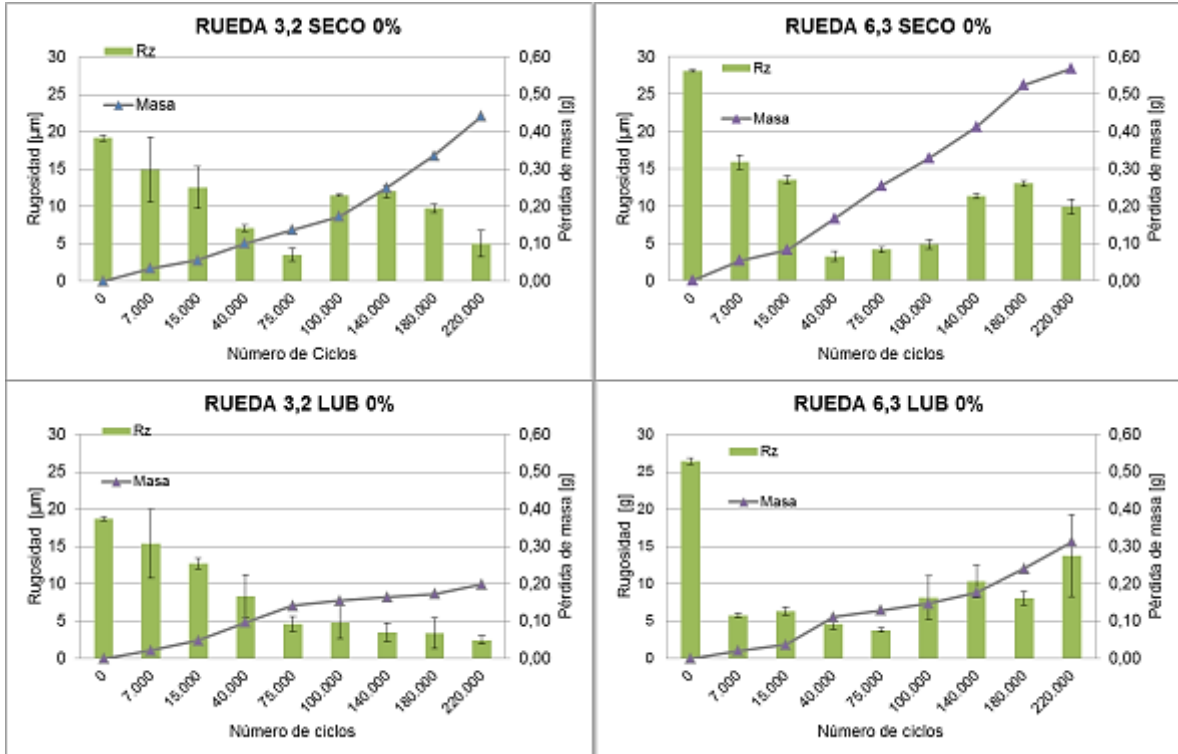
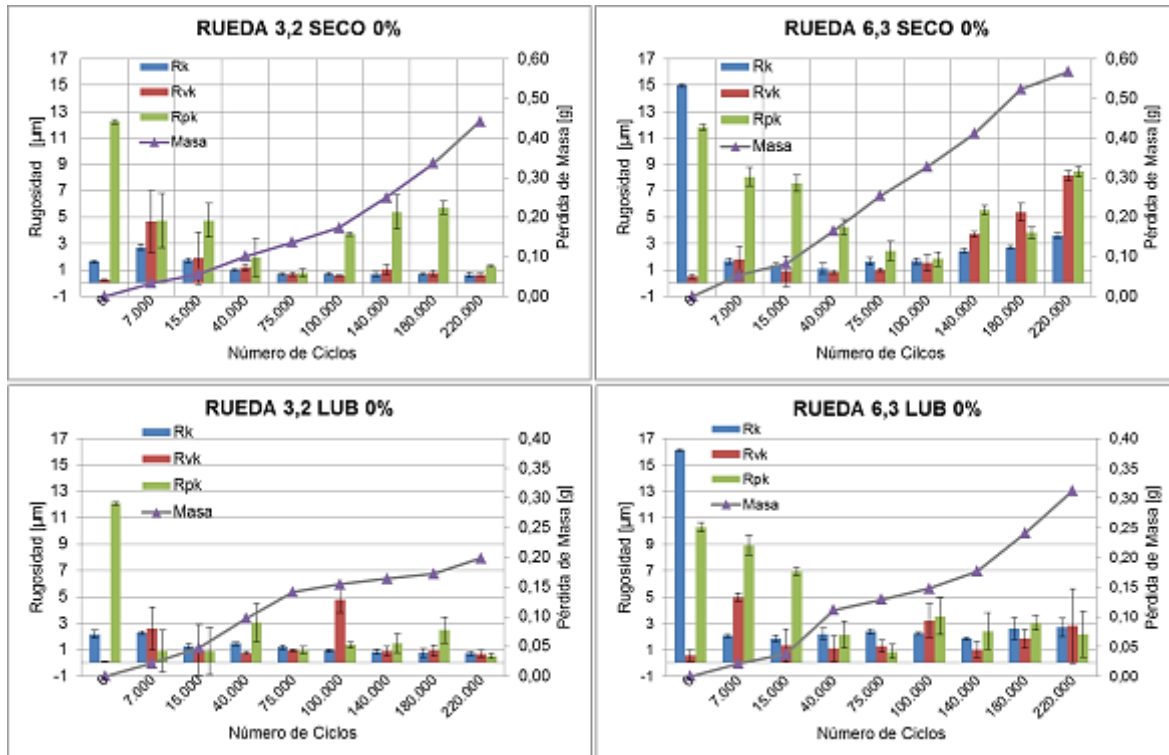


Figura 4-16: Pérdida de masa y variación de parámetros de contacto Rueda 0%

En la (figura 4-16) se puede analizar el parámetro de contacto R_k y la gran diferencia que existe en su valor inicial al emplear una rugosidad de R_a de $3,2 \mu\text{m}$ y de R_a de $6,3 \mu\text{m}$. Puede notarse para este parámetro que sin importar su valor inicial, después de los primeros ciclos se estabiliza en un rango muy similar para todos los ensayos lo cual indica que es influenciado durante el período de acomodación de la prueba pero no tanto durante la etapa estacionaria.

Al evaluar el comportamiento de R_{pk} se observa un descenso ligero y se mantiene casi constante, esto para el caso de las pruebas lubricadas. Sin embargo, para las pruebas secas este parámetro desciende e inicia un aumento alrededor de los 75.000 ciclos, punto en el cual también aumenta el parámetro R_z . Esto explica en parte, la razón por la cual la curva de masa para estas condiciones secas, aumenta la pendiente de manera positiva, lo cual puede explicarse en razón a que la reducción de altura de picos al aumentar su valor permite que mayor cantidad de material pueda eliminarse. Finalmente al evaluar el parámetro R_{vk} , se observan valores iniciales pequeños, con un descenso gradual y algunos comportamientos fluctuantes pero en general se puede establecer una

baja presencia de profundidad de valles por debajo de la rugosidad de núcleo, respecto de la altura de picos Rpk.

Finalmente en la figura 4-17, se presentan los parámetros de skewness y kurtosis, aquí se observa que al inicio todas las superficies tienen un skewness positivo, las probetas que se mecanizaron con valor de Ra 3,2µm presentan un Rsk igual a 2 y las que se mecanizaron con un Ra de 6,3 µm presentan un Rsk de 5 aproximadamente, estos valores indican que las superficies están compuestas por una textura con predominio de picos, siendo más notable para las probetas en las que se empleó una rugosidad inicial mayor. En general el signo del Rsk se alterna con el aumento del número de ciclos, sin embargo en los puntos donde Rsk es Positivo y Rku permanece en un rango superior a 3, la curva de pérdida de masa presenta una inclinación positiva en su pendiente, esta combinación se asocia a una distribución no Gaussiana de picos, caracterizada por una elevada densidad de picos muy altos con respecto al promedio. Este tipo de valores altos de Rku pueden asociarse en muchos fenómenos tribológicos que incluyen superficies deterioradas con gran desprendimiento de material.

Figura 4-17: Pérdida de masa y variación de parámetros de simetría y distribución de picos Rsk.

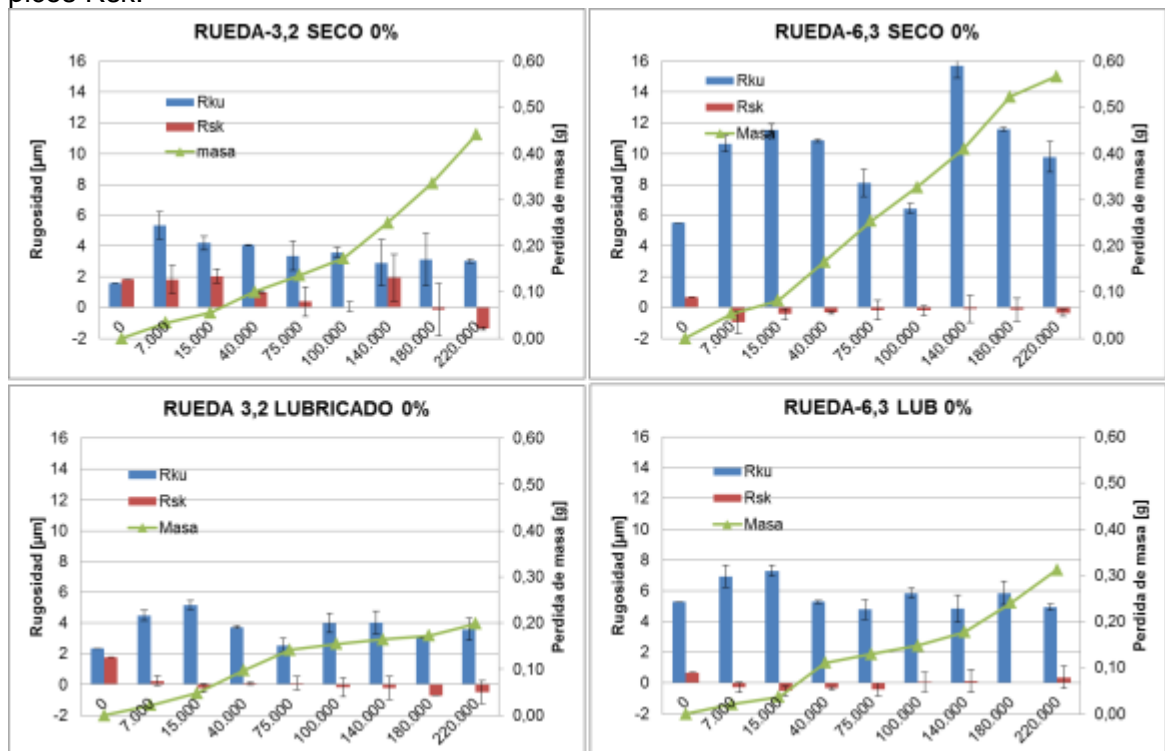
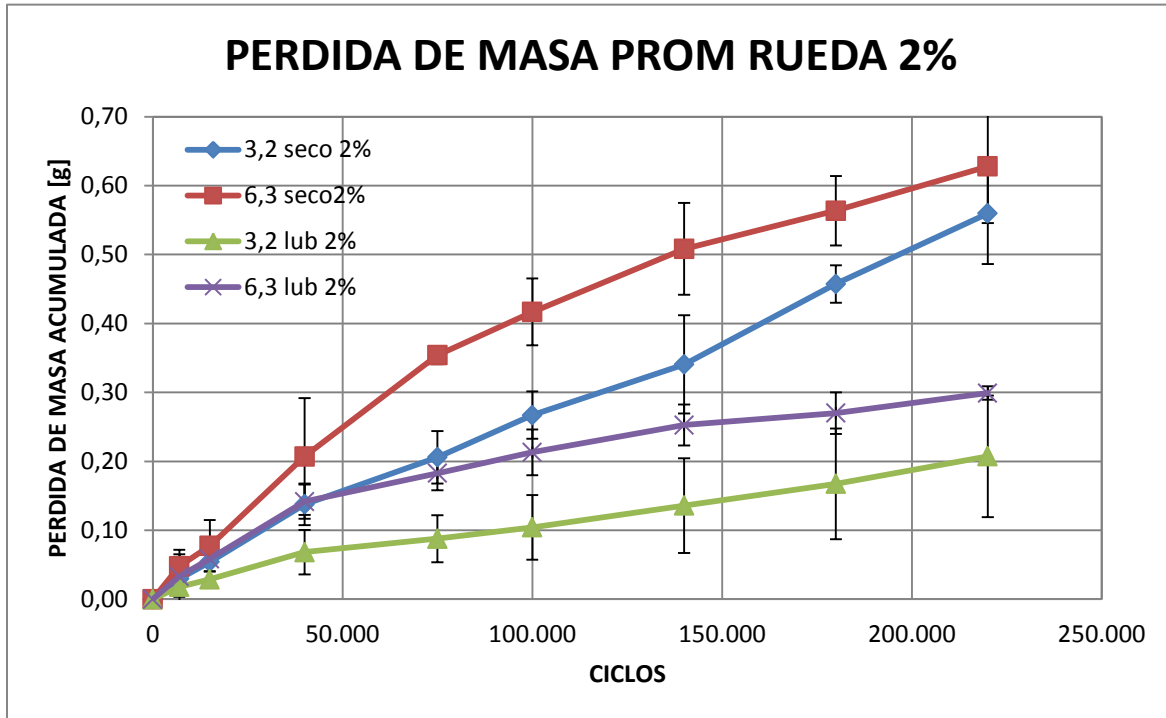


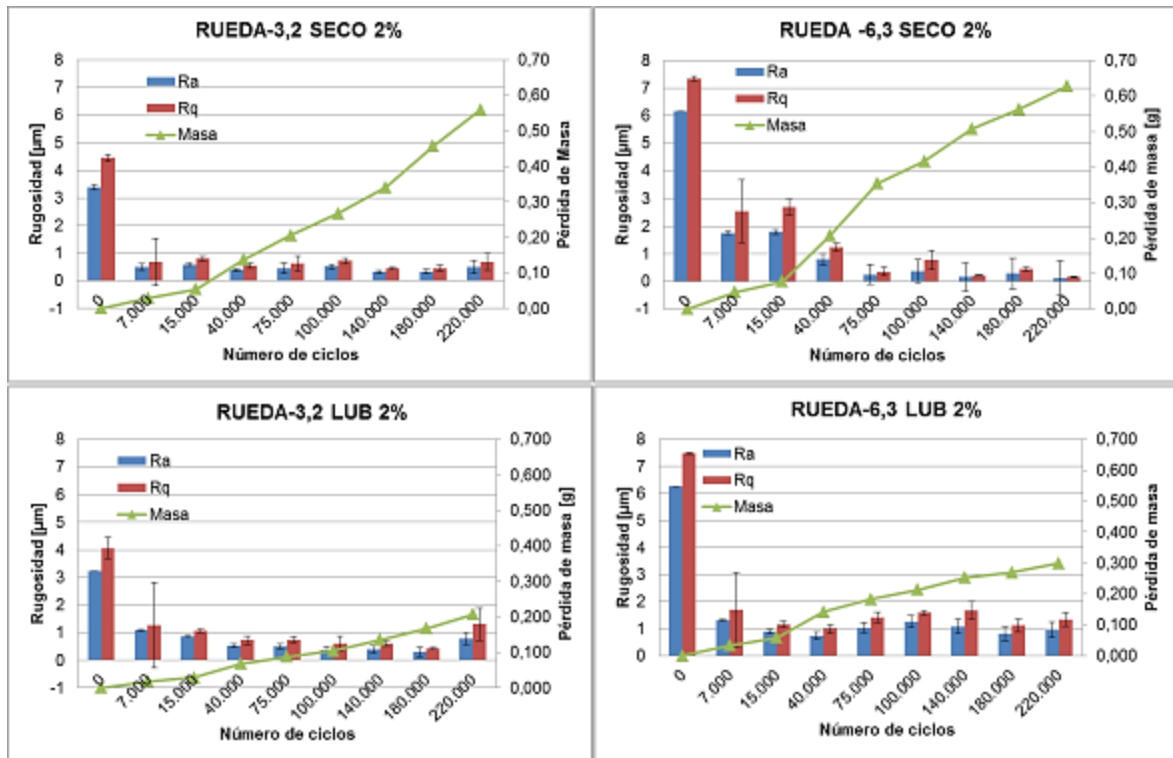
Figura 4-18: Pérdida de masa Promedio Acumulada con rueda rodadura-deslizamiento 2%

Efecto del acabado superficial: En la figura 4-18, también se aprecia una leve tendencia de las superficies a perder una mayor cantidad de masa empleando una condición de acabado superficial inicial de 6,3 μm respecto a 3,2 μm , sin embargo al final del número de ciclos se observa como las curvas de pérdida de masa de los dos acabados superficiales tienden a igualarse.

Pérdida de masa en función de la condición de lubricación: Se presenta una disposición mayor de pérdida de masa en condiciones secas respecto a las lubricadas utilizando el lubricante Ossagol V.

Evaluación de los parámetros de Rugosidad con la pérdida de masa para rueda 2%.

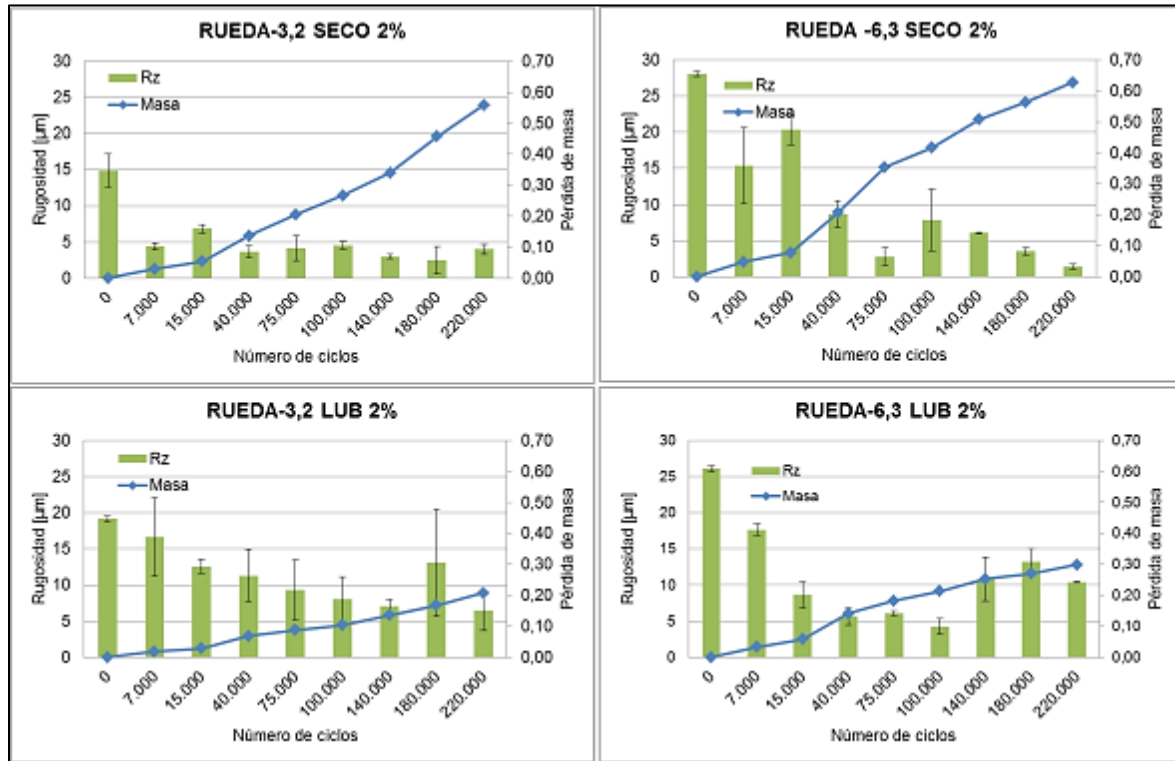
Figura 4-19: Pérdida de masa y variación de parámetros de amplitud Ra, Rq con rodadura-deslizamiento 2%



Considerando los parámetros Ra y Rq, se observa en la (Figura 4-18), como estos descienden rápidamente en los primeros ciclos y se mantienen en un nivel bajo.

