

# EVALUACIÓN DE LA GENERACIÓN DE CAPA BLANCA EN EL ESMERILADO DE ACERO DE RIELES

Victor Manuel Mejia Sanchez

[victor.mejia866@pascualbravo.edu.co](mailto:victor.mejia866@pascualbravo.edu.co)

Grupo de investigación GIEN, Institución Universitaria Pascual Bravo.

## RESUMEN:

El esmerilado o reperfilado de rieles es una herramienta de mantenimiento ampliamente utilizada en sistemas ferroviarios. Debido al contacto friccional entre el esmeril y el riel se puede presentar una capa blanca y dura (2 a 3 veces la dureza del material base) en la superficie del riel. La presencia de la capa blanca o WEL por sus siglas en inglés favorece la formación y propagación de grietas. Mediante una máquina de esmerilado en laboratorio se analizó la generación de capa blanca en un acero de rieles R350HT en función de los parámetros de esmerilado (Carga aplicada, velocidad de avance, y granulometría de la piedra esmeril). Se encontró que la formación de capa blanca depende directamente de la interacción entre la velocidad de avance y la carga aplicada. Igualmente se encontró que la interacción del tamaño de grano y la velocidad de avance afectan en menor medida la formación de capa blanca. Se analizó el efecto de las condiciones de operación estudiadas en la tasa de desgaste. Los resultados de este trabajo pueden contribuir a mejorar la eficiencia del esmerilado como herramienta de mantenimiento.

**Palabras claves:** Capa blanca (WEL), esmerilado, fricción, acero rieles R350HT, desgaste.

## Introducción

El esmerilado o reperfilado de rieles es un proceso donde se elimina material de la superficie del riel mediante la acción de una serie de piedras abrasivas [1],[2]. Esto con el propósito de eliminar defectos superficiales producto de la operación normal del tren, como lo son: Ondulaciones, grietas, despicadas, quemadura de motor y pérdida de forma del riel [3]. Defectos que afectan la vida útil de los rieles y por ende la seguridad operativa de los trenes [4]. Desde la década de 1980 el esmerilado de rieles se utiliza como técnica de mantenimiento en las vías férreas [1]. Debido a lo altamente abrasivo del proceso de esmerilado se presentan cambios microestructurales en la superficie de los rieles [5],[6].

La capa blanca (WEL) es uno de los fenómenos microestructurales que se puede observar con frecuencia en la superficie de los rieles sometidos a esmerilado [7]. El contacto friccional entre el esmeril y la pieza de trabajo genera una gran cantidad de calor que se disipa entre los cuerpos participante y

el ambiente [1],[8]. El calor generado aumenta la temperatura en la zona de contacto, esto sumado a los altos esfuerzos a los que está sometido el riel puede llevar a la generación WEL [9]. La WEL se caracteriza como una capa dura y delgada de color blanco que se revela bajo el microscopio después del grabado con Nital [10]. Puede tener una profundidad de hasta 0.15-0.20 mm, ser muy quebradiza y tener una dureza de hasta 700-750 HB [10]. Su dureza es considerablemente más alta en comparación con la de aceros para rieles, estos oscilan entre 250-420 HB de dureza [2]. Al ser dura y frágil la presencia de WEL favorece la formación y propagación de grietas debido a las cargas cíclicas producto de la operación normal del tren [10]. Esto puede afectar la vida útil de los rieles y afectar la disponibilidad y seguridad del sistema ferroviario [6],[11].

Hay varias hipótesis para su formación, principalmente debido a las difíciles condiciones de contacto entre la rueda y el riel. Ninguna de esas hipótesis se ha probado directamente, sin embargo,

las hipótesis actualmente más popular y estudiada se refiera a la martensita formada después de que la superficie del riel se calienta a temperaturas de austenización y posteriormente se enfría, o la formación de ferrita monocristalina como resultado de una severa deformación plástica.

En la literatura se encuentran diferentes estudios que evalúan el efecto de los diferentes parámetros de esmerilado en el desempeño del mismo, entre ellos se encontraron relevante: La velocidad de avance, tipos y características de las piedras abrasivas, el ángulo de incidencia, la carga aplicada y el tiempo de contacto, entre otras variables [12] [13].

Las variaciones constantes de los parámetros como velocidad y carga aplicada a las piedras por los trenes de esmerilado por parte de los operarios produce una alta energía en el proceso que tiene una influencia significativa en el daño de la capa superficial de los rieles. Por tanto, cuando el proceso no se realiza dentro de unos estándares estrictamente definidos y mantenidos el esmerilado puede tener un impacto altamente negativo en el rendimiento del riel [14].

Uhlmann, et.al [13] en su investigación sobre la Influencia de los parámetros del proceso de rectificado de rieles en la rugosidad de la superficie del riel y la dureza de la capa superficial. Concluye que la composición de la herramienta usada en el rectificado, los parámetros de dicho proceso y los resultados obtenidos del procesamiento del rectificado en su mayoría son desconocidos e inciertos esto debido al desconocimiento y falta de información fundamental en el campo, el diseño de las herramientas usadas y que los procesos de rectificado de rieles generalmente son desarrollados y planificados con base a la experiencia empírica de los operarios de las maquinas ya mencionadas.

Por tal motivo es que en [13] se identificó como principal déficit del proceso de esmerilado de rieles el uso de “herramientas abrasivas universales de bajo precio con gran tamaño de grano, hechas de corindón fundido y aglomerante resinoide, que no son adecuadas para un procesamiento en seco de alta productividad”.

La generación de la WEL o capa blanca durante el esmerilado del acero de rieles no deja de ser un fenómeno poco estudiado y a su vez indeseado para la vida útil de los sistemas férreos y que generalmente se presenta al momento de tener unas condiciones de esmerilado no adecuadas. Por tal motivo, para evitar la generación de la capa blanca durante el esmerilado de acero de rieles, es importante controlar cuidadosamente la velocidad, la carga y el tamaño de grano de la piedra de esmeril. Se deben seleccionar condiciones de esmerilado adecuadas para garantizar que la superficie del riel no se deforme ni se caliente en exceso, lo que puede provocar la generación de la capa blanca.