En la (Figura 4-20), se observa como el parámetro Rz desciende de manera más escalonada para los valores de probetas con Ra inicial de 3,2μm, respecto a las probetas con Ra inicial de 6,3 μm las cuales exhiben un comportamiento con mayores fluctuaciones. Por otra parte se perciben cambios en la pendiente de la curva de masa con aumentos en el valor de Rz, lo cual se podrá analizar también en los parámetros de contacto.

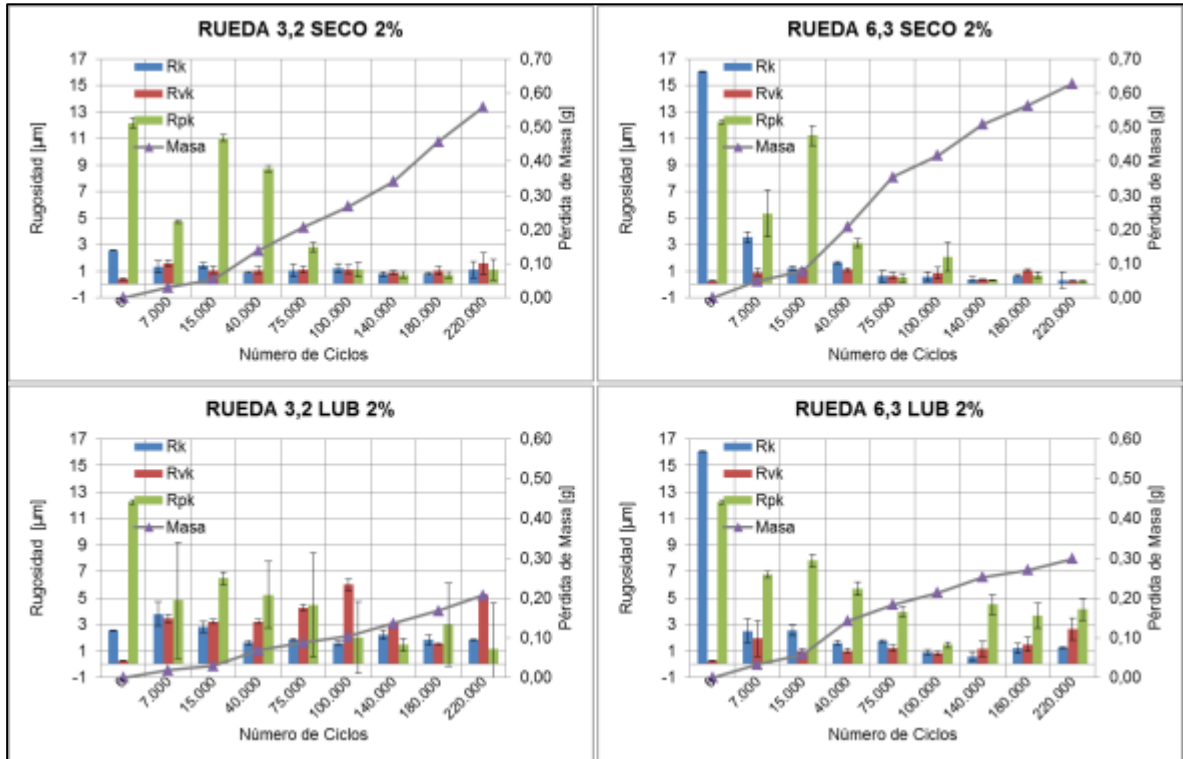
Figura 4-20. Pérdida de masa y variación de parámetros de amplitud Rz con rodadura deslizamiento 2%



En la (Figura 4-21) se puede apreciar como los parámetros R_k y R_{vk} decaen rápidamente en todos los ensayos excepto en el que corresponde al de “Rueda 3,2 Lub 2%”, en la cual R_k disminuye más lentamente y el valor R_{vk} presentan fluctuaciones y ascensos mayores respecto a los otras condiciones de experimentación, lo que favorece entre otras cosas la retención de lubricante en las micro-cavidades que se forman con el aumento de este parámetro. Respecto al comportamiento del parámetro R_{vk} se percibe como bajo condiciones secas desciende más rápidamente a partir de los 15.000 ciclos de medición y se mantiene en un nivel bajo comparando con las condiciones lubricadas.

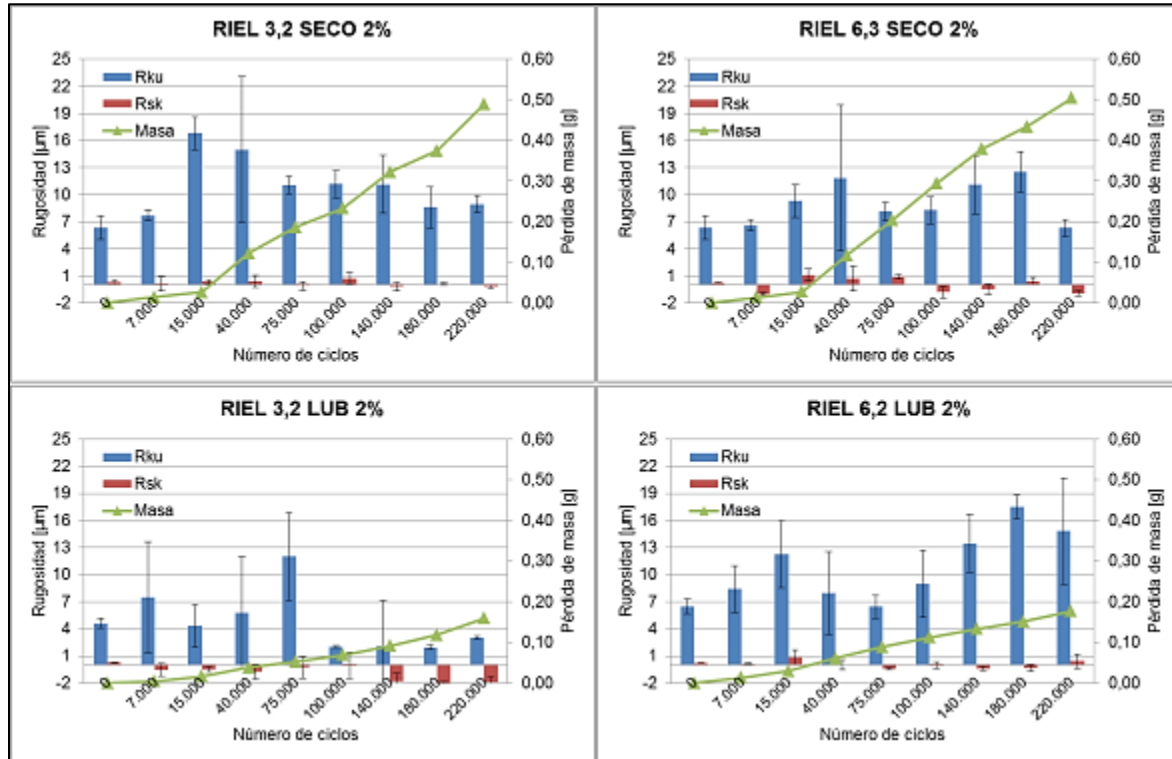
Al evaluar la curva de masa centramos las observaciones nuevamente cerca de los 15.000 y 40.000 ciclos donde para condiciones secas existe una ligera tendencia a aumentar la pendiente de la curva de masa y el parámetro R_{pk} y R_z aumentan su valor.

Figura 4-21. Pérdida de masa y variación de parámetros Rk, Rvk, Rpk con rodadura y deslizamiento a 2



De manera general en todas las configuraciones de (Figura 4-22), se presenta una combinación de skewness positivo y kurtosis $Rku > 3$ para los puntos de medición entre 15.000 y 40.000 ciclos, lo cual indica que en estos puntos la textura se compone picos altos, y al igual que en casos anteriores la curva de masa presenta un cambio más pronunciado en su pendiente en dichos puntos, generando así mayor pérdida de masa. Sin embargo como el Rsk es alternante entre todos los periodos de medición se generan instantes con picos altos y otros instantes con valles profundos lo que favorece para el caso de los regímenes lubricados, retención de lubricante y por consiguiente pérdidas de masa inferiores respecto a las condiciones secas y a los puntos o instantes donde se presenta una textura con gran densidad de picos, que permiten mayor remoción de material y altos esfuerzos por tener áreas de contacto más pequeñas.

Figura 4-22. Pérdida de masa y variación de parámetros Rku, Rsk con rodadura y deslizamiento 2%

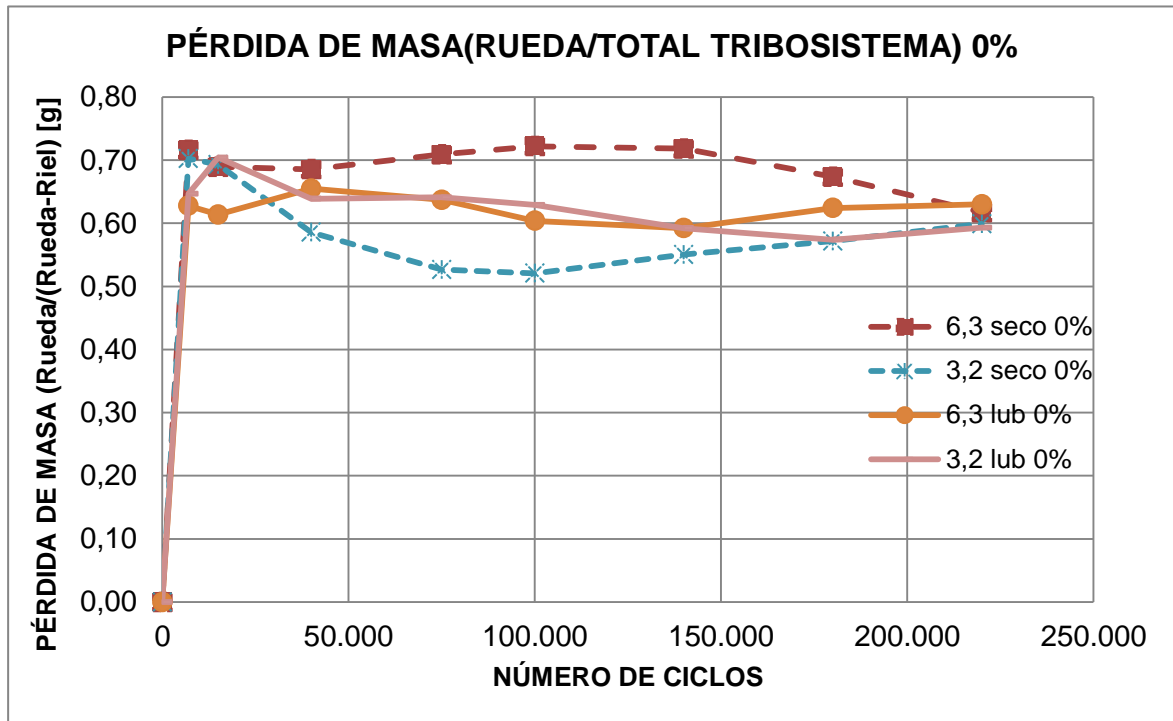


4.2.3 Tribosistema Rueda/Riel

Luego de analizar por separado los resultados de la pérdida de masa de las probetas de rueda y riel se pudo establecer que existe cierta influencia de las diferentes condiciones de experimentación, sin embargo en un tribosistema compuesto por un par rueda-riel, generalmente se busca que uno de los componentes sea el más sacrificado durante el funcionamiento, esto con el propósito de hacer más factible desde el punto de vista técnico y económico su remplazo. Este concepto es fundamental tenerlo presente en los sistemas ferroviarios donde se busca que la vida del riel sea más prolongada respecto a la de la rueda, dado que cambios en el primero llevan a mayores costos y tiempos de mantenimiento, lo cual disminuye la disponibilidad de la vía. Aplicando este criterio de tribosistema se presentan los resultados desde la (Figura 4-23) hasta la (Figura 4-25), correspondientes a las curvas de aporte de pérdida de masa total del tribosistema para rueda y riel tanto a 0% y 2% de deslizamiento.

En la (figura 4-23) se puede apreciar todas las probetas de rueda Alemana bajo una condición de rodadura equivalente a 0%, donde se identifican dos condiciones importantes que presentan a continuación:

Figura 4-23. Relación Pérdidas de masa acumuladas (Ruedas/ Tribosistema) a 0% deslizamiento



Probetas rueda con bajo desempeño: bajo la denominación “6,3seco 0%”, es posible identificar la condición que presentó un bajo desempeño, contribuyendo con una pérdida de masa entre un 60% a un 70% del total del par rueda-riel, esto a partir de los 40.000 ciclos aproximadamente, que es el inicio de una etapa estacionaria. Al analizar este comportamiento de la rueda respecto a la pérdida de masa, resulta desfavorable, pero su desempeño podría ser deseable al analizar el Tribosistema completo, pues en este caso, es la rueda la que aporta la mayor pérdida de masa al Par Rueda-Riel en contacto, lo que permite preservar la vida útil del riel. Es de resaltar que esta probeta fue mecanizada con un Ra inicial equivalente 6,3 µm.

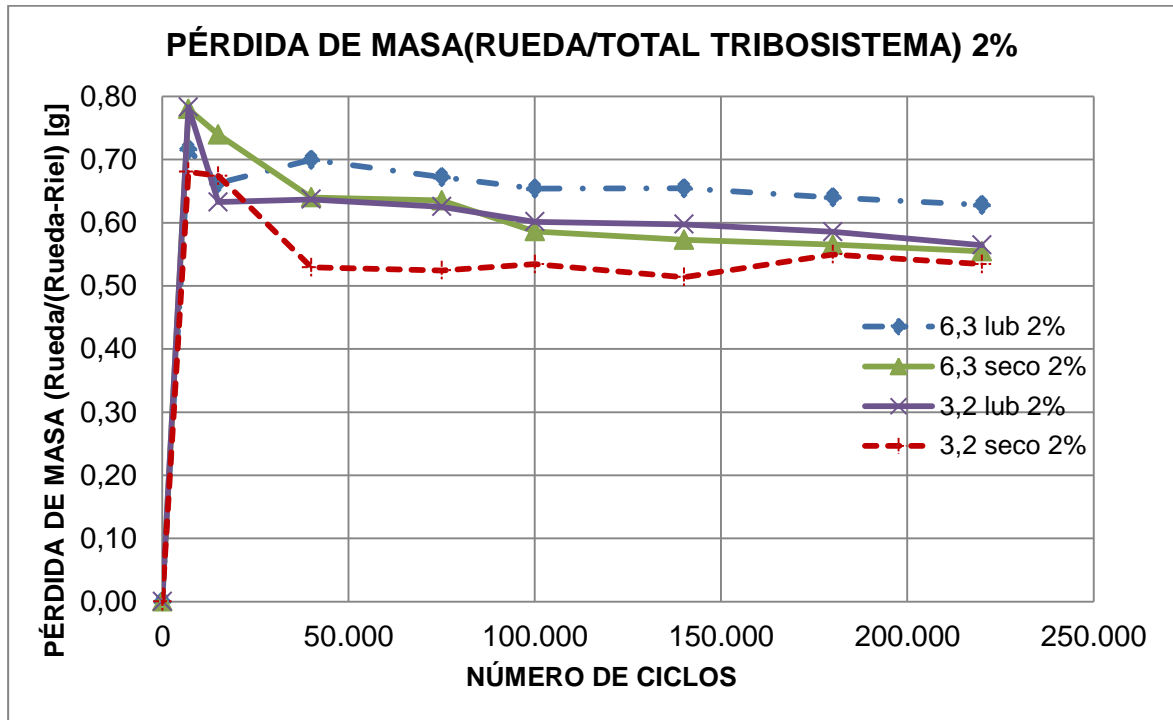
Probetas de rueda con alto desempeño: La condición de rueda denominada “3,2 seco 0%” fue la que mejor desempeño individual presentó, pues bajo estas condiciones dicha probeta contribuye con un aporte de pérdida de masa alrededor del 50% del par, este comportamiento resultó no ser tan deseable al momento de analizar el tribosistema en conjunto, pues aquí la probeta de la rueda aportó una cantidad similar de pérdida de masa respecto al riel, comportamiento que no favorece la conservación de la vida útil de este último. Esta condición corresponde a las probetas que fueron mecanizadas con un Ra inicial de 3,2 μm .

En la (Figura 4-24) es presentada la relación entre el aporte de la pérdida de masa del material de la rueda con la pérdida de masa total del tribosistema para los ensayos con deslizamiento equivalente al 2%. Siguiendo el mismo procedimiento de Análisis que para la condición de rodadura a 0% es posible identificar de nuevo el siguiente comportamiento:

Probetas rueda con alto desempeño: El mejor desempeño lo alcanzó la probeta bajo la condición “3,2 seco 2%” con un valor cercano al 50%, lo que implica un aporte equivalente en pérdida de masa respecto al Riel.

Probetas rueda con bajo desempeño: La condición de rueda que presentó un menor desempeño individual ante la pérdida de masa fue la probeta de rueda bajo la condición “6,3 Lub 2%” que generó un aporte de pérdida de masa cercano al 70%, comportamiento que permite menores aportes al tribosistema del componente Riel.

Figura 4-24. Relación Pérdidas de masa acumuladas (Rueda/ Tribosistema) con deslizamiento de 2%.

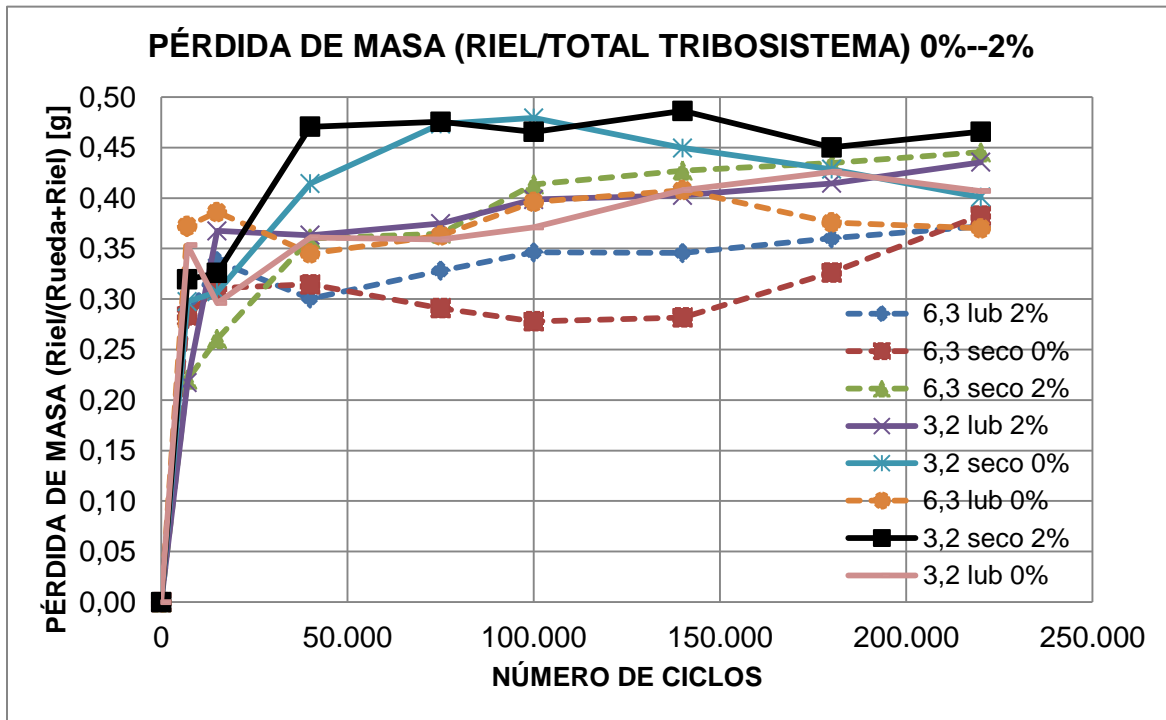


Para evaluar el desempeño ante el aporte de pérdida de masa, de las probetas de riel bajo condiciones de rodadura deslizamiento a 0% y 2% se puede revisar la (Figura 4-25), donde se identifica el desempeño de estas probetas, y las líneas punteadas representan una condición de acabado superficial inicial alto y líneas solidas representan una condición de acabado superficial menor.

Probetas riel con bajo desempeño: La condición de riel con un bajo desempeño se presentó en la probeta que sirvió como contracuerpo para la probeta de rueda con la condición “3,2 seco 2%” que resulto en un aporte de pérdida de masa al tribosistema cercano al 50%.

Probetas riel con alto desempeño: Se presenta una mayor tendencia a mejorar el rendimiento para el riel, que se consigue al emplear como contra cuerpo la probeta de rueda bajo la condición denominada “6,3 seco 0%”(línea Punteada), en el cual la probeta de riel contribuyó con un aporte de pérdida de masa ente 30% y 40%, en este caso las probetas de rueda actuaron como cuerpo de sacrificio.

Figura 4-25. Relación Pérdidas de masa acumuladas (Riel/Tribosistema) con rodadura-deslizamiento 0% y 2%.



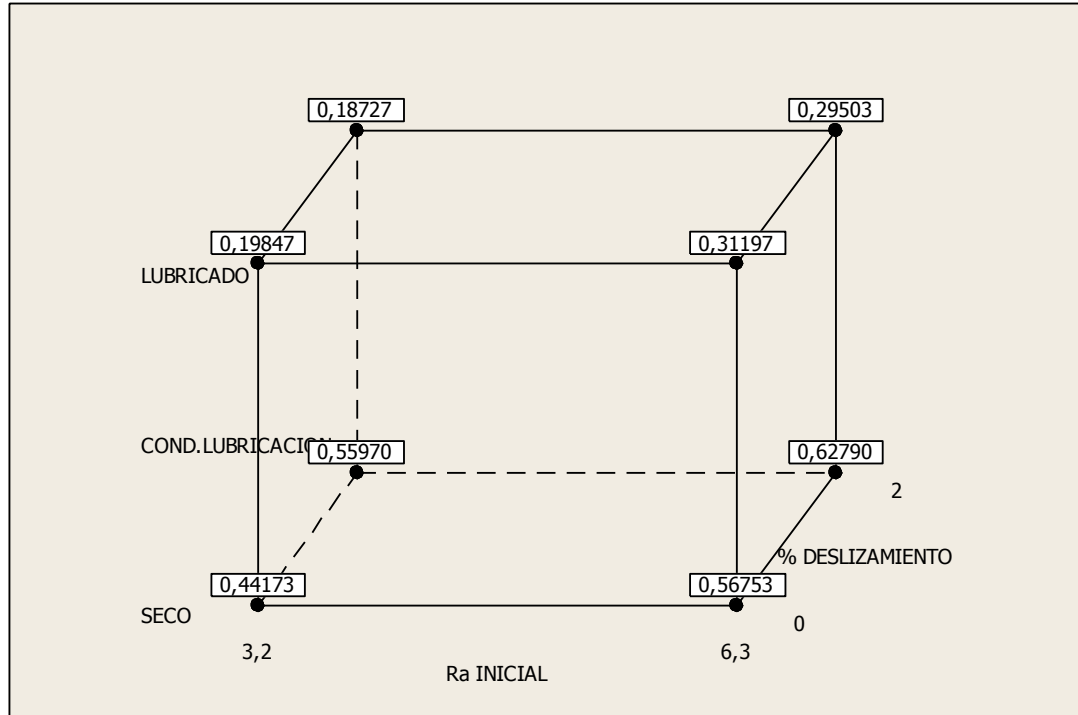
4.3 Análisis Estadístico de Resultados

En la (Figura 4-26) se exponen los resultados obtenidos en los 24 experimentos realizados mediante un gráfico de cubos. Este tipo de representación presenta grandes ventajas cuando la cantidad de experimentos es alta, ya que permite visualizar los efectos de todas las variables sobre la variable de salida pérdida de masa.

En este estudio se realizó un diseño de experimentos que permite evaluar la significancia de los factores que se definieron anteriormente sobre la variable respuesta; para este caso en particular fue evaluado el efecto sobre la pérdida de masa de la rueda, del riel y del tribosistema sistema Rueda+Riel.

Efecto de los factores sobre la variable respuesta Pérdida de masa Rueda:

Figura 4-26. Gráfico de cubos (medias de los datos) para la Rueda



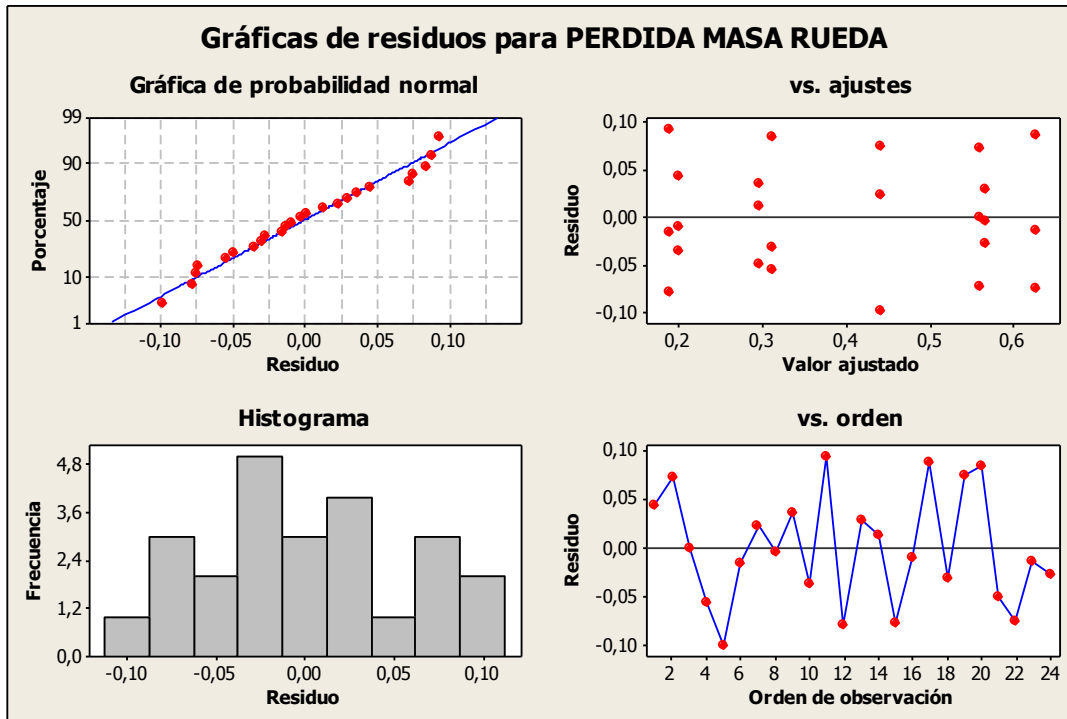
En el momento que es definido un diseño factorial 2^k , se está suponiendo que el modelo de predicción que está detrás del diseño factorial utilizado, describirá de forma “aceptable” el comportamiento del sistema. Para determinar si la descripción es “aceptable” o no, se emplea el concepto de residuos, los cuales son la diferencia entre la predicción que proporciona el modelo del diseño factorial y el punto real proporcionado por nuestro sistema. El modelo debe cumplir que los residuos sigan una distribución normal, sean independientes y tengan igualdad de varianza. Para más detalles sobre el modelo de predicción del diseño factorial referirse a (D. Montgomery, 1997) [35]

Como paso inicial se verifica que el modelo cumpla con los supuestos sobre los residuos: normalidad, independencia e igualdad de varianza. De la (Figura 4-27) de residuos que proporciona Minitab, se observa que no es evidente alguna violación a los supuestos.

La figura 4-27 se divide en cuatro secciones, las dos secciones del lado izquierdo son resultado del análisis de normalidad de los residuos, la gráfica superior izquierda se le

llama la prueba del lápiz gordo, en esta gráfica si los puntos están alineados sobre la recta, indica que no se viola el supuesto de normalidad.

Figura 4-27. Gráfica de residuos variable respuesta pérdida de masa rueda

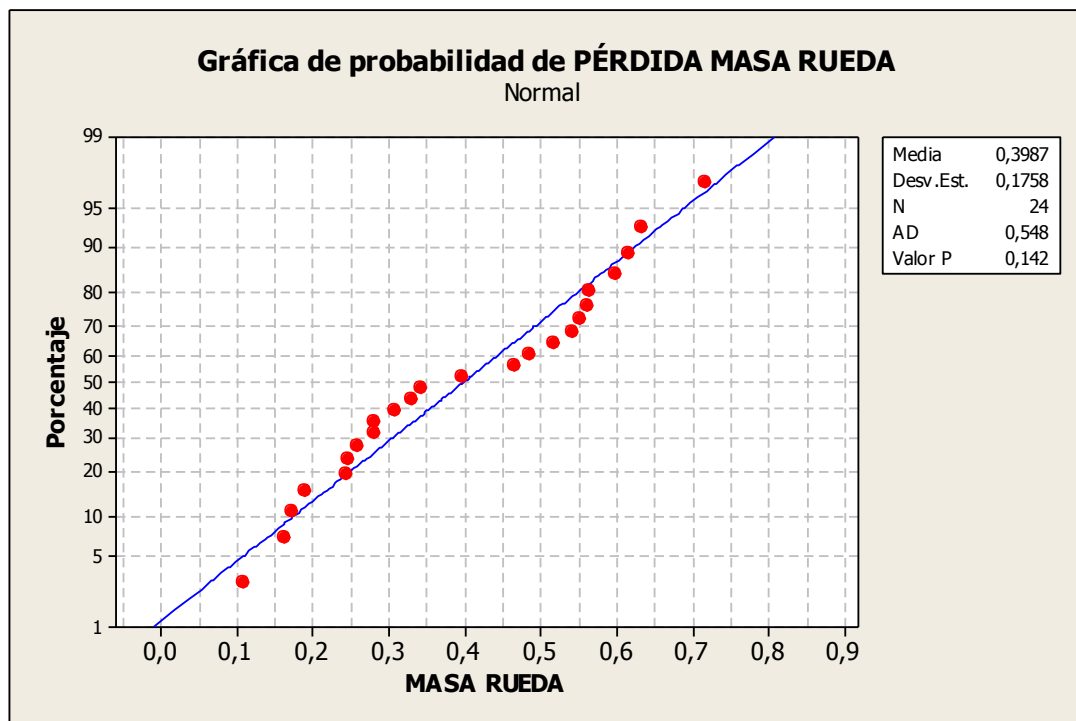


En la parte inferior izquierda de la (figura4-27) se presenta un histograma de los residuos, en el que es posible visualizar una forma semejante a la de una curva de probabilidad normal, para seguir cumpliendo este supuesto, sin embargo se visualiza que esta curva está sesgada un poco a la izquierda pero se puede inferir el supuesto de normalidad.

En la parte superior derecha se presenta una gráfica de dispersión, la cual permite observar el comportamiento de la varianza de los residuos; con esta gráfica se prueba el supuesto de igualdad de varianza, Si el gráfico muestra una nube de puntos alrededor de cero sin evidencia de estructura, tendencia o cambio de la dispersión, entonces no hay sospecha de que se violen ninguno de estos dos supuestos. Por último en la sección inferior derecha está la gráfica de los residuos contra el orden de los datos respecto al tiempo, esta permite comprobar si existe algún patrón reconocible en los residuos, se puede observar que los datos se encuentran distribuidos aleatoriamente y que no siguen ningún patrón definido con lo cual se busca cumplir el supuesto de independencia; es

decir, que los errores son independientes entre sí. La (Figura 4-28) corresponde al estadístico denominado Anderson-Darling, el cual es un reflejo de cuán lejos se encuentran los puntos respecto de la recta. Por tanto, cuanto menor sea el valor de dicho estadístico, tanto mejor será la bondad del ajuste. De acuerdo a la gráfica, se observa que los datos se distribuyen a lo largo de una línea recta, por lo que es posible decir que sigue una distribución normal y también se puede afirmar la normalidad debido a que $p\text{-value} > 0,05$

Figura 4-28. Estadístico Anderson-Darling.

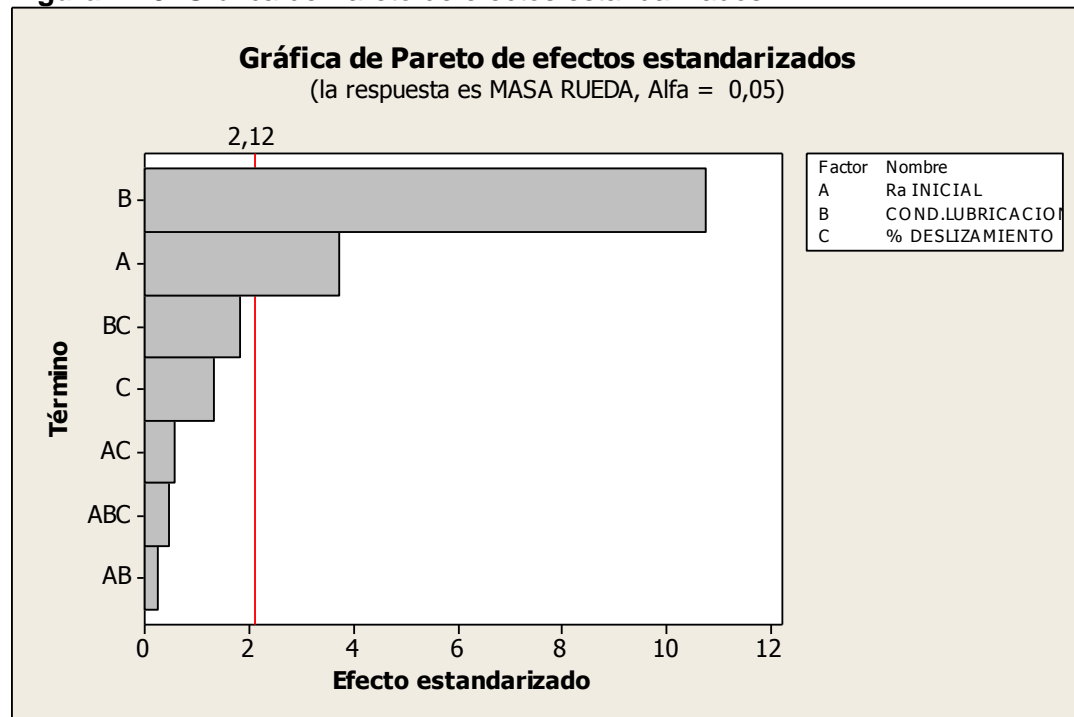


De acuerdo al análisis de varianza ANOVA, en la (Tabla 4-1) se recogen los efectos y coeficientes para el experimento planteado observando que los efectos principales son la “Condición de lubricación” y “Ra Inicial”, todo esto a un nivel $\alpha=0.05$. Al centrar la atención en los datos que son significativos para el experimento, se evidencia que el valor de R^2 tiene un valor de 76,20 de manera que explica en buena parte la variación del experimento.

Tabla 4-1: Efectos y Coeficientes estimados para pérdida masa rueda

Ajuste factorial: MASA RUEDA vs. Ra INICIAL. COND.LUBRICA. % DESLIZAMIE						
Efectos y coeficientes estimados para MASA RUEDA (unidades codificadas)						
Término	Efecto	Coef	Coef. de EE	T	P	
Constante		0,3987	0,01399	28,49	0,000	
Ra INICIAL	0,1038	0,0519	0,01399	3,71	0,002	
COND.LUBRICACION	-0,3010	-0,1505	0,01399	-10,76	0,000	
% DESLIZAMIENTO	0,0376	0,0188	0,01399	1,34	0,198	
Ra INICIAL*COND.LUBRICACION	0,0068	0,0034	0,01399	0,24	0,811	
Ra INICIAL*% DESLIZAMIENTO	-0,0158	-0,0079	0,01399	-0,57	0,579	
COND.LUBRICACION*% DESLIZAMIENTO	-0,0516	-0,0258	0,01399	-1,84	0,084	
Ra INICIAL*COND.LUBRICACION* % DESLIZAMIENTO	0,0130	0,0065	0,01399	0,46	0,649	
S = 0,0685546 PRESS = 0,169190						
R-cuad. = 89,42% R-cuad. (pred.) = 76,20% R-cuad. (ajustado) = 84,79%						

Con el propósito de visualizar los resultados del análisis ANOVA, en la (figura 4-29) y (Figura 4-30), se presentan la gráfica de Pareto y la gráfica normal de efectos estandarizados respectivamente, las cuales muestran que el efecto más significativo es la “condición de lubricación”, seguido de la condición de “Ra Inicial”