## **1. Antecedentes**

### **1.1 Mecanismo de formación de la capa blanca**

Al-Juboori, [15] en su estudio sobre la formación de capa blanca en la superficie de los rieles revelo basado en investigaciones microestructurales y de micro dureza la aparición de dos tipos distinguibles de capa blanca (WEL), uno de ellos caracterizado por la presencia de martensita fina y el otro caracterizado por su contenido tanto de austenita retenida como de martensita. La capa blanca que contiene martensita está asociada con una estructura de perlita subsuperficial deformada producida debido a la deformación plástica severa en la interfaz de contacto, caso contrario a lo sucedido en la capa blanca inducida térmica o termomecánicamente la cual tiene contenido de cantidades significativas de austenita y martensita retenida y se puede asociar con el contenido de perlita no deformada en la microestructura.[16].

Lojkowski [17], propuso que la capa blanca tiene un tamaño de grano entre 15 y 500um y que está compuesta de Fe nanocristalino, asimilando esta formación de la estructura nanocristalina a la alta deformación plástica que sufre la zona de contacto comparando este proceso de estado sólido con un proceso de aleación mecánica.

### **1.2 Parámetros de esmerilado**

Los principales parámetros a tener en cuenta al momento de hacer una prueba de esmerilado de

rieles son: La velocidad de rotación de la piedra, la velocidad de traslación del tren, el tiempo en contacto, la carga, los intervalos y el número de ciclos de esmerilado [18]. Igualmente es importante tener en cuenta al momento de los procesos de esmerilado factores como la configuración del sistema ferroviario y las condiciones de operación propios como, la lubricación, el tipo de material, el tipo de boggie, condiciones ambientales como temperatura y humedad, entre otros[19].

## 1. Metodología

En este trabajo se utilizó una máquina esmeriladora de laboratorio (ver figura 2A y 2B), consta de un disco giratorio, extraído de tramos de riel R350HT suministradas por la Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá (Metro de Medellín), con un movimiento de rotación que representa la velocidad de avance del vehículo de esmerilado en campo y mediante el giro de una manivela se le aplica una carga, la geometría del disco se representa en la figura 1. Los discos fueron sometidas a un proceso de esmerilado variando los siguientes parámetros: Carga aplicada, velocidad de la probeta (Velocidad de avance) y tamaño de grano de la piedra esmeril.

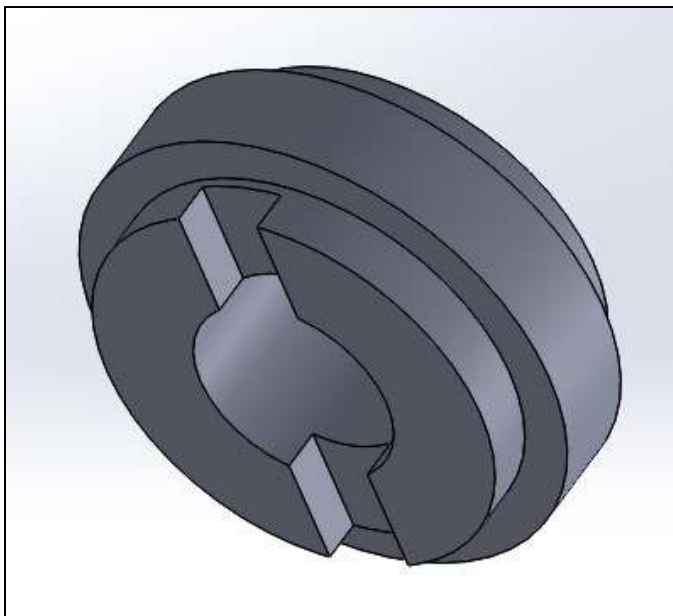


Figura 1 Diseño de la probeta para experimentación

La metodología se llevó a cabo mediante el desarrollo de 4 fases:

**Fase I, Caracterización inicial:** con el propósito de validar el tipo de piedra y el material de fabricación de esta se hace un estudio del tamaño de grano de las 2 piedras que se van a utilizar en la experimentación y por medio de la tecnología DRX se hace un barrido de los elementos principales para determinar la composición de dichas piedras, usando como muestra las partículas en polvo obtenidas del proceso de triturado de las piedras.

### FASE II, Diseño de experimentos:

En esta fase se realiza un diseño de experimentos  $2^K$  que consiste en un total de tres (3) factores (velocidad de la probeta, carga aplicada y tipo de grano de la piedra de esmerilar) y tres (3) réplicas de experimentación, los factores y niveles se muestran en la tabla 1, mediante el cual fue posible calcular la cantidad de probetas de acero perlítico de riel 350Ht para fabricar y evaluar, el orden, la cantidad de corridas y generar un análisis de los resultados obtenidos mediante el software Minitab, evaluando el comportamiento del desgaste (pérdida de peso de cada probeta una vez realizada la experimentación) y la generación de la capa blanca variando cada uno de los parámetros ya mencionados.

| Exp.   | Tipo de grano | Carga (Kg) | Velocidad (RPM) |
|--------|---------------|------------|-----------------|
| Exp. 1 | Grueso        | 10         | 156             |
| Exp. 2 | Grueso        | 10         | 547             |
| Exp. 3 | Grueso        | 7          | 156             |
| Exp. 4 | Grueso        | 7          | 547             |
| Exp. 5 | Fino          | 10         | 156             |
| Exp. 6 | Fino          | 10         | 547             |
| Exp. 7 | Fino          | 7          | 156             |
| Exp. 8 | Fino          | 7          | 547             |

Tabla 1 Factores y niveles de la experimentación

**FASE III, Esmerilado de probetas en laboratorio:** una vez realizado el diseño del experimento se realiza el pesaje de cada una de las 24 probetas sugeridas por el Minitab para la experimentación esto con el fin de obtener el peso inicial de cada probeta y una vez realizado el esmerilado de estas se pesaron de nuevo para con el peso final obtener el desgaste (diferencia de peso antes y después del

esmerilado), posterior al esmerilado (ver figura 2A y 2B) donde se varían los parámetros de carga, velocidad de la probeta y tamaño de grano de la piedra de esmerilado, esto según las diferentes combinaciones obtenidas en el diseño de experimentos considerado, finalmente se procede a tomar una parte de la probeta para realizar el análisis metalográfico, dicha muestra se obtiene de realizar una serie de cortes laterales y transversales como se observa en la figura 2C y 2D.