Figura 4-29. Gráfica de Pareto de efectos estandarizados

.Figura 4-30. Gráfica normal de efectos estandarizados

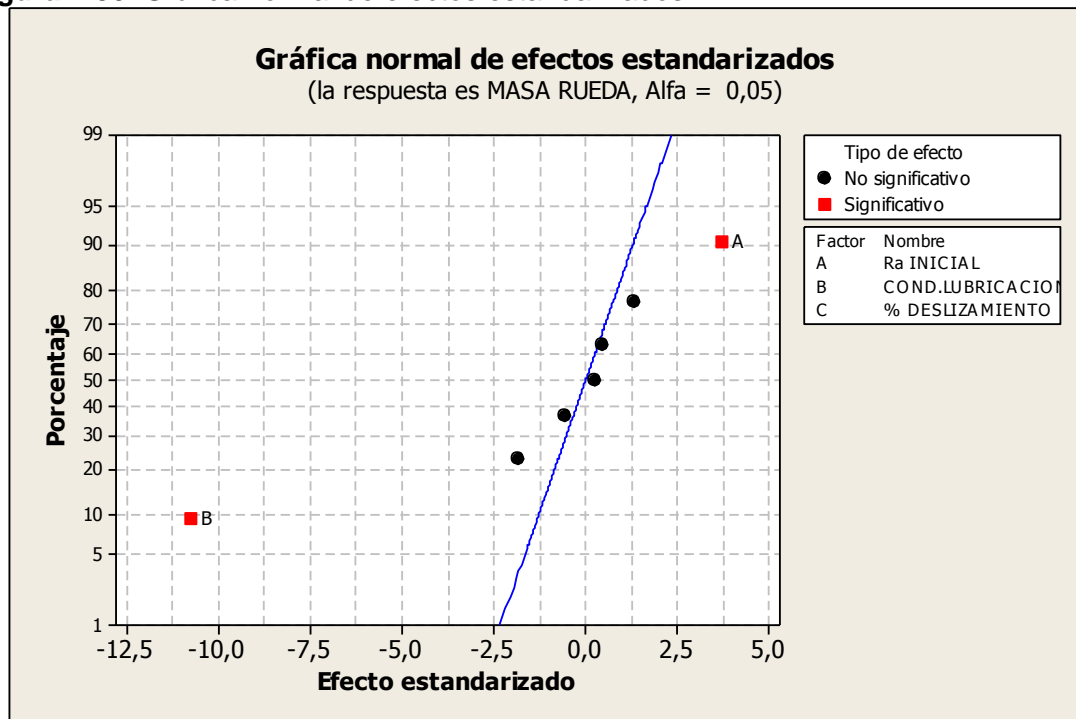
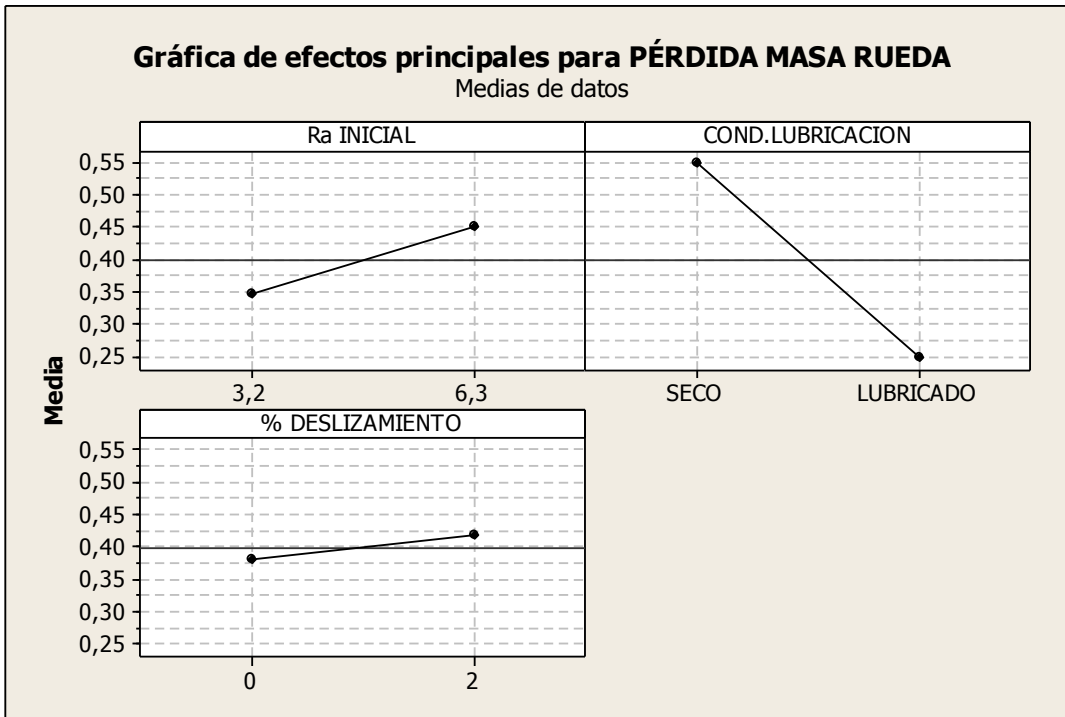


Diagrama de efectos principales

Para poder determinar qué nivel de los factores afecta de manera más significativa la estimación de los parámetros se analizaron las gráficas de interacciones para los distintos factores, las cuales se presentan en el diagrama de la (Figura 4-31). Este diagrama permite concluir acerca de cada uno de los efectos principales y presenta una idea del nivel óptimo en el que deben ser utilizados, pero no toma en cuenta las interacciones entre ellos. Al analizar esta figura se observa que la lubricación es el factor que mayor diferencia presenta entre uno y otro nivel para la variable respuesta y se puede indicar que el uso de lubricante Ossagol V reduce la pérdida de masa en un 55% aproximadamente bajo las condiciones de experimentación empleando el tribómetro disco sobre disco. Por otra parte El factor “Ra Inicial” es en orden de importancia el segundo parámetro significativo, aquí se puede analizar que al emplear un Ra inicial de 3,2 μm se consigue un mejor desempeño ante la pérdida de masa de la probeta de la rueda en aproximadamente un 22% respecto al Ra inicial de 6,3 μm .

Figura 4-31. Gráfica de efectos principales para Pérdida de Masa Rueda

Finalmente aunque el factor “%deslizamiento” resultó no ser significativo, al analizar este factor conforme a los parámetros que define la (figura4-31), se puede inferir que el aumento del esfuerzo cortante en la superficie de contacto durante los ensayos, es decir un incremento en el porcentaje de deslizamiento, llevó a un aumento de la pérdida de masa del 12% aproximadamente.

Efecto de los factores sobre la variable respuesta Pérdida de Masa Riel

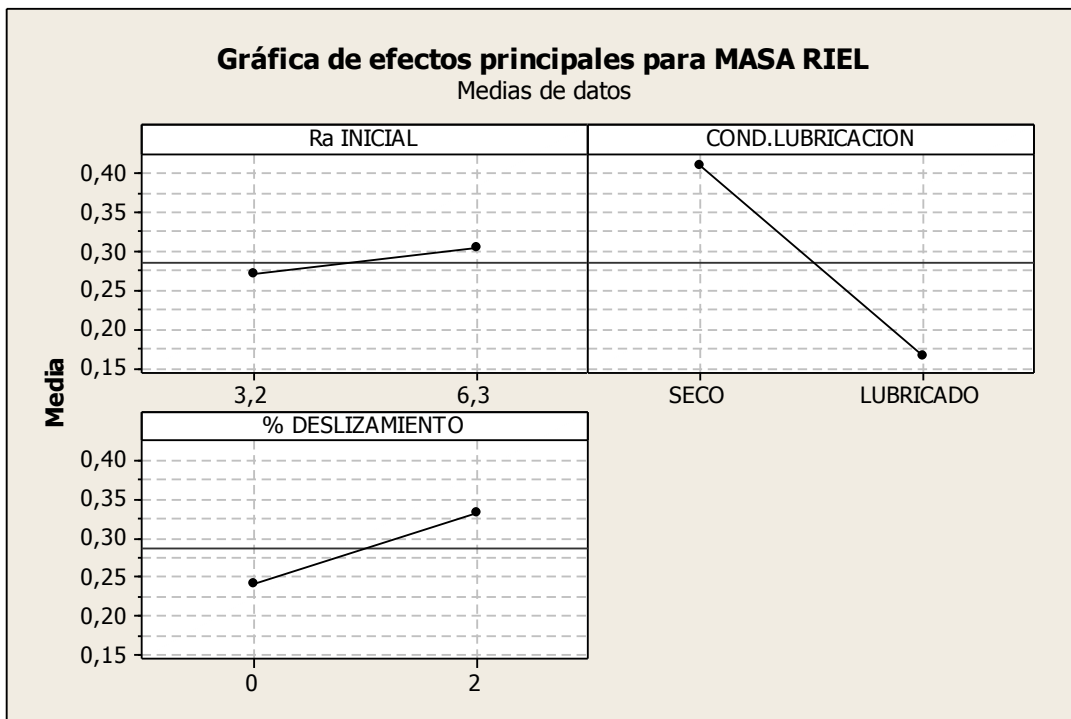
Para estudiar el efecto de los factores sobre la pérdida de masa del Riel se definió la tabla 4-2 Anova y la figura 4-32 correspondiente a la gráfica de efectos principales (todas las otras gráficas se presentan en el Anexo 3). Dicha gráfica se puede analizar de la misma manera como fue analizada la respuesta de la pérdida de masa de la Rueda, encontrándose que la lubricación continúa siendo el factor con mayor influencia en la respuesta de la pérdida de masa, de tal manera que empleando una condición lubricada se obtiene un mejor desempeño equivalente al 55% respecto a una condición seca.

Tabla 4-2: Efectos y Coeficientes estimados para Pérdida de Masa RIEL

Ajuste factorial: RIEL vs. Ra INICIAL. COND.LUBRICACION. % DESLIZAMIENTO						
Efectos y coeficientes estimados para RIEL						
Término	Efecto	Coef	Coef. de EE	T	P	
Constante		0,2865	0,01249	22,94	0,000	
Ra INICIAL	0,0332	0,0166	0,01249	1,33	0,202	
COND.LUBRICACION	-0,2468	-0,1234	0,01249	-9,88	0,000	
% DESLIZAMIENTO	0,0895	0,0448	0,01249	3,58	0,002	
Ra INICIAL*COND.LUBRICACION	-0,0031	-0,0015	0,01249	-0,12	0,904	
Ra INICIAL*% DESLIZAMIENTO	-0,0184	-0,0092	0,01249	-0,74	0,471	
COND.LUBRICACION*% DESLIZAMIENTO	-0,0828	-0,0414	0,01249	-3,32	0,004	
Ra INICIAL*COND.LUBRICACION* % DESLIZAMIENTO	0,0015	0,0007	0,01249	0,06	0,954	

S = 0,0611806	PRESS = 0,134750
R-cuad. = 88,56%	R-cuad. (pred.) = 74,25%
R-cuad. (ajustado) = 83,55%	

Figura 4-32. Gráfica de efectos principales para Pérdida de Masa Riel



Respecto a los otros factores se puede revisar en la tabla 4-2 (Anova) que resultan significativos los siguientes: C ("%deslizamiento") y BC (condición de lubricación*deslizamiento), sin embargo como se puede analizar en las gráficas del

anexo 3 las fuerzas de sus efectos resultan ser muy similares, en este caso al analizar para la condición de “%deslizamiento”, se tiene que al aumentar este factor la pérdida de masa se incrementa en un valor aproximado al 24%, mientras que para el caso de la rueda este factor resultó no ser significativo.

Al evaluar la rugosidad del riel se observa que este parámetro no resultó tener significancia o efecto en la pérdida de masa, lo cual era una respuesta esperada puesto que en el riel se estableció un valor fijo de rugosidad inicial.

Efecto de los factores sobre la variable respuesta Pérdida de Masa Rueda+Riel

Para estudiar el efecto de los factores sobre la pérdida de masa del tribosistema rueda+riel se presenta la tabla 4-3 Anova y la figura 4-33 correspondiente a la gráfica de efectos principales, todas las otras gráficas se presentan en el Anexo 4.

Tabla 4-3: Efectos y Coeficientes estimados para Pérdida de Masa Rueda+Riel

Efectos y coeficientes estimados para MASA RUEDA+ RIEL					
Término	Efecto	Coef	Coef. de EE	T	P
Constante		0,6852	0,02587	26,49	0,000
Ra INICIAL	0,1370	0,0685	0,02587	2,65	0,018
COND.LUBRICACION	-0,5479	-0,2739	0,02587	-10,59	0,000
% DESLIZAMIENTO	0,1271	0,0635	0,02587	2,46	0,026
Ra INICIAL*COND.LUBRICACION	0,0037	0,0019	0,02587	0,07	0,943
Ra INICIAL*% DESLIZAMIENTO	-0,0343	-0,0171	0,02587	-0,66	0,517
COND.LUBRICACION*% DESLIZAMIENTO	-0,1344	-0,0672	0,02587	-2,60	0,019
Ra INICIAL*COND.LUBRICACION*% DESLIZAMIENTO	0,0144	0,0072	0,02587	0,28	0,784

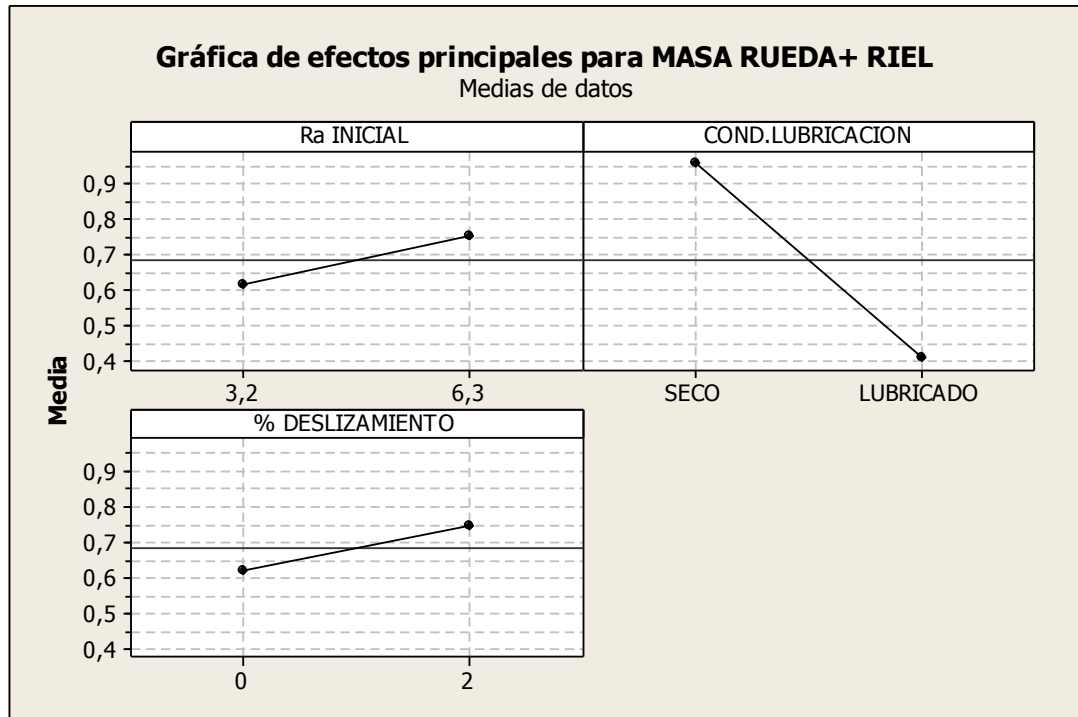
S = 0,126720 PRESS = 0,578089
R-cuad. = 89,22% R-cuad. (pred.) = 75,75% R-cuad. (ajustado) = 84,51%

La gráfica de efectos principales revela que la lubricación continúa siendo el factor con mayor influencia en la respuesta de la pérdida de masa, presentándose una reducción del 57% al emplear una condición lubricada respecto a una no lubricada o seca.

Respecto a los otros factores se puede revisar en la tabla 4-2 (Anova) que resultan significativos los siguientes: A (rugosidad), BC (condición de lubricación*deslizamiento) Y

C (Deslizamiento), sin embargo como se puede revisar en las gráficas del Anexo 3 la fuerza de su efecto es muy similar; en este caso se encuentra que la rugosidad es el segundo factor en orden de significancia, con el que al emplear una condición de Ra inicial de 3,2 μm se consigue una reducción en pérdida de masa del 20% respecto a una condición de Ra inicial de 6,3 μm .

Figura 4-33. Gráfica de efectos principales para pérdida de masa rueda+riel



4.4 Análisis de superficie y material deformado

A continuación se muestran las secciones transversales más representativas de muestras de ruedas y rieles, seleccionadas a partir de las curvas de pérdida de material del tribosistema rueda-riel después de 220.000 ciclos en condiciones de 0% y 2% de deslizamiento.

4.4.1 Condiciones de menor desempeño Tribológico

Probetas de riel: En la (Figura 4-34) y (Figura 4-35) se muestran los cortes transversales de los materiales que representan el riel en los ensayos en los que la

contribución de la pérdida de masa de riel a la pérdida total del sistema rueda+riel fueron máximos. Estos ensayos fueron los denominados “3,2 seco 0%” y “3,2 seco 2%”.

En la (figura 4-34a) se muestran cortes de transversales de la probeta de riel que estuvo en contacto con una rueda con Ra inicial 3.2 μm para un deslizamiento de 0%. En esta imagen se nota la presencia de grietas bajo la superficie con longitudes bajo la superficie a 50 μm , y una grieta grande ya emergiendo a la superficie, con longitudes aproximadas de 100 μm . En la Figura 4-34b se evidencia la presencia de una grieta cercana a la superficie que creció a alrededor de 15 μm de profundidad y con una longitud aproximada de 250 μm a punto de emerger hacia la superficie. Estas imágenes indican que en las muestras de riel con menor desempeño tribológico la causa del desgaste fue el rápido crecimiento de grietas sub-superficiales de gran longitud cercanas a la superficie.

En la (figura 4-35) se presentan los cortes transversales de la otra probeta de riel R260, que se utilizó como contracuerpo con la probeta de la rueda denominada “3,2 seco 2%”. Bajo esta condición el material de riel también resultó con un menor desempeño individual aportando una cantidad equivalente al 50% de la pérdida total de masa respecto del contracuerpo de la probeta de rueda. En este caso el efecto del deslizamiento resulta en un esfuerzo cortante máximo más cercano a la superficie, lo que lleva a la formación de grietas más cortas porque no hay suficiente volumen de material entre el lugar de inicio del defecto y la superficie. Dichas grietas alcanzan profundidades aproximadas de 40 μm y longitudes del orden de 140 μm . En esta figura se aprecia la ondulación que tienen las grietas largas, las cuales están orientadas de acuerdo a las bandas de deformación que presenta el material.

Probetas de rueda: En la Figura 4-36 se presentan los cortes transversales de la probeta que representa la rueda con la denominación “6,3 lub 2%” y que mayor pérdida de masa reportó. Este comportamiento, siempre y cuando la pérdida de masa se mantenga dentro de márgenes razonables económicamente y en términos de seguridad, es deseable al analizar en conjunto el tribosistema Rueda+Riel, ya que cuando la rueda actúa como cuerpo de sacrificio es posible proteger más el riel, que es lo que se busca en un sistema ferroviario.

Figura 4-34. Probetas de riel con bajo desempeño tribológico, condición, “3,2 seco 0%”

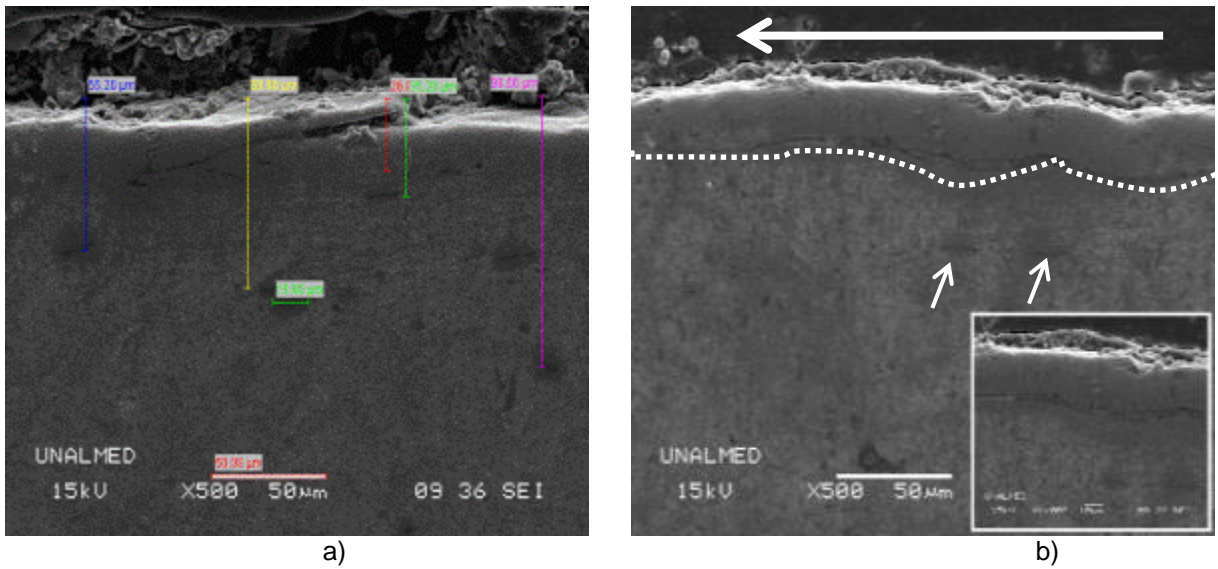
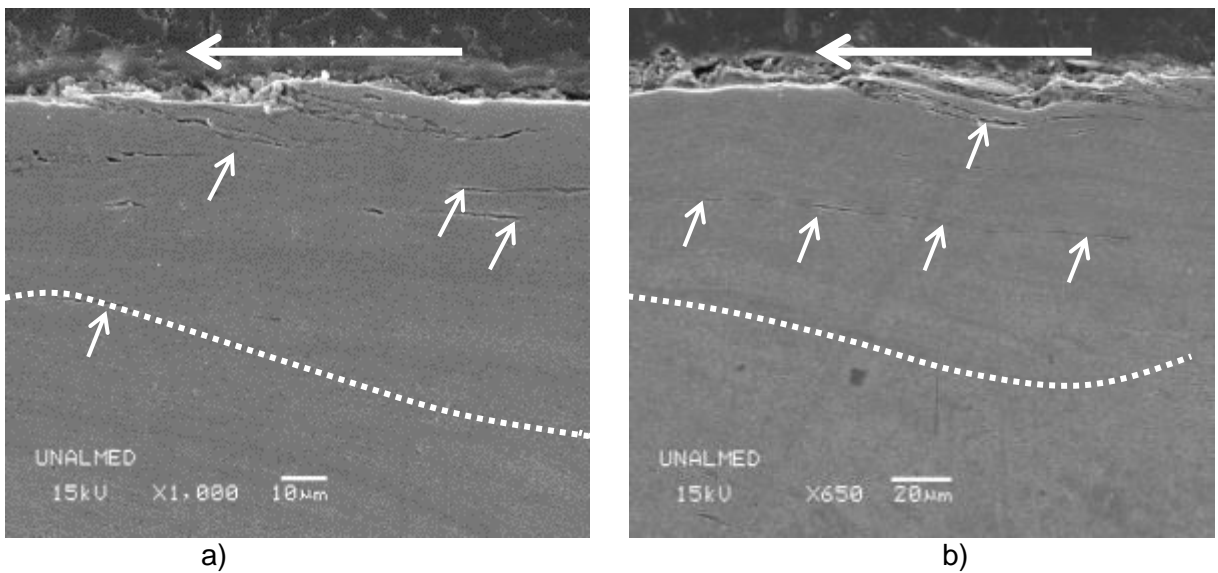
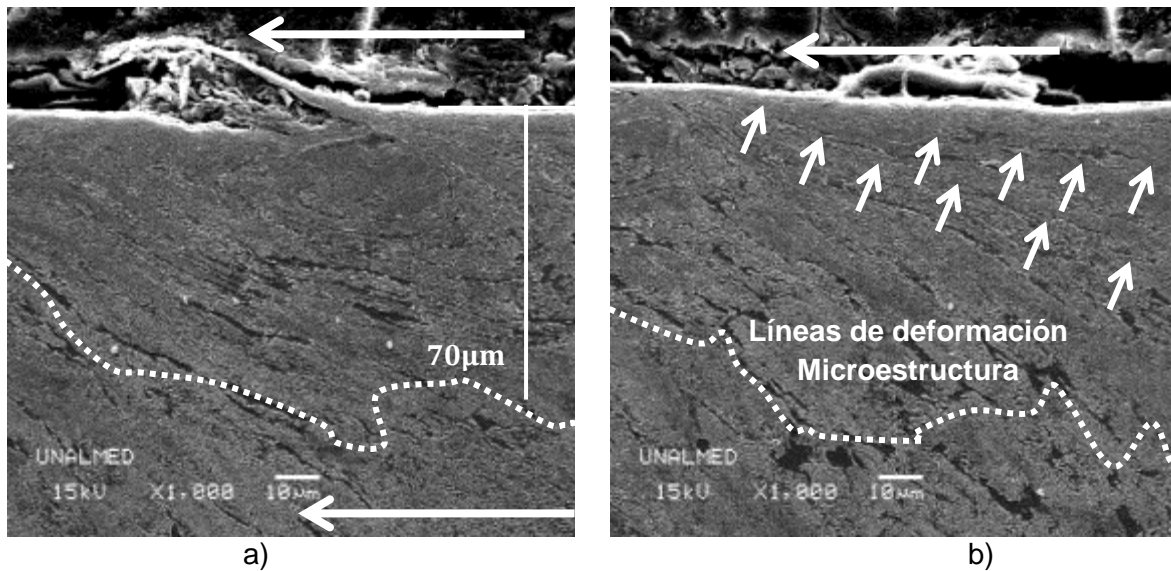


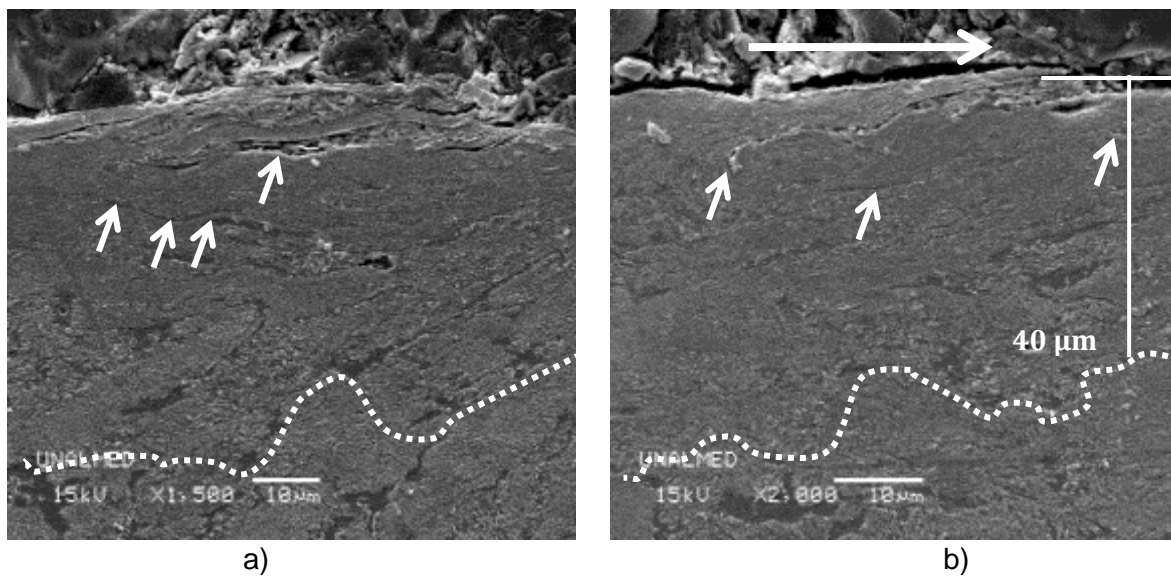
Figura 4-35. Probetas de riel con bajo desempeño tribológico, condición, “3,2 seco 2%”



En la figura 4-36a se puede ver una gran deformación cerca a la superficie con desprendimiento de *debris*. En la figura 4-36b, aunque no se presenta gran desprendimiento de material, sí se puede evidenciar una banda de deformación, la cual alcanza profundidades mayores a 80 µm, con ondulaciones y una notoria deformación de la microestructura desde el interior hasta la superficie.

Figura 4-36. Rueda con menor desempeño bajo la condición de Rueda 6,3 Lub 2%.

La otra condición de rueda que resultó en un bajo desempeño corresponde al ensayo "6,3 seco 0%". En Figura 4-37 se pueden apreciar los cortes transversales y el estado de su microestructura luego de los 220.00 ciclos. Bajo esta condición fue la rueda la que también sirvió como material de sacrificio aportando entre el 60 y 70% de la pérdida total del tribosistema.

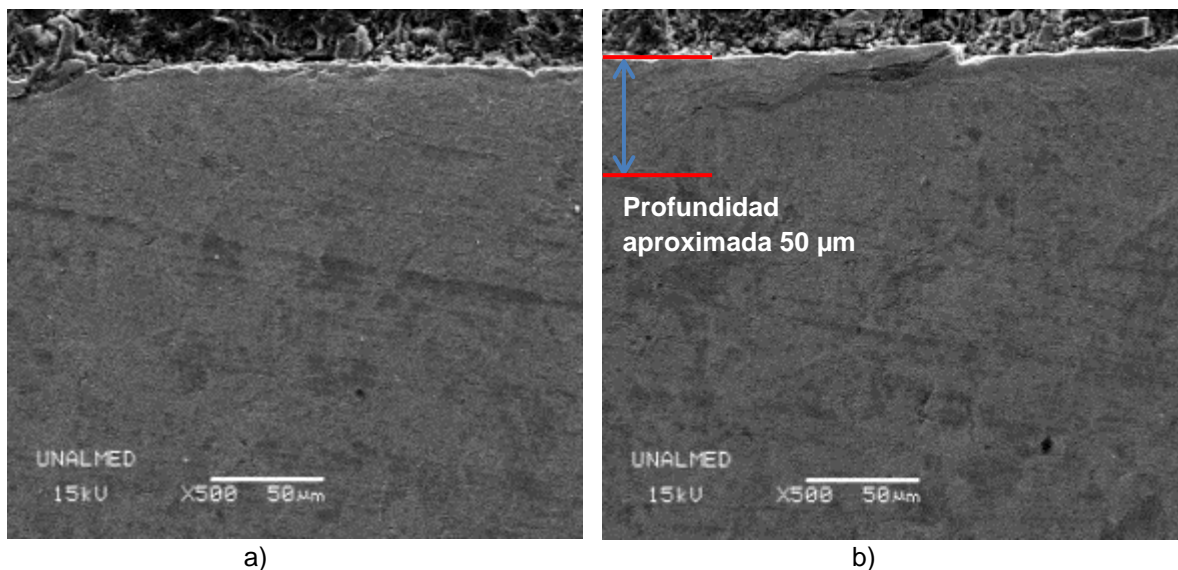
Figura 4-37. Rueda con menor desempeño bajo la condición de rueda 6,3 seco 0%.

En la Figura 4-37 se aprecia como las grietas salen a la superficie generando un desprendimiento de partículas. En la imagen a) de esta figura se pueden ver zonas de deformación con gran densidad de grietas entre 20 y 30 μm bajo la superficie y una longitud aproximada de 60 μm . En ambas imágenes se indican con flechas las grietas sub-superficiales, las cuales presentan ondulaciones en el sentido de las bandas de deformación, dichas grietas son más evidentes y profundas respecto de las probetas de rueda con mejor desempeño, donde se presentan pequeñas grietas sin la presencia tan notoria de bandas deformadas de material.

4.4.2 Condiciones de mejor desempeño tribológico

Probetas de riel: En la figura 4-38 se pueden observar los cortes transversales del riel que presentó mejor desempeño y que sirvió como par para la rueda de menor desempeño, denominada “6,3 seco 0%”. En esta imagen del riel se pueden apreciar bandas de deformación a una distancia de alrededor de 50 μm bajo la superficie. En la Figura 4-36b se muestra una grieta emergiendo a la superficie.

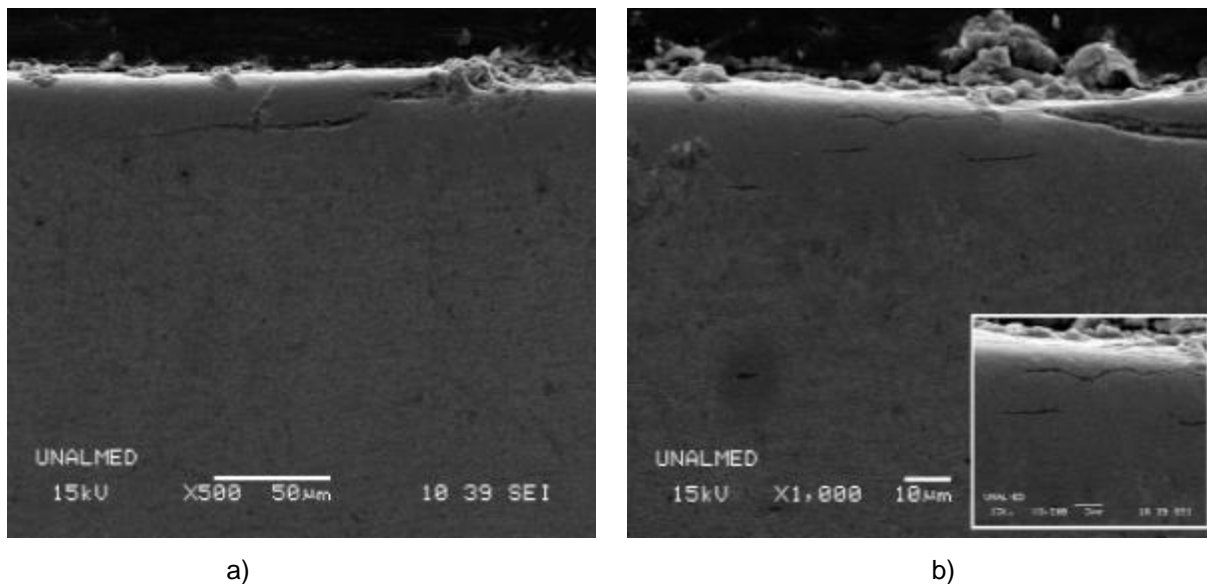
Figura 4-38. Riel Con mejor desempeño, y contra cuerpo de la condición “rueda 6,3 seco 0%”.



Probetas de rueda: En la figura 4-39 se presentan los cortes transversales de la probeta de rueda “3,2 seco 0%” que resultó tener una menor pérdida de masa individual.

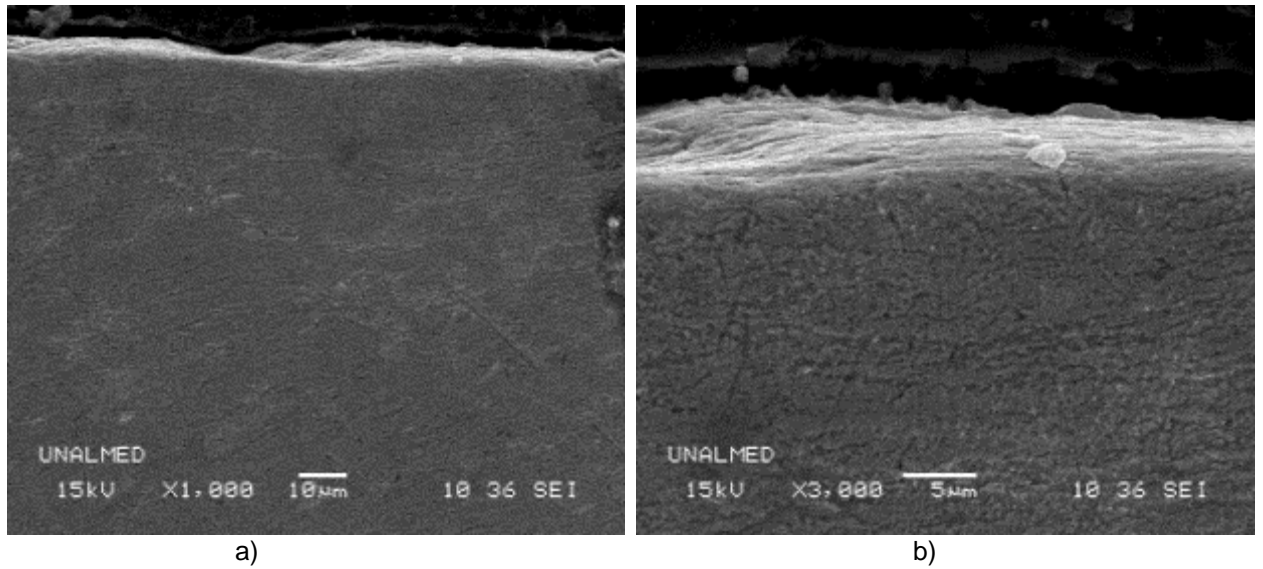
En esta figura es posible visualizar grietas muy cercanas a la superficie a punto de aflorar, incluso algunas de ellas permanecen paralelas a la superficie y no emergen (figura 4-39b). Aquí las grietas se muestran más profundas y con longitudes muy pequeñas, lo que genera que tomen más tiempo y recorran más camino hasta la superficie. En estas imágenes no se evidencia la presencia tan marcada de las bandas de deformación.

Figura 4-39. Rueda con menor pérdida de masa. Condición de Rueda 3,2 seco 0%.



En la Figura 4-40 se observa la sub-superficie de la probeta de rueda para la prueba denominada “3,2 seco 2%” a 1000x y 3000x. En ella no se evidencia claramente la presencia de grietas sub-superficiales, aunque sí se aprecian tenues líneas de bandas deformadas, las cuales no son tan definidas y marcadas respecto a las ruedas que presentaron una mayor pérdida de masa y que favorecieron el desempeño tribológico del tribosistema al preservar el material del riel.

Figura 4-40. Rueda con menor pérdida de masa. Condición de Rueda 3,2 seco 2%.



4.4.3 Evolución de la calidad superficial

Superficies iniciales: En las (figuras 4-41) y (4-42) se presentan las imágenes en SEM, de las texturas iniciales de las probetas, en las cuales se puede observar la superficie del riel con un Ra aproximado de $1,5 \mu\text{m}$ y las superficies de una rueda alemana con un Ra inicial de $6,3 \mu\text{m}$ y otra con un Ra inicial de $3,2 \mu\text{m}$.

Figura 4-41. Superficie de riel reperfilada con piedra grano 16

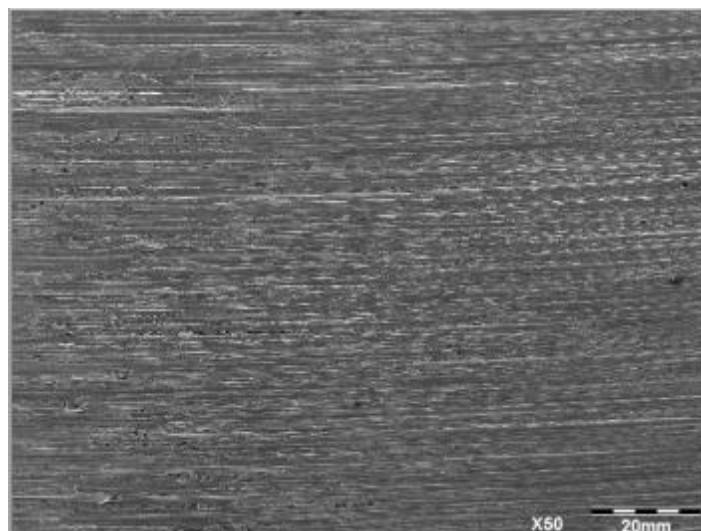
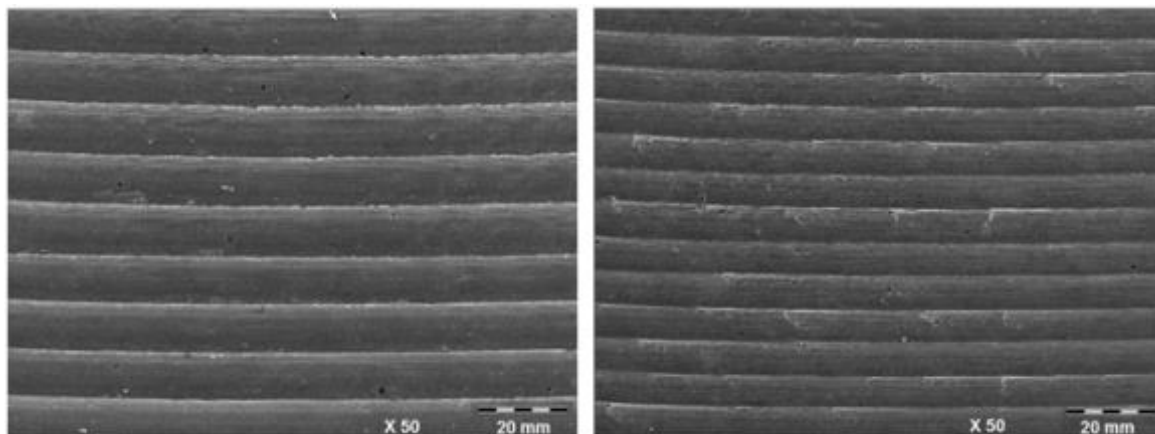


Figura 4-42. Superficie de Ruedas Mecanizadas con [$3,2 \mu\text{m}$ y $6,3 \mu\text{m}$].

a). Rueda Ra Inicial 6,3 μm b). Rueda Ra inicial 3,2 μm

Mediante la inspección de las superficies iniciales comparadas con las finales luego de los 220.000 ciclos es posible evaluar el grado de afectación e identificar los principales mecanismos de falla presentes. A continuación se presentan imágenes de un mismo ensayo tribológico donde es posible identificar la superficie final de una rueda respecto a la superficie final de un riel.