Figura 2 Montaje experimentación y obtención de muestras para análisis metalográfico

#### FASE IV, Correlación entre variables operacionales y WEL:

En esta última fase, una vez obtenidas las muestras de cada una de las probetas experimentadas en la fase anterior se realiza el proceso de incluir en váquela AM1111 (ver figura 3) de forma transversal cada una de estas muestras de manera que sea posible observar y medir mediante análisis metalográficos la formación de la capa blanca producida en la superficie de rodadura de cada una de las probetas como se ilustra en las figuras 4A y 4B, la WEL que fue posible revelar y caracterizar mediante el reflejo de la luz y un grabador de 2% de ácido nítrico ( $2\text{HNO}_3$ ) en etanol (grabador Nital 2%)

y posteriormente medida mediante microscopía óptica con aumento de 400x.

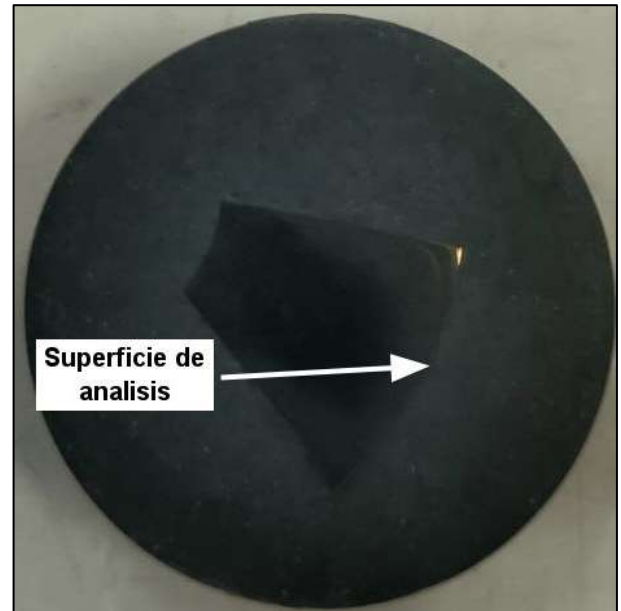


Figura 3 Preparación probeta para análisis metalográfico

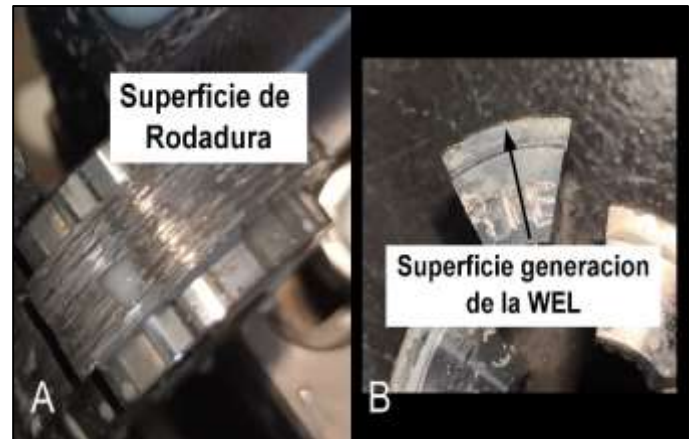


Figura 4 Superficie de rodadura esmerilada y sección para análisis metalográfico

Una vez finalizada las etapas anteriores se hace mediante el software Minitab la tabulación, organización y posterior análisis de los resultados obtenidos en la experimentación de las 24 corridas sugeridas por el diseño de experimentos.

## 2. Resultados y discusión

### 2.1 Caracterización de la piedra de esmerilado:

#### 2.1.1 Composición:

Material particulado extraído directamente de una piedra de esmerilar se analizó mediante Difracción de Rayos X (DRX) con los parámetros de medida mostrados en la tabla 3.

|                               |              |
|-------------------------------|--------------|
| Scan Axis                     | Gonio        |
| Start Position [°2Th.]        | 5,0181       |
| End Position [°2Th.]          | 69,9661      |
| Step Size [°2Th.]             | 0,026        |
| Scan Step Time [s]            | 35,075       |
| Scan Type                     | Continuous   |
| PSD Mode                      | Scanning     |
| PSD Length [°2Th.]            | 1,51         |
| Offset [°2Th.]                | 0            |
| Divergence Slit Type          | Fixed        |
| Divergence Slit Size [°]      | 0,5          |
| Specimen Length [mm]          | 10           |
| Measurement Temperature [°C]  | 25           |
| Anode Material                | Cu           |
| K-Alpha1 [Å]                  | 1,5406       |
| Generator Settings            | 30 mA, 40 kV |
| Diffraction Type              | 11019826     |
| Diffraction Number            | 0            |
| Goniometer Radius [mm]        | 240          |
| Dist. Focus-Diverg. Slit [mm] | 100          |

Tabla 2 Parámetros operación DRX

Mediante el análisis en DRX se identificó que la piedra está compuesta en un 52.2% de corindón (óxido de aluminio), 16.7% de óxido de zirconio, 12.7% de vanadio y 12.2% de pirita (ver figura 5). El Corindón o alúmina como se conoce comúnmente es un material de alta dureza y resistente al desgaste, se utiliza ampliamente como abrasivo principal en piedras de esmerilar y lijas de papel. El vanadio ayuda a mejorar la resistencia al desgaste y a prevenir la deformación de la piedra durante el proceso de esmerilado. La pirita tiene una estructura cristalina distintiva que forma bordes

afilados en la superficie de la piedra. El corindón en conjunto con el vanadio, el óxido de zirconio y la pirita contribuyen a las piedras de esmerilar en dureza, resistencia al desgaste y capacidad de corte. Estas propiedades permiten un esmerilado más eficiente y preciso de los rieles, ayudan a mantener la integridad de la piedra y un buen acabado superficial del riel.