Superficies de rueda y riel Ensayo “6,3 seco 0%”.

Superficie de la rueda: En la Figura 4-43 se muestra la superficie desgastada de las probetas de rueda que resultaron en un bajo desempeño e iniciaron con una calidad superficial inicial de Ra alto con valor de 6,3 μm . Esta imagen corresponde al ensayo denominado “6,3 seco 0%” que fue evaluado anteriormente en su microestructura deformada. La Figura 4-43a presenta una imagen panorámica de la superficie de la rueda y el grado de afectación de la misma, en la otra imagen de la Figura 4-43b se aprecia con más detalle la superficie afectada donde las flechas indican las marcas de fatiga superficial (*ratchetting*).

Superficie del riel: En la figura 4-44 se observa una imagen general del riel en contacto con la probeta de rueda denominada “6,3 seco 0%”, en donde es posible apreciar una superficie menos afectada, pero con zonas localizadas de alto deterioro tal como la que se presenta en la figura 4-44b, en la cual las flechas indican el contorno de una capa de material que está por desprenderse. Esta superficie no presenta en general un daño tan notorio al ser comparada con lo que se observa en la rueda, pero sí exhibe zonas de

aplastamiento de material y gran densidad de rasguños debido a la abrasión, generados por partículas que se desprenden de las superficies en contacto.

Figura 4-43. Superficie final Rueda menor desempeño: ensayo “6,3 seco 0%”

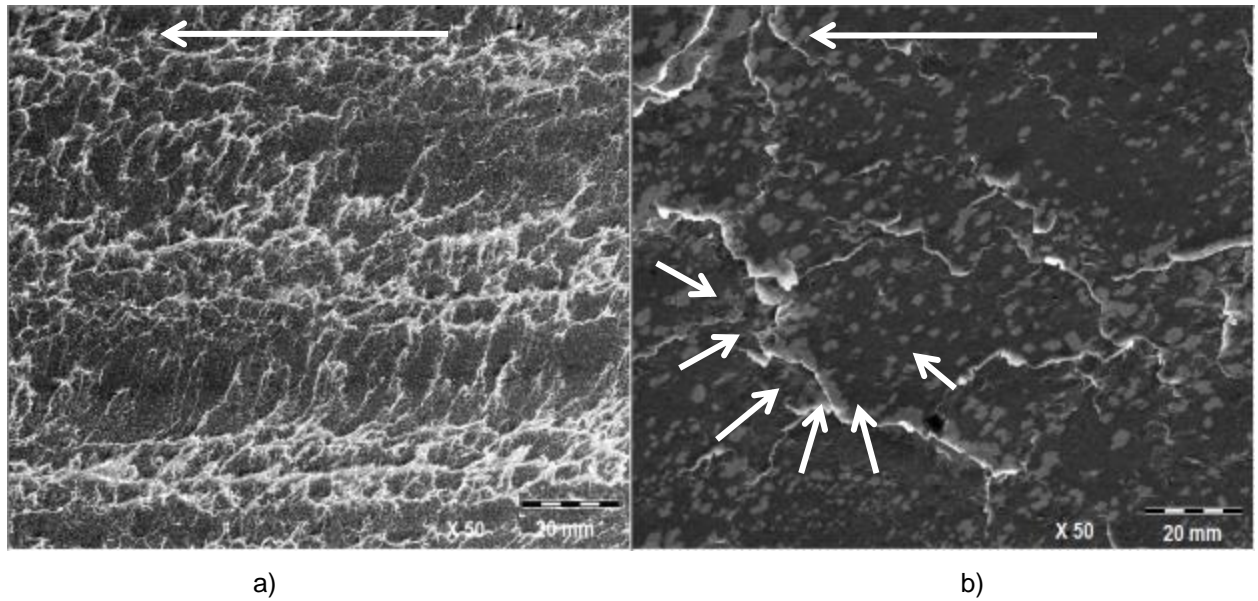
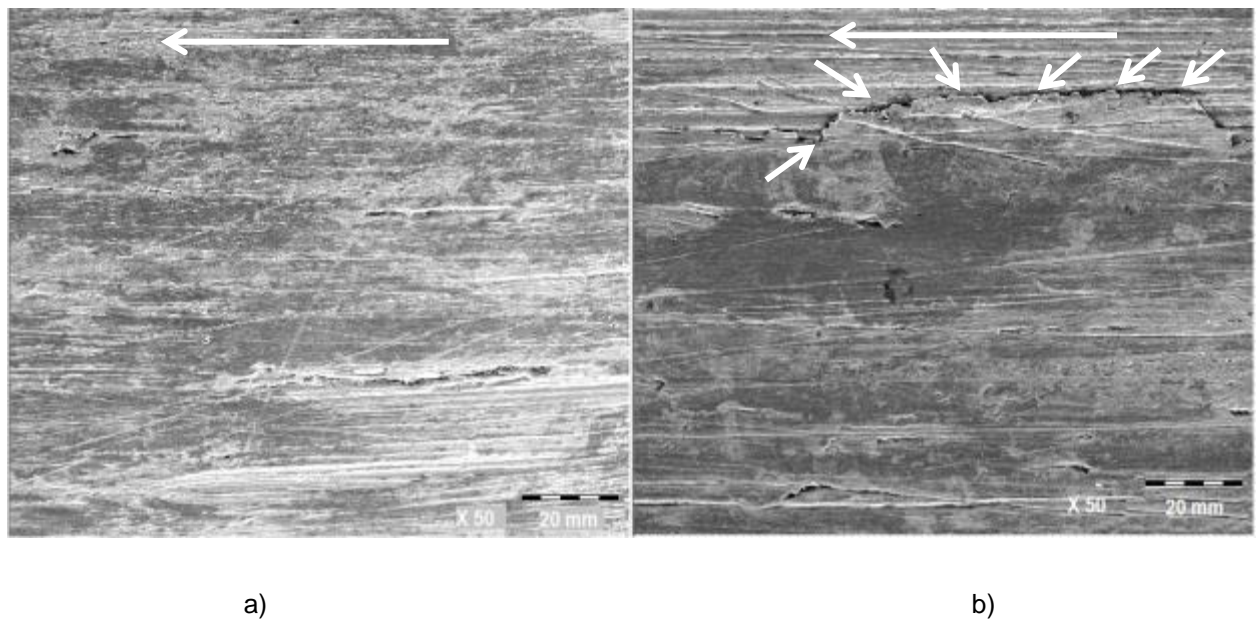


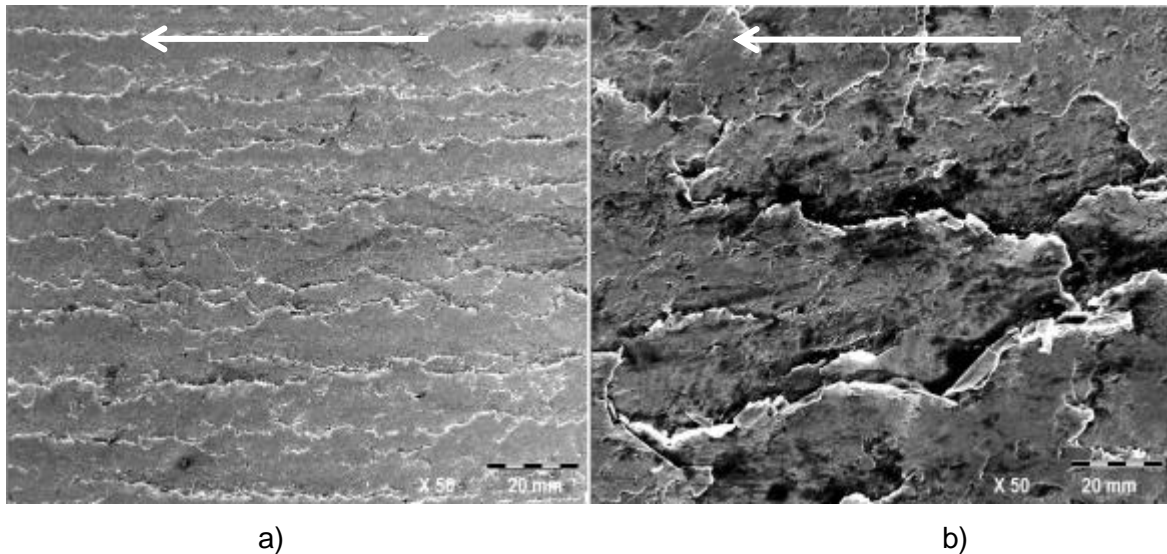
Figura 4-44. Superficie desgastada de riel después de 220.000 ciclos Ensayo “6,3 seco 0%”



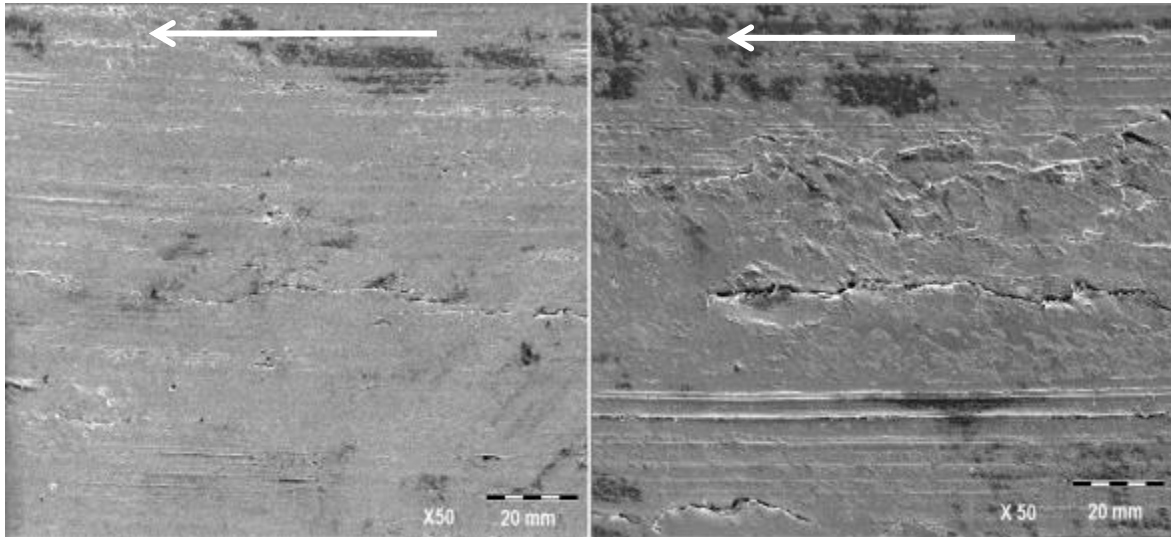
Superficies desgastadas rueda y riel ensayo “6,3 lub 2%.”

Superficie de la rueda: En la Figura 4-45 se presentan las superficies desgastadas para la condición denominada "6,3Lub 2%". Se aprecia que las probetas tuvieron un bajo desempeño, aportando mayor cantidad de pérdida de masa al tribosistema rueda/riel. En estas imágenes se puede apreciar que su superficie fue la más afectada respecto al riel con el que se realizó la prueba (ver figura 4-46), pues se presentan marcas de fatiga en toda la superficie (ver figura 4-45a). Es de notar que en la figura 4-45b correspondiente a la condición de la rueda con un Ra alto y deslizamiento de 2%, son evidentes los contornos de deformación plástica debidos a *ratchetting*.

Figura 4-45. Superficie desgastada de rueda después de 220.000 ciclos Ensayo "6,3 lub 2%".



Superficie del riel: En la Figura 4-46a es posible observar una panorámica de la textura final de la superficie del riel, la cual no se encuentra tan deteriorada al ser comparada con la superficie de la rueda, sin embargo se observan zonas con evidencias de fatiga. En la figura 4-46b se muestra un aplastamiento de la superficie sin desprendimiento de material, donde el contorno se encuentra bien definido y permanece adherido a la superficie. En esta misma imagen también se pueden visualizar marcas notorias de abrasión y rasguños en la superficie de contacto.

Figura 4-46. Superficie desgastada de riel después de 220.000 ciclos Ensayo “6,3 lub 2%

a)

b)

En la (figura 4-47) y (figura 4-483) se presentan los barridos de micro dureza realizados en las probetas de Riel y de Rueda seleccionadas por ser las de mejor y peor desempeño respecto al aporte de pérdida de masa en el tribosistema Rueda+Riel. Se muestran las curvas para 2 muestras que llevaron a una baja pérdida de masa del tribosistema, y para otras 2 que hicieron parte de pares que mostraron un deficiente desempeño tribológico.

En general se observa que la dureza máxima alcanzada en la superficie y la profundidad de endurecimiento son del mismo orden para todas las muestras de riel, independientemente del desempeño tribológico del par rueda-riel. Dentro de este rango de similitud se destacaron las muestras del ensayo riel con 6.3 seco 0%, los valores de dureza fueron los máximos medidos en todas las pruebas, del orden de 560 HV(ver figura 4-47). La dureza inicial del material base se consigue entre 0,6 y 0,8 para el riel de mejor desempeño(líneas punteadas).

Figura 4-47 Variación de microdureza en probetas riel con alto y bajo desempeño, en función de la distancia a la superficie.

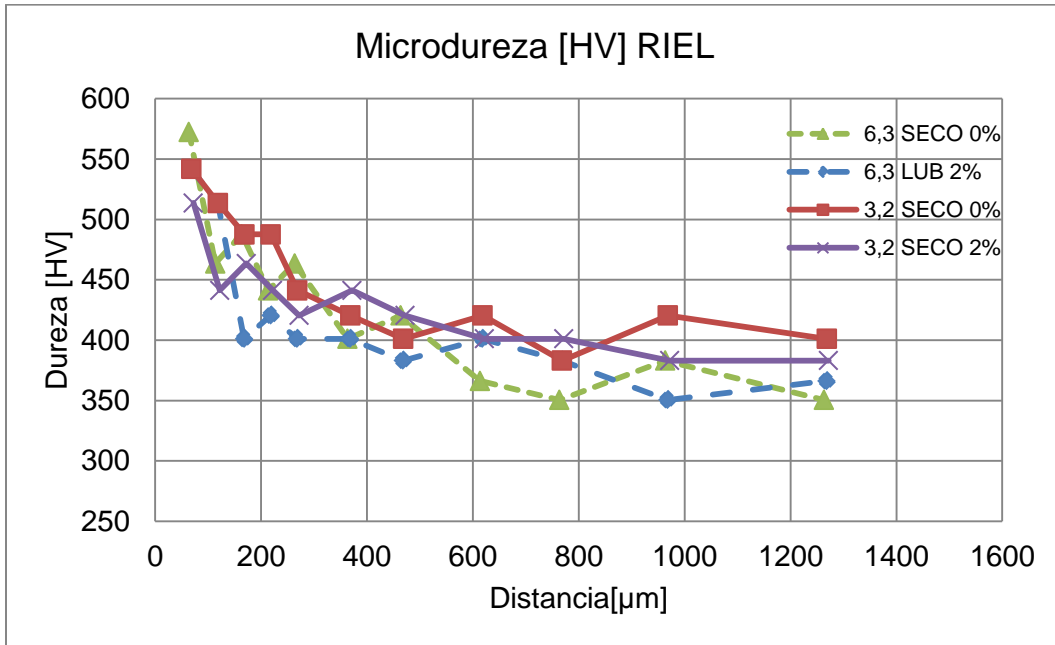
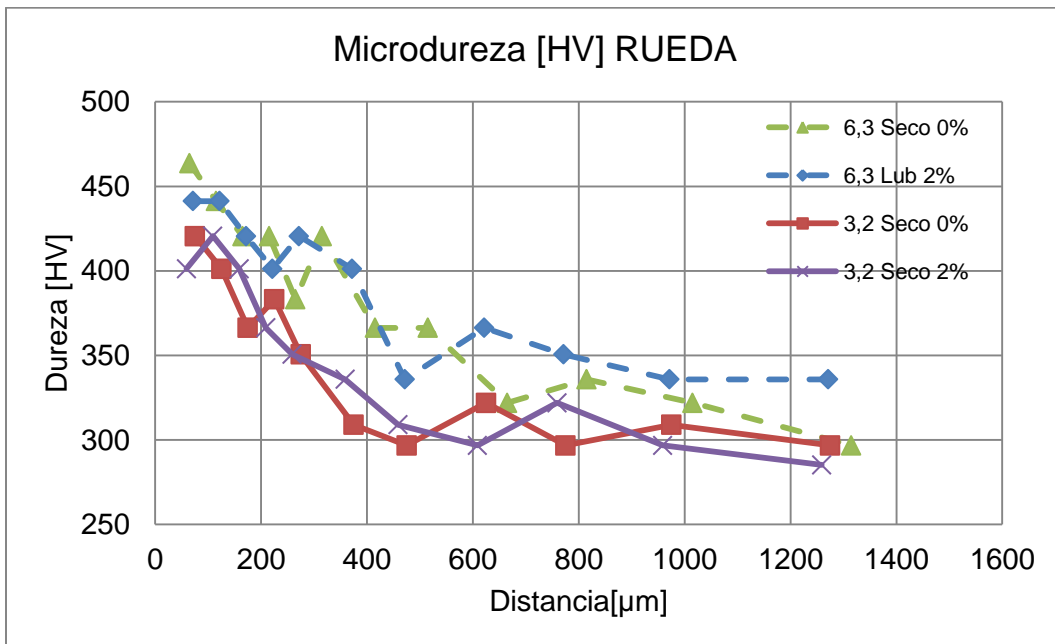


Figura 4-48. Microdurezas Para probetas de rueda con alto y bajo desempeño



Los ensayos de rueda con Ra 3,2 presentaron menores pérdidas de masa (línea sólida); es decir no favorecen la vida útil del riel clasificándolas en bajo desempeño. Estas condiciones alcanzan una dureza inicial del ensayo entre 0,4mm y 0,6mm.

Al revisar las figuras (4-23 y 4-25) correspondientes a los aportes de pérdida de masa de la rueda al tribosistema, se puede establecer que las probetas de rueda que presentaron las mejores condiciones fueron los ensayos denominados “3,2seco 0” y “3,2 seco 2%”. Estos ensayos tienen en común un Ra inicial de 3,2 μm y que el tamaño de la capa endurecida luego de 220.000 ciclos varía entre 0.4 y 0.6 mm. En las imágenes tomadas en SEM correspondientes a las muestras de estos ensayos (figuras 4-34 y 4-35) se ven los cortes transversales de las ruedas con mejor desempeño y en las cuales se evidencian grietas poco profundas, algunas sin aflorar a la superficie y de poca longitud, lo cual explica en parte la menor contribución al desgaste; es de notar que las bandas de deformación no están muy definidas bajo estas condiciones. Por otra parte al analizar las probetas de las ruedas que más aporte en pérdida de masa realizaron al tribosistema, se puede establecer que fueron las que inicialmente tenían un Ra alto, equivalente a 6,3 μm . Al observar la (figura 4-48) se nota que para estas probetas en las cuales se obtuvieron bajos desempeños el endurecimiento del material llega hasta distancias del orden de 1 mm, lo cual marca una diferencia con las probetas de riel.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Sobre el efecto de la lubricación

La lubricación resultó ser el factor de mayor influencia en el desgaste del sistema rueda-riel estudiado. En las pruebas de laboratorio, la adición de un lubricante en la zona de contacto redujo la pérdida de masa combinada del sistema rueda+riel aproximadamente en un 55%.

Sobre el efecto de la rugosidad inicial de la superficie de la rueda

El factor Rugosidad Inicial de la superficie de la rueda es en orden de importancia el segundo parámetro más significativo en las pruebas de desgaste. Al emplear un Ra inicial para las ruedas de $3,2 \mu\text{m}$ se consigue un mejor desempeño respecto al desgaste en aproximadamente 22% respecto al Ra inicial de $6,3 \mu\text{m}$.

Al analizar el desgaste combinado rueda+riel, una rugosidad inicial alta de la rueda afecta más el desgaste de la rueda y mejora el desempeño del riel, mientras una rugosidad baja preserva la vida útil de la rueda y aumenta el desgaste del riel

En lo que respecta a parámetros de rugosidad diferentes de Ra, se evidenció una tendencia de la tasa de desgaste a incrementarse con valores positivos de Rsk y valores de Rku superiores a 3. Igualmente, se observó una tendencia al aumento de la tasa de desgaste de las probetas de rueda cuando Rz y Rpk aumentaron, especialmente para condiciones en seco.

Sobre el efecto del porcentaje de deslizamiento

Aunque en el diseño de experimentos el factor porcentaje de deslizamiento resultó no ser significativo en el desgaste de las ruedas, este parámetro sí debe ser tenido en cuenta en el problema abordado pues en el caso particular de este trabajo el porcentaje de deslizamiento efectivo impuesto al tribosistema fue menor del deseado debido a limitaciones constructivas y operacionales de la máquina de ensayos empleada. Además su efecto en el tribosistema fue importante, casi comparable con el de la rugosidad inicial de la rueda.

Sobre los mecanismos de desgaste

El principal fenómeno de desgaste observado en las muestras fue *ratchetting*, el cual fue responsable de la pérdida de masa por fatiga de contacto en las muestras. También se encontraron evidencias de adhesión localizada y en algunos casos estuvieron presentes fenómenos de abrasión debido a desprendimiento de material de las superficies de las probetas.

En términos de la respuesta microestructural del material, se encontró que la profundidad de endurecimiento fue mayor en las probetas de rueda con menor pérdida de masa en las pruebas tribológicas, en las que se alcanzaron profundidades de endurecimiento por encima de 1mm.

5.2 Recomendaciones

Ampliar el número de niveles del acabado superficial inicial en la rueda y aumentar su valor inicial, con el propósito de comprender mejor el efecto que tiene un mayor valor inicial en la variable respuesta pérdida de masa.

Realizar ensayos progresivos en los cuales sea posible tomar mediciones tales como pérdidas de masa, cambios superficiales, microdureza y cambios microestructurales de las probetas a diferentes ciclos y evaluar la influencia de los factores en el tiempo.

Establecer variaciones de la rugosidad inicial en el riel y ver la influencia de este parámetro en el tribosistema rueda-riel.

Realizar los ensayos de laboratorio a menos ciclos y con diferentes parámetros de rugosidad con el propósito de evaluar el inicio y aparición de grietas mediante el uso de un medidor de corrientes de Eddy.

Bibliografía

- [1] Alcaldía de Medellín, Departamento administrativo de planeación; documento técnico de soporte POT [acuerdo 46/2006], segunda parte: “Diagnostico-evaluación y seguimiento Movilidad, (2006), 327-328.
- [2] Metro de Medellín, “Informe corporativo 2013, Metro de Medellín”. (2013), 6-7.
- [3] R. Lewis y U. Olofsson, Wheel-rail interface handbook, 1.a ed. Boca Raton; Oxford: CRC Press ; Woodhead Pub., 2009.
- [4] W. J. Harris Jr, W. Ebersöhn, J. Lundgren, H. Tournay, y S. Zakharov, Guidelines to Best Practices for Heavy Haul Railway Operations: Wheel and Rail Interface Issues, First Edition. International Heavy Haul Association (IHHA), 2001.
- [5] J.A.Williams, “*Engineering Tribology*”, Oxford University Press, 1994, Capitulo 11.
- [6] Olofsson U. and Sundvall K., Influence of leaf, humidity, and applied lubrication on friction in the wheel–rail contact: pin-on-disc experiments, Journal of Rail and Rapid Transit, 2004, 218, pp. 235–242.
- [7] W. J. Harris Jr, W. Ebersöhn, J. Lundgren, H. Tournay, y S. Zakharov, Guidelines to Best Practices for Heavy Haul Railway Operations: Wheel and Rail Interface Issues, First Edition. International Heavy Haul Association (IHHA), 2001.Capitulo 3,P 16
- [8] B. Bushan, Modern Tribology Handbook, V1,ISBN 0-8403-6,(2001),P 274-275
- [9] R. Ismail, M. Tauviqirrahman, Jamari and D.J. Schipper (2011). Topographical Change of Engineering Surface due to Running-in of Rolling Contacts, New Tribological Ways, Dr. Taher Ghrib (Ed.), ISBN: 978-953-307-206.

-
- [10] R. Lewis y U. Olofsson, Wheel-rail interface handbook, 1.a ed. Boca Raton; Oxford: CRCPress ; Woodhead Pub., 2009,capitulo 2,P42
- [11] R. Popovici, FRICTION IN WHEEL - RAIL CONTACTS, Friction in Wheel - Rail Contacts ISBN 978-90-365-2957-0 Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands February 2010,5
- [12,13] P. Swanson, R. Klann, Abrasive wear studies using the wet sand and dry sand rubber wheel tests, in Rhee, S.K., Ruff, A.W. and Ludema, K.C. (eds), Wear of Materials 1981, ASME, New York, USA, 379-89.
- [14] Lewis y U. Olofsson, Wheel-rail interface handbook, 1.a ed. Boca Raton; Oxford: CRCPress ; Woodhead Pub., 2009,capitulo 2,P46
- [15] Lewis, R., Dwyer-Joyce, R.S., 2004, Wear mechanisms and transitions in railway wheel steels, IMechE Part J; Journal of Engineering Tribology, 218, 467-78.
- [16] ASTM G40-13, «Standard Terminology Relating to Wear and Erosion», American Society of Testing and Materials, 2013.
- [17] R. Lewis y U. Olofsson, Wheel-rail interface handbook, 1.a ed. Boca Raton; Oxford: CRCPress ; Woodhead Pub., 2009
- [18] Stribeck R., 1902, Die Wesentlichen Eigenshaften der Gleit- und Rollenlager,Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 46 pp. 1341–1348, 1432–1438, and 1463–1470.
- [19] Söderberg A., Interface Modelling: Friction and Wear, Doctoral thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Department of Machine Design, TRITA-MMK 2009:3,Stockholm, 2009.
- [20] I. Hlavatý, M. Sigmund, L. Krejčí, P. Mohyla, The bainitic steels for rails applications, Materials Engineering 16 (2009) 44-50.

[21] A. Kapoor, K.L. Johnson, "Plastic ratchetting as a mechanism of metallic wear", Proc. R. Soc. London A 445 (1994) 367-381

[22] A.Kapor, F.J.Franklin, S.K.Wong,M.Ishida "surface roughness and plastic flow in rail wheel contact".Wear 253,(2002);P257-264

contacto

[23] Managing the wheel—rail interface: the Japanese experience Wheel—Rail Interface Handbook, 2009, Pages 701-758.

[24]. W. R. Tyfour, J. H. Beynon, y A. Kapoor, Deterioration of rolling contact fatigue life of pearlitic rail steel due to dry-wet rolling-sliding line contact, Wear 197 (1996) 255-265.

[25] J. Lundmark, E. Kassfeldt, J. Hardell, B. Prakash, Influence of initial surface topography on tribological performance of the wheel/rail interface during rolling/sliding conditions, Proceedings from the conference IHHA STS 2007,Kiruna, Sweden in June 2007, ISBN: 978-91-633-0607-5

[26] UIC 812-3 Technical specification for the supply of rolled solid wheels of non alloy steel for traction and rolling stock. 5th. Issue. 01/1984

[27] UIC 812-5 OR "Specification technique pour la fourniture de corps de roues en asier lamié ou forgé pour matériel roulant motear et remorqué tolérances et rugosité de surface" 1e edition 01.07.88

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

[29] A. Kapoor, D.I. Fletcher, F. Schmid, K.J. Sawley, M. Ishida, Tribology of Rail Transport, in: MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK: Materials Coatings and Industrial Applications, Volume 2 (2001) 34.2.8.4.

[30] K. Ueda, K. Uchino, A. Kobayashi: Effects of %C on Wear Property in Pearlitic Steels, Wear, 253 (2002) 107-113.

[31] J.H Beynon, J.E. Granham, K.J.Sawley, Rolling Contact fatigue of three pearlitic rail steels, *Wear* 192 (1996) 94-111.

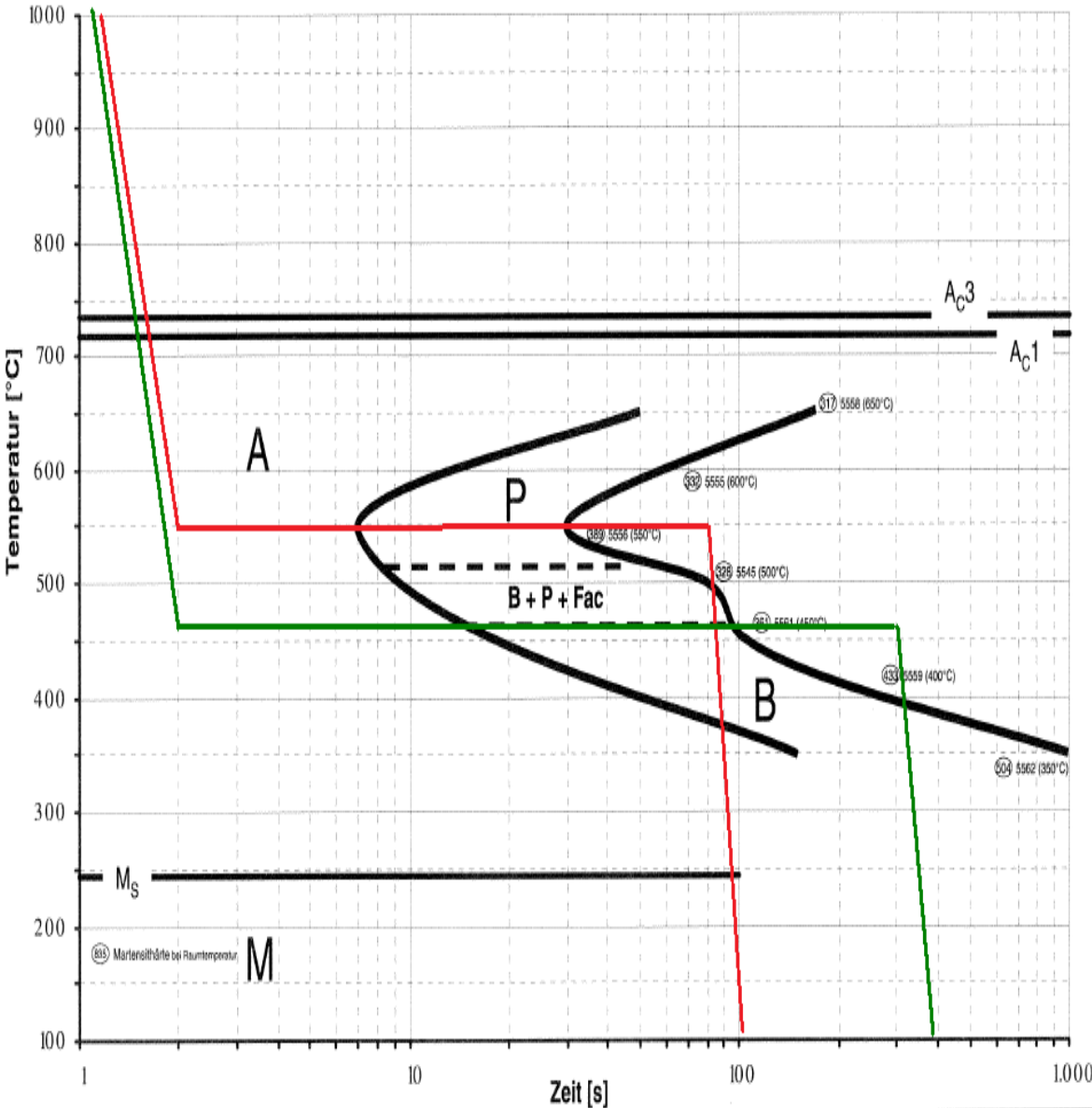
[32] P. Clayton & N. Jin, Unlubricated Sliding And Rolling/Sliding Wear Behavior Of Continuously Cooled, Low/Medium Carbon Bainitic Steels, *Wear*, 200 (1996) 74-82.

[33] Sistema portátil de Diagnostico "SPD" Metro- EAFIT – Colciencias, 2004.

[34] R. Lewis, U. Olofsson, Mapping rail wear regimes and transitions, *Wear* 257 (2004) 721–729.

[35] D. Montgomery, Design and analysis of experiments, 5th ed., New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.

A. Anexo 1: curva de tratamiento térmico del acero R260



B. Anexo 2: Ensayo cuatro bolas grasa Ossagol v



Ingenieros de Lubricación S.A.S

Nit. 800.134.731 - 3

FECHA: Agosto 10/2010
ENGARGADO: Ing. Carlos Paternina / Ing. Mauricio Palacio
EMPRESA: METRO DE MEDELLIN

Ref.: Informe ensayos Four Ball, según Norma ASTM D-2596- Ref.01

Transcribimos a continuación los resultados de los ensayos Four Ball realizados, acorde con la Norma ASTM D-2596.

Condiciones del ensayo:

RPM: 1770

Temperatura: 28 °C.

Duración: 10"

Carga aplicada: Ver Tabla (1).

Repetitividad de la Norma: 1 (un) Salto de Carga.

Reproducibilidad de la Norma para el rango: 1 (un) Salto de Carga.

Equipo utilizado: Four Ball Computarizado, con velocidad variable y dispositivo calefactor de la muestra, marca IDP Aparatos N° de Serie IDP-0892-0001-D.

Resultados obtenidos:

Producto Carga	(Kgf) Resultado (mm.) Protocolo Oba.	Resultado (mm.)	Protocolo	Oba.
OSSAGOL V	250	Soldadura	IL-10001	---
OSSAGOL V	200	Soldadura	IL-10002	---
OSSAGOL V	160	Soldadura	IL-10003	---
OSSAGOL V	125	Soldadura	IL-10004	---
OSSAGOL V	100	Carga de soldadura	IL-10005	---
OSSAGOL V	80	2.50	IL-10006	Carga de pasa
OSSAGOL V	100	Pasa	IL-10007	Ver nota 1
OSSAGOL V	100	Carga de Soldadura	IL-10008	Triplificado

Nota (1): Luego de realizar por triplicado la carga de 100 Kg. (por haber dado resultado de "Pasa" en la segunda oportunidad), se ha establecido como "Carga de Soldadura" el mencionado salto de Carga, y como "Carga de Pasa" 80 Kg.



Ingenieros de Lubricación S.A.S

Nit. 800.134.731 - 3

De acuerdo con los resultados obtenidos la capacidad de carga de esta grasa es muy baja, por lo que no se puede utilizar en condiciones de bajas velocidades y elevadas cargas, o sea que no tiene propiedades de Extrema Presión.

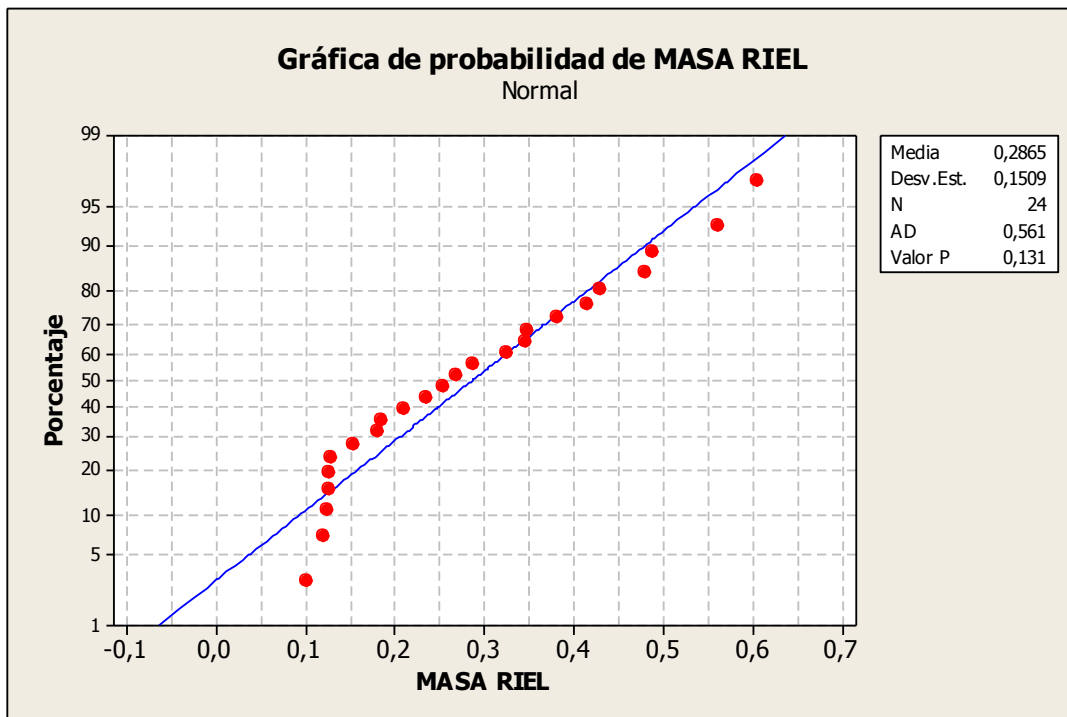
También se puede apreciar que la capacidad de carga es de 80 kgf versus 250 kgf que es la "carga de pasa" que debe tener una grasa con aditivos EP de tipo 1. Para poder hallar la capacidad de carga de esta grasa fue necesario realizar 8 corridas.