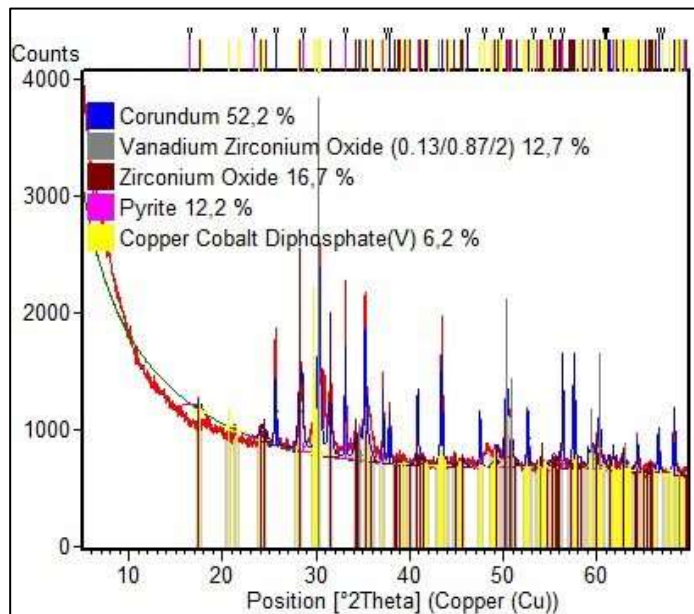


Figura 5 Resultado de la composición de la piedra de esmerilado obtenido por medio de Difracción de rayos X (DRX)

#### 2.1.2 Tamaño de grano de la piedra

El tamaño de grano se caracterizó mediante análisis de imágenes, se analizaron dos piedras suministradas por el Metro de Medellín. Se encontró una piedra con tamaño de grano 16 granos por centímetro cuadrado (16 ppcm<sup>2</sup>), se le denominó "grano grueso", la otra contiene 32 granos por centímetro cuadrado (32 ppcm<sup>2</sup>) y se denominó "grano fino", esto se ilustra en la figura 6.



Figura 6 Caracterización tamaño de grano en piedras usadas para la experimentación

### 2.1.3 Caracterización del material

El acero para la fabricación de las probetas fue extraído directamente de secciones de riel suministrados por el Metro de Medellín, etiquetados como acero R350HT. La composición química del acero fue medida por Espectroscopía de Emisión Óptica (OES), los resultados se muestran en la tabla 4. La dureza se midió en un durómetro universal, con una carga de 31.25 kgf, los resultados son del orden de 350 a 390 HB. Las propiedades mecánicas y químicas del material están en concordancia con los rangos establecidos por la norma europea EN 13674-1.

| C     | Si    | Mn    | S     | P     | Cr    | V     |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.739 | 0.453 | 1.198 | 0.013 | 0.016 | 0.085 | 0.001 |

Tabla 3 Composición química acero R350HT (% en peso).

## 2.2 Experimentación

Los discos fabricados de acero R350HT se sometieron a esmerilado utilizando la máquina de esmerilado en laboratorio mostrada en la figura 2A y 2B. La variación de la carga en el tiempo se midió con una celda de carga tipo "S" acoplada a un sistema de adquisición de datos. La carga se aplica mediante el giro de una manivela por parte del operario, tratando de mantenerla constante. El tiempo de contacto se fijó en 18 segundos. Por la naturaleza de la aplicación de la carga esta varía ligeramente. Los resultados se muestran en la figura

7, donde se observa una variación de la medida con la carga objetivo de menos de 5%. Algunas replicas presentan una mayor variación de los resultados, de hasta 20%. La velocidad angular del disco y la piedra se midió con un tacómetro digital de referencia UNIT UT372 antes y durante el experimento, se presentó una variación menor a 2%, esta variación es debido a la carga aplicada a los motores.

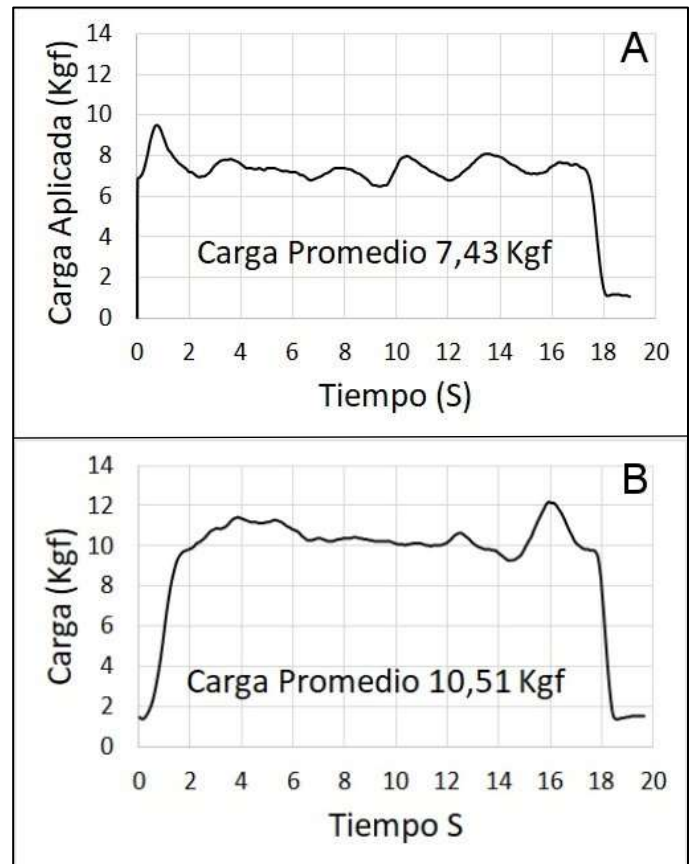


Figura 7 Grafica de ensayo para carga aplicada

## 2.3 Caracterización final

### 2.3.1 Tasa de desgaste:

Se tomó la medida del peso de los discos antes y después del experimento con una balanza Sartorius CP225D con rango de medición:  $80g \pm 0.01mg$  y  $220g \pm 0.1mg$ . El desgaste se calculado mediante la diferencia de peso de las probetas antes y después del proceso de esmerilado siguiendo el diseño de experimentos, en la tabla 5 se observa el valor promedio en gramos.

| Exp.   | Tipo de grano | Carga (Kg) | Velocidad (RPM) | Desgaste (gr) |
|--------|---------------|------------|-----------------|---------------|
| Exp. 1 | Grueso        | 10         | 156             | 5,765         |
| Exp. 2 | Grueso        | 10         | 547             | 4,345         |
| Exp. 3 | Grueso        | 7          | 156             | 4,534         |
| Exp. 4 | Grueso        | 7          | 547             | 2,065         |
| Exp. 5 | Fino          | 10         | 156             | 7,88          |
| Exp. 6 | Fino          | 10         | 547             | 5672          |
| Exp. 7 | Fino          | 7          | 156             | 6,835         |
| Exp. 8 | Fino          | 7          | 547             | 4375          |

Tabla 4 Resultados promedios de desgaste obtenidos en la experimentación

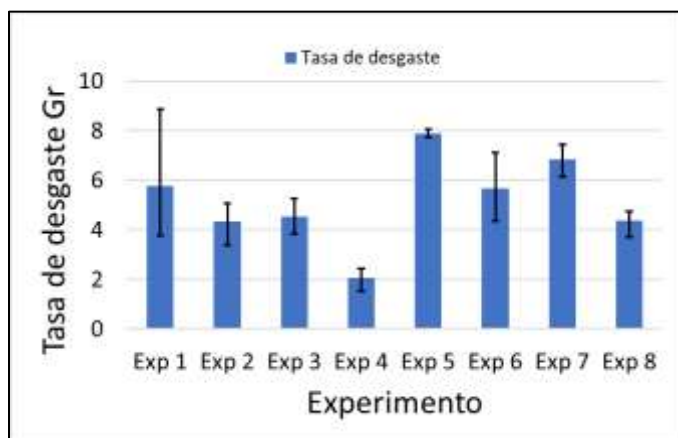


Figura 8 Desviación estándar para la tasa de desgaste

En la figura 8 se presentan los resultados de la tasa de desgaste, se nota que la desviación estándar de los resultados es alta, esto puede ser debido a que el proceso de esmerilado es llevado a cabo mediante un montaje experimental altamente aleatorio. Pese a la aleatoriedad de los resultados se puede concluir que: El tratamiento tamaño de grano “grano grueso”, velocidad de la probeta de 547 RPM y carga aplicada de 7 Kg presenta la menor tasa de desgaste. Por otro lado, el tratamiento tamaño de grano “grano fino”, velocidad de la probeta de 156 RPM y carga aplicada de 10 Kg presentó una mayor cantidad de material removido. Esto se analizará más adelante en el análisis estadístico.

De los resultados de desgaste se realizó un análisis estadístico en Minitab®, Los resultados del análisis de efectos estandarizados se muestran en la figura 9. Es evidente que los efectos principales tienen significancia estadística mientras que los efectos dobles y triple no tienen significancia estadística alguna. lo que implica que la combinación de los factores evaluados no es relevante en la tasa de

desgaste que sufre los discos sometidos a un proceso de esmerilado.

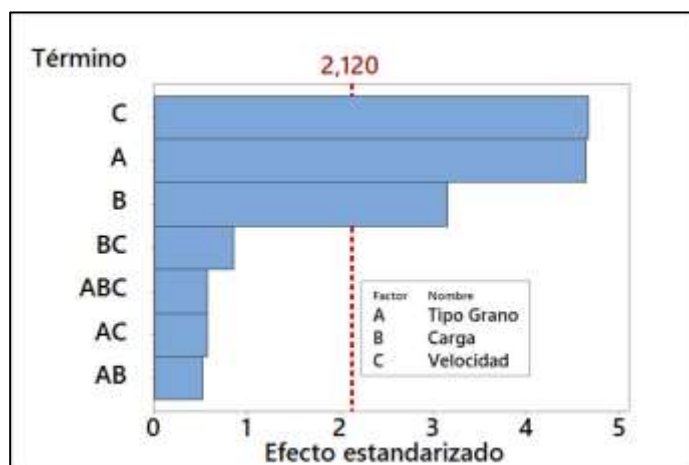


Figura 9 Diagrama de Pareto de efectos para los efectos estandarizados frente a la tasa de desgaste

De acuerdo con los resultados anteriores se realizó un análisis de los efectos principales de los factores evaluados en el desgaste, esto se muestra en la figura 10. En esta se puede observar que se presenta un mayor desgaste en el factor tamaño de piedra “grano fino” (32 granos por cm cuadrado). Esto puede ser debido a que, aunque una sola partícula de la piedra de grano fino remueve menor cantidad de material que una de grano grueso en total son más partículas abrasivas participando al mismo tiempo por lo que presentan una mayor remoción de material [20]. En la zona de contacto una piedra de grano grueso al pasar la primera vez puede eliminar mayor cantidad de material, pero al pasar más veces puede que la partícula abrasiva pase por una zona vacía disminuyendo así su eficiencia [21].

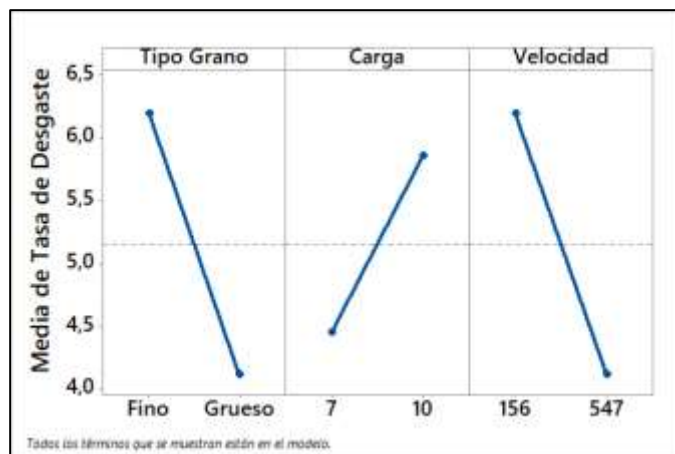


Figura 10 Efectos principales para la tasa de desgaste

Se encontró que el desgaste aumenta con el aumento de la carga aplicada, esto es debido a que a mayores cargas las partículas abrasivas penetran más profundo en el material por lo que remueven mayor cantidad de este[22]. En teoría existe un punto máximo en el cual al aumentar la carga no se aumente el desgaste

Por último, se presenta que una menor velocidad de avance representa un mayor desgaste, esto es debido a que a menores velocidades el tiempo en contacto es mayor por lo que las partículas abrasivas tienen más tiempo de acomodarse en la interfaz del material aumentando así el desgaste[1]

### 2.3.4 Formación de capa blanca (WEL)

Los discos tratados se cortaron en la sección longitudinal como se muestra en la figura 2D, posteriormente se embaquelaron y pulieron hasta acabado espejo (ver figura 3) y se atacaron con Nital al 2% por 15 segundos. Mediante microscopía óptica se midió el espesor de la capa blanca formada en la zona de contacto, esto se observa en la figura 11. La capa blanca se observa claramente como una línea blanca continua diferenciable de la microestructura perlítica del material base.

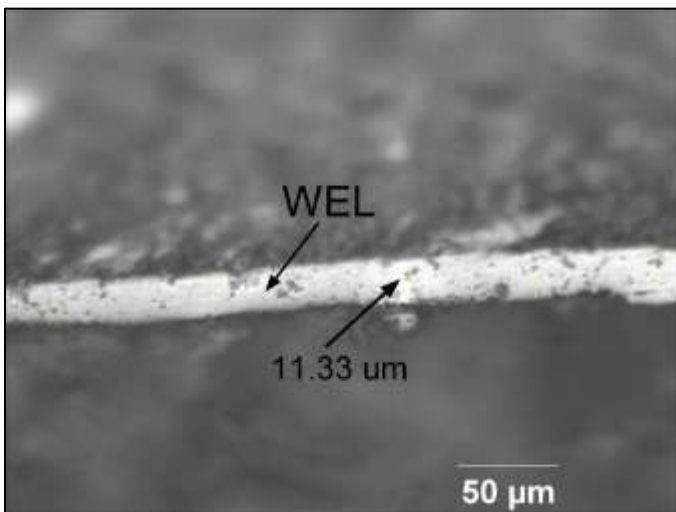


Figura 11 Capa blanca generada en la superficie de la probeta (imagen 400x)

El promedio del espesor de la capa blanca obtenida mediante el diseño experimental se muestra en la tabla 6.

| Exp.   | Tipo de grano | Carga (Kg) | Velocidad (RPM) | Capa blanca (um) |
|--------|---------------|------------|-----------------|------------------|
| Exp. 1 | Grueso        | 10         | 156             | 19,634           |
| Exp. 2 | Grueso        | 10         | 547             | 7,484            |
| Exp. 3 | Grueso        | 7          | 156             | 11,479           |
| Exp. 4 | Grueso        | 7          | 547             | 18,009           |
| Exp. 5 | Fino          | 10         | 156             | 15,789           |
| Exp. 6 | Fino          | 10         | 547             | 12,83            |
| Exp. 7 | Fino          | 7          | 156             | 11,241           |
| Exp. 8 | Fino          | 7          | 547             | 19,44            |

Tabla 5 Resultados promedios del espesor de capa blanca

en esta tabla se observa que para los parámetros de grano grueso el valor del espesor de la capa blanca es muy diferente siendo de mayor espesor cuando la velocidad es baja lo que se hace coherente con los resultados de la tasa de desgaste donde para estas condiciones de operación hay una mayor cantidad de material removido lo que genera mayor temperatura superficial y en consecuencia una capa blanca más grande.

Observando la figura 12 se ve que la desviación estándar de los resultados en el tamaño de la capa blanca obtenida es alta, esto puede ser igualmente que pasa con el desgaste debido a que el proceso de experimental fue llevado a cabo mediante un montaje aleatorio.

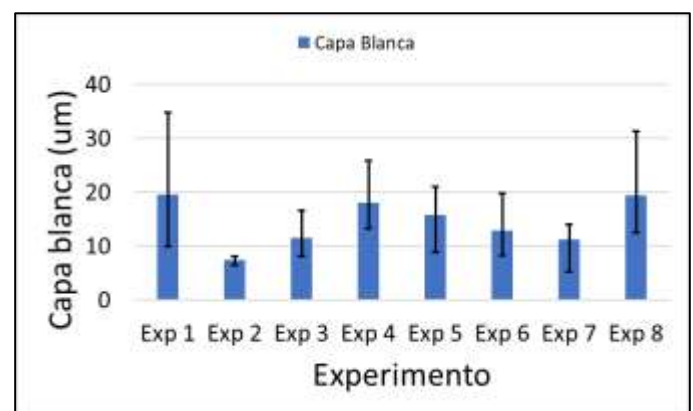


Figura 12 Desviación estándar para la capa blanca

Sin embargo es evidente en la figura 13 que si se aumenta el tamaño de grano o la velocidad de la probeta el tamaño de la capa blanca va a aumentar, caso contrario con la carga que al aumentarse, la formación de la WEL va a tender a disminuir evento que igualmente se plantea en la figura 14 donde se muestra que los parámetros de operación principales (carga, velocidad de la probeta y tipo de grano) por si solos no son relevantes en la formación



de la capa blanca, aunque es preciso aclarar que para haber obtenido un resultado más conciso hubiese sido necesario un mayor número de corridas en la experimentación para que los resultados no se presentaran tan dispersos en cada replica, pero a su vez en dicha figura se evidencia que los resultados obtenidos en la interacción de los efectos dobles si son mucho más relevantes y tienen una gran influencia en la generación de la capa blanca principalmente en la combinación de la carga y la velocidad de la probeta lo que es un factor que ayuda a corroborar los resultados mostrados en la tabla 7.

mayor fricción y calor en la superficie del riel. Esta combinación aumenta las posibilidades de generación de la capa blanca, ya que se concentra más energía térmica en un área específica durante un tiempo prolongado. Por otro lado, una carga baja y una velocidad alta pueden resultar en una menor generación de calor, lo que reduce el riesgo de formación de la capa blanca.

Otra interacción de los parámetros que es relevante en la formación de la capa blanca al momento de esmerilar los aceros R350HT de los rieles es la combinación del tipo de grano y la velocidad debido a que un tamaño de grano fino y velocidad de esmerilado alta puede aumentar la generación de calor en la superficie del riel debido a la mayor fricción y este aumento significativo de la temperatura puede favorecer la formación de la capa blanca en el acero de los rieles, en tanto un tamaño de grano grueso y velocidad de esmerilado baja, es posible que la acción de corte no sea tan precisa y eficiente lo que puede resultar en una mayor presión ejercida sobre el acero de los rieles y en consecuencia, un aumento de la generación de calor donde este calor adicional puede aumentar el riesgo de formación de la capa blanca.

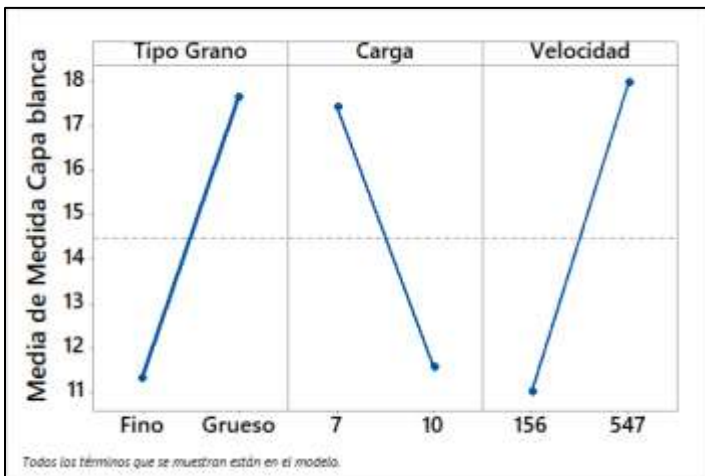


Figura 13 Efectos principales para la generación de capa blanca

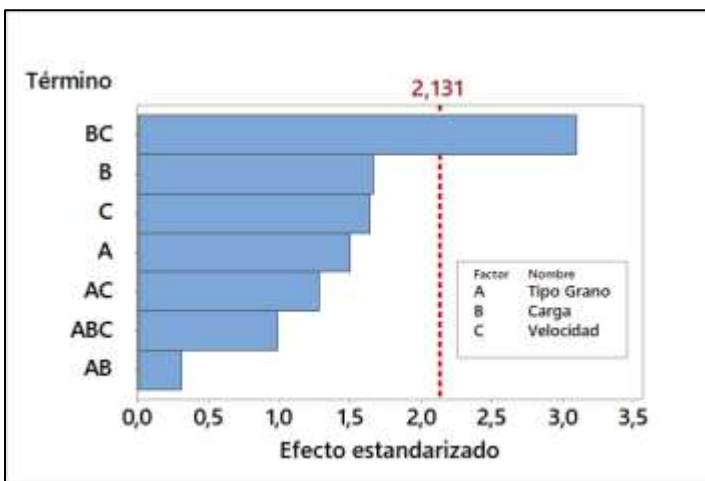


Figura 14 Diagrama de Pareto de efectos para los efectos estandarizados frente a la formación de capa blanca

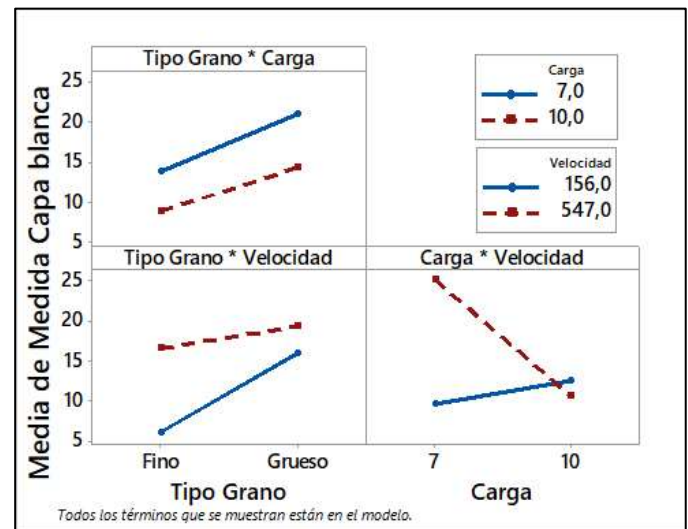


Figura 15 Interacción de factores principales en la generación de capa blanca

En resumen, se puede afirmar que la formación de la WEL (capa blanca) va a estar directamente relacionada con la combinación de la carga y la velocidad en su mayor proporción (ver figura 15) debido a que una carga alta combinada con una velocidad baja de esmerilado puede generar una

En las figuras 16 y 17 se muestra la morfología y el tamaño para cada una de las condiciones de esmerilado del acero de rieles R350HT, donde se puede comprobar de manera visual y mediante la microscopia óptica que donde mayor formación de capa blanca se presentó fue cuando hubo interacción directa entre la carga y la velocidad

resultando una formación más grande de la WEL, lo que podría generar problemas de agrietamiento en los rieles al igual que el endurecimiento superficial del mismo.

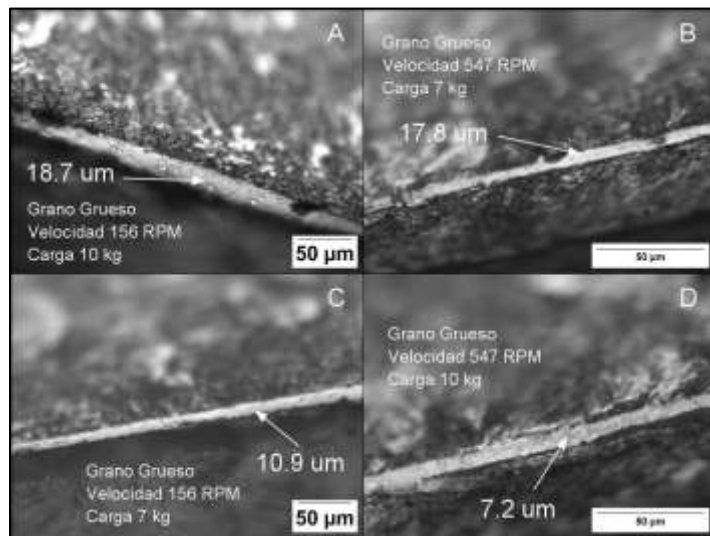


Figura 16 Metalografía de generación de la WEL para grano grueso Variando la velocidad y la carga

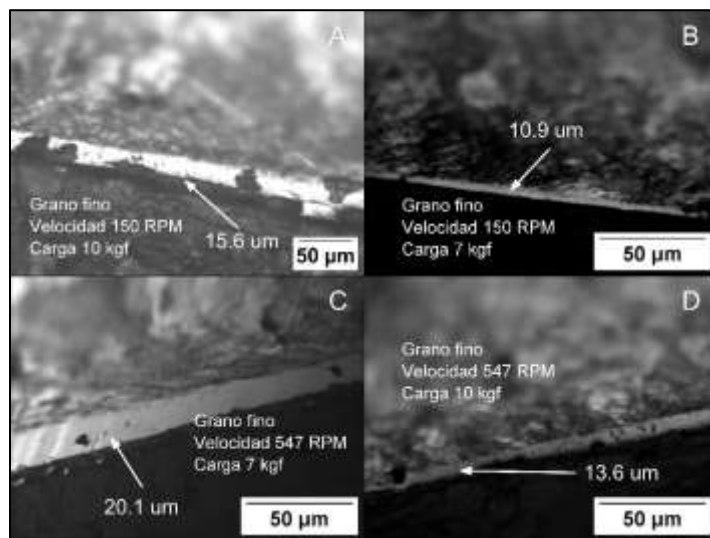


Figura 17 Metalografía de generación de la WEL para grano fino Variando la velocidad y la carga

### 3. Conclusiones

Después de las pruebas de esmerilado de acero R350HT en laboratorio, controlando parámetros como carga, velocidad de la probeta y tipo de grano de la piedra de esmerilado, se encontró que la generación de capa blanca (WEL), va a depender en mayor proporción de la interacción directa de la carga y la velocidad con la que se realice el proceso

El tamaño de la capa blanca que se formó en los procesos de esmerilado para procesos realizados a velocidades de 156 y 547 RPM, con cargas de 7 y 10 Kg y piedras de esmerilado de 16 y 32 granos por centímetro cuadrado va a variar entre 7.5 micras y 19.6 micras dependiendo de la variación de los parámetros anteriormente mencionados.

La interacción entre la carga, la velocidad de esmerilado y el tipo de grano no se puede describir en términos simples. Cada uno de estos factores puede influir en la generación de la capa blanca de manera compleja y depende de las características específicas del acero de los rieles y las condiciones de esmerilado. Es importante considerar todos estos factores de manera integral y realizar ajustes adecuados durante el proceso de esmerilado para minimizar la formación de la capa blanca y obtener resultados óptimos.

Es importante tener en cuenta que la generación de la capa blanca no siempre se puede evitar por completo durante el esmerilado de acero de rieles, pero se puede minimizar mediante el control cuidadoso de las condiciones de esmerilado y el uso de técnicas adecuadas.

Debido a que la experimentación se hizo en un montaje donde la aplicación de la carga era aplicada de manera manual por medio de un operario se pudo observar que en algunas de las pruebas no se aplicó de manera uniforme lo que induce a errores en el esmerilado, pero igualmente se asemeja a la manera en que se realiza dicho proceso en la actualidad.

La tasa de desgaste va a estar altamente influenciada por el tipo de grano y por la velocidad de la probeta mas no por la carga, generando diferentes temperaturas que finalmente van a generar la aparición de la capa blanca en los rieles esmerilados.

## Agradecimientos:

El autor desea agradecer a la Institución Universitaria Pascual Bravo, a la universidad Nacional de Colombia (sede Medellín) y al Metro de Medellín por el apoyo brindado.

## Referencias Bibliográficas

- [1] K. Zhou, H. Ding, M. Steenbergen, W. Wang, J. Guo, and Q. Liu, "Temperature field and material response as a function of rail grinding parameters," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 175, p. 