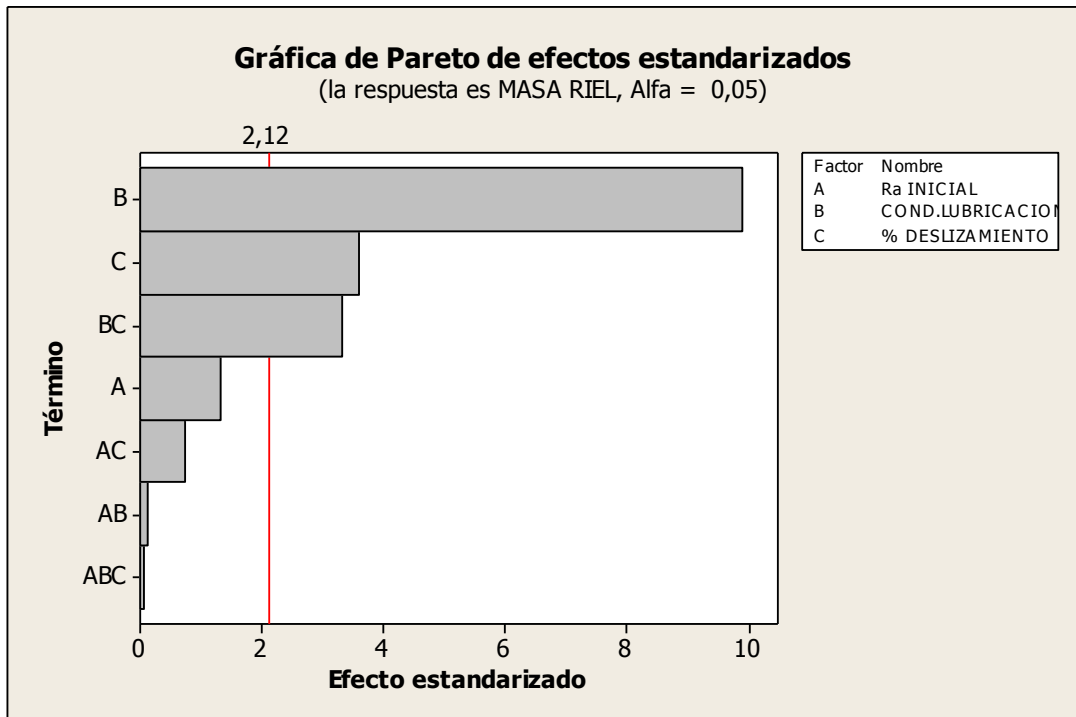
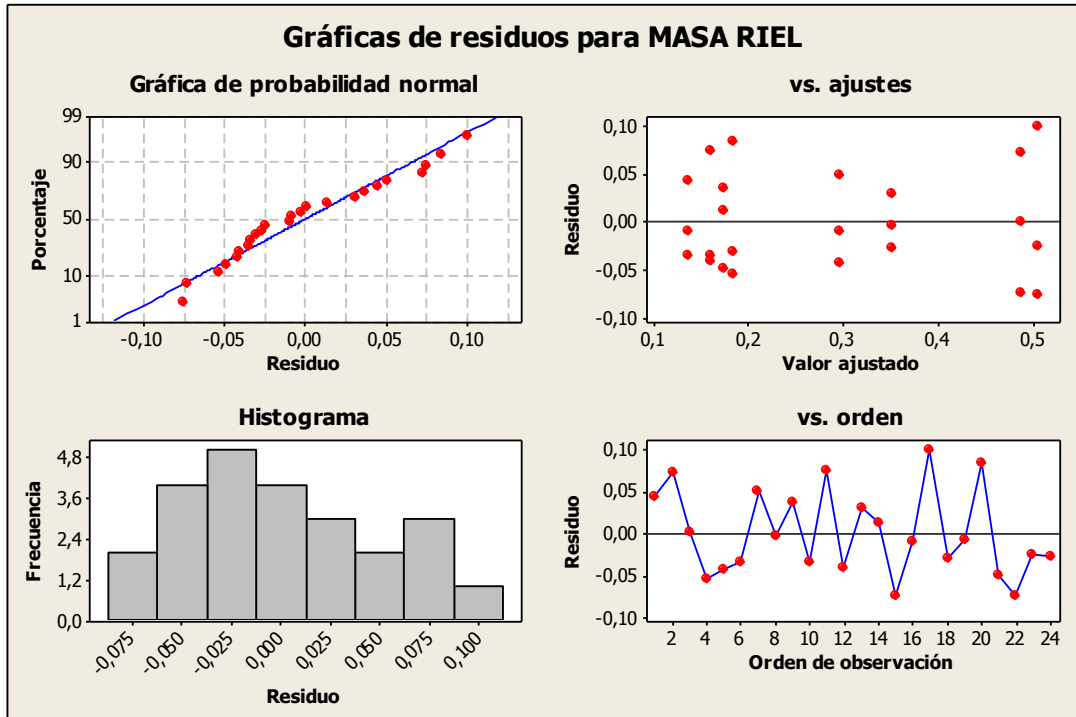
Atentamente,

Diana Albarracín M.
Dir. Servicios de Lubricación
PBX: (4) 4443877 ext. 105

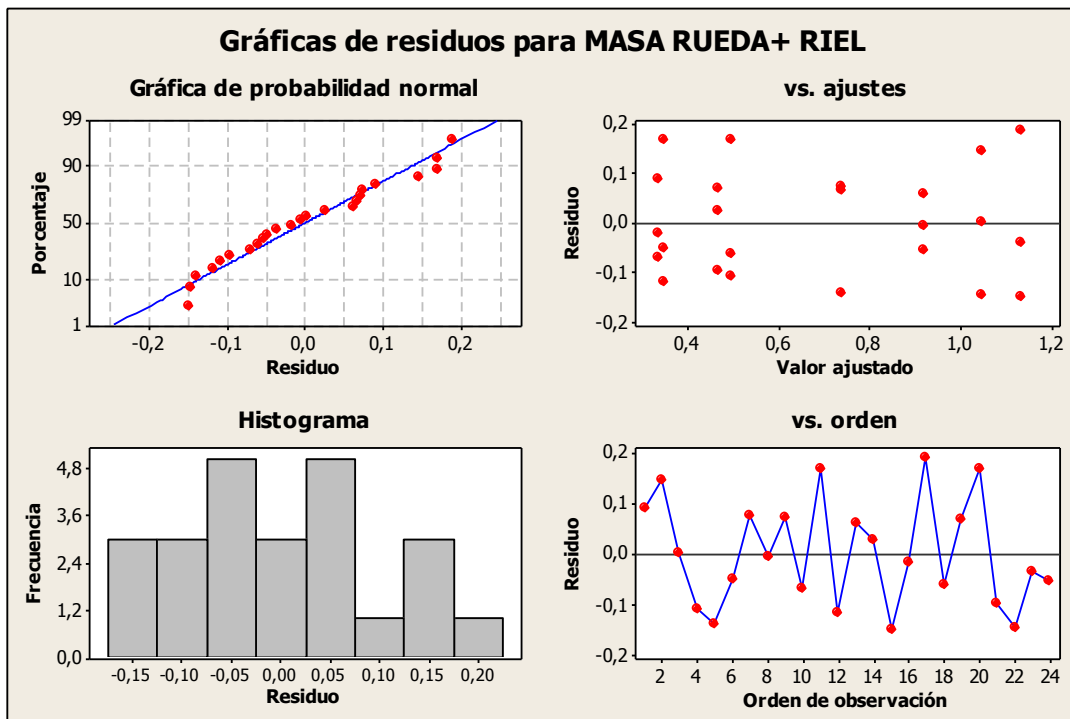


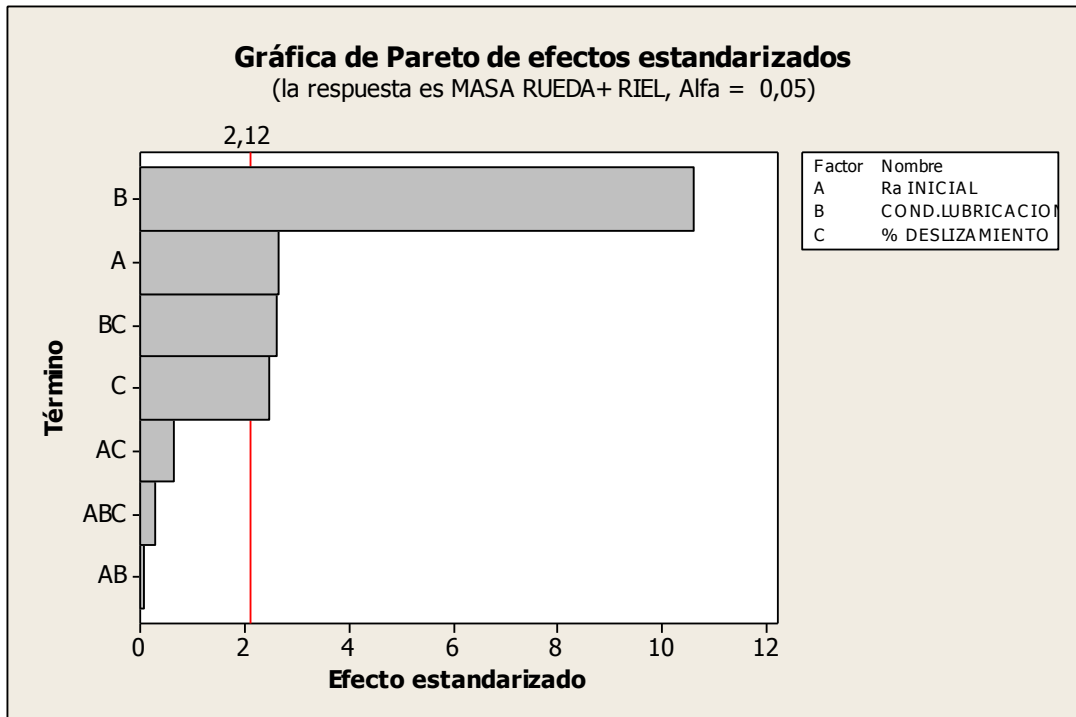
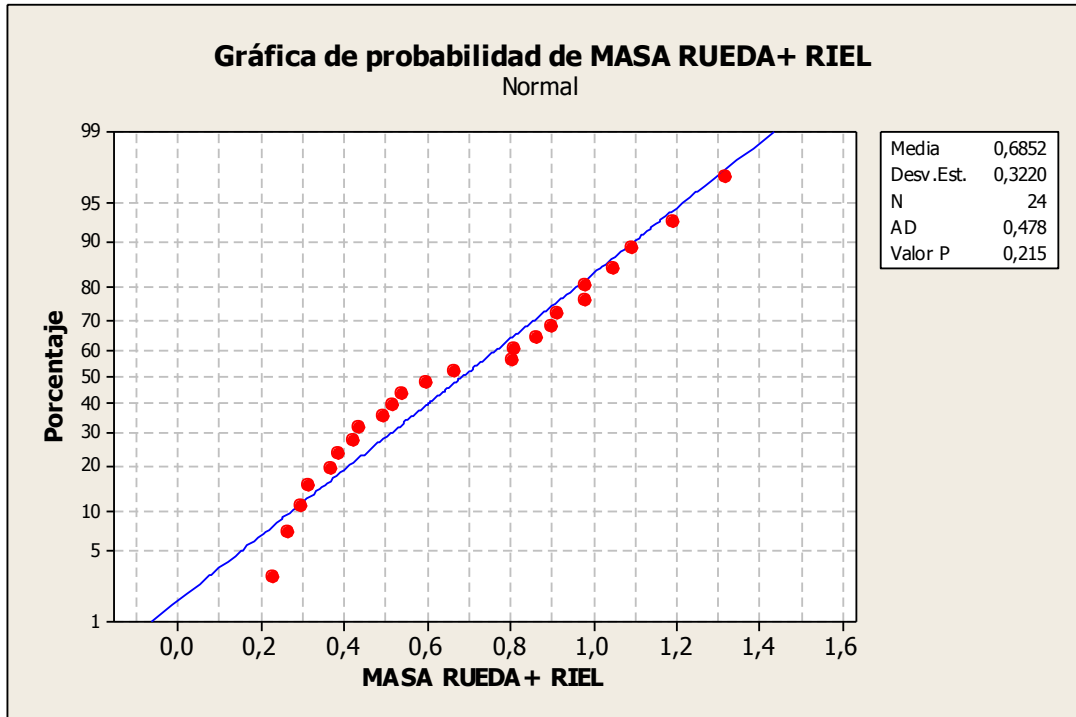
C. Anexo 3: Resultados Análisis estadístico riel





D. Anexo 4: Resultados análisis estadístico rueda+ riel

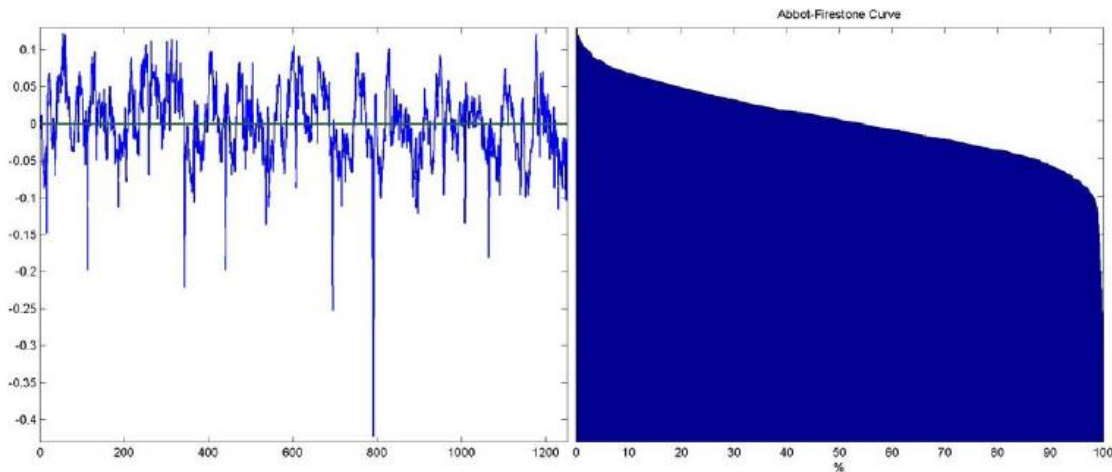




E. Anexo 5: Definición de parámetros de rugosidad superficial derivados de la curva de Abbot-Firestone

La curva de Abbot-Firestone, también llamada curva de Fracción de Contacto, informa de manera estadística la cantidad de superficie (o porción de perfil) que estaría en contacto con una hipotética superficie lisa y rígida enfrentada a la superficie real que está siendo medida. Para construir la curva se define una línea recta paralela a la línea media del perfil medido, y se determina la porción del perfil que estaría siendo interceptada por dicha línea desde el pico más alto hasta el valle más profundo de la superficie, como lo muestra la figura E1.

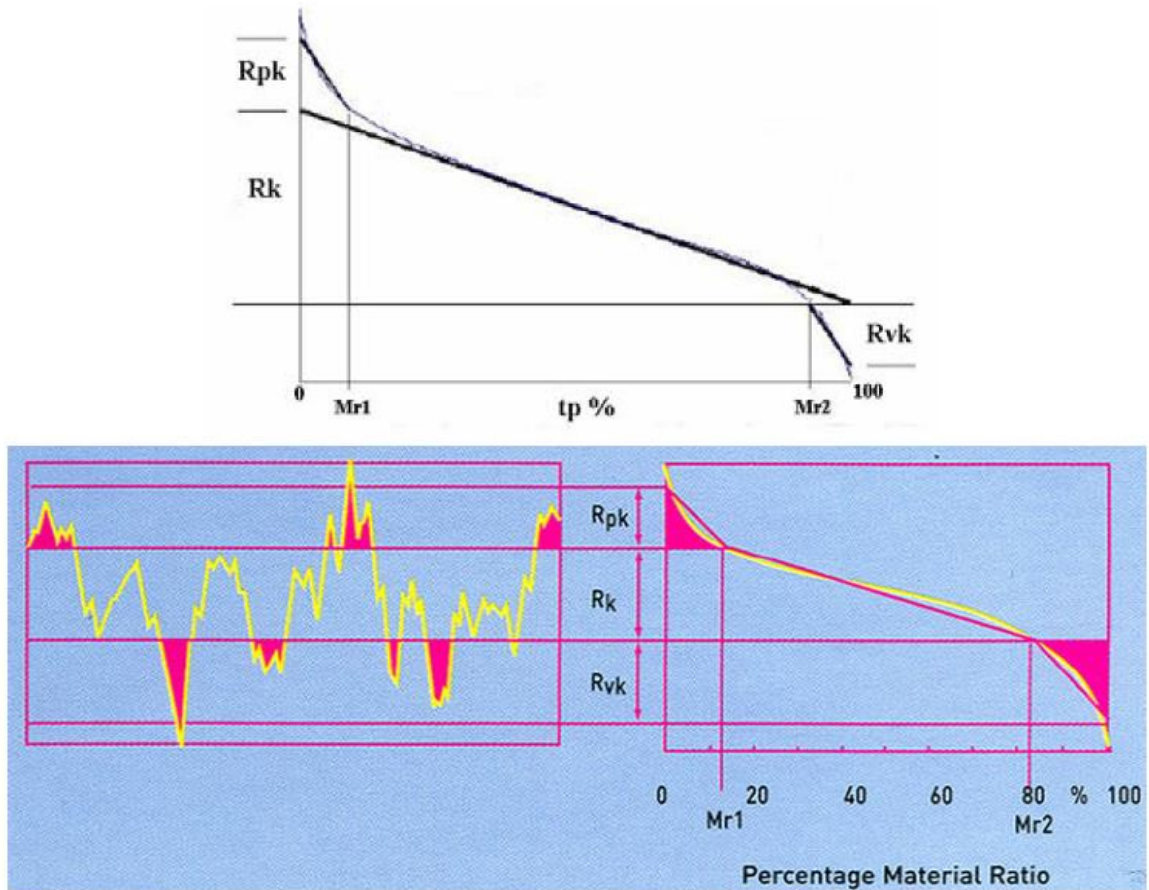
Figura E1. Curva de Abbot-Firestone



En general, la curva de Abbot-Firestone puede dividirse en 3 sectores bien diferenciados, como se indica en la figura E2: un primer sector caracterizado por un pequeño aumento de la fracción de contacto con la profundidad, es decir, una alta pendiente negativa de la curva. Un segundo sector corresponde a una pendiente negativa menor, es decir, una

mayor dependencia de la fracción de contacto con la profundidad, y un tercer sector está de nuevo representado por una caída pronunciada de la curva.

Figura E2. Definición de parámetros en la curva de Abbot-Firestone



Parámetros asociados a la curva de Abbot-Firestone

Algunos de los parámetros más importantes asociados a la curva de Abbot-Firestone son:

Rk: rugosidad del núcleo (Core roughness): Es la distancia vertical definida por la zona 1 de la curva, es decir, el tamaño representativo de los picos que contribuyen poco al área de contacto de la superficie.

Rpk: Altura reducida de picos (Reduced peak height): Es la altura representativa entre picos y valles que contribuyen al área de contacto. Es decir, es el tamaño efectivo de la rugosidad sin tener en cuenta picos muy elevados ni valles muy profundos.

Rvk: Profundidad reducida de valles (Reduced valley depth): Es la distancia vertical definida por la zona 3 de la curva, es decir, el tamaño representativo de los valles que contribuyen poco al área de contacto de la superficie.

Mr1: Fracción de contacto superior (Superior material ratio): es la fracción de contacto observada en el límite superior de la rugosidad del núcleo.

Mr2: Fracción de contacto inferior (Inferior material ratio): es la fracción de contacto observada en el límite inferior de la rugosidad del núcleo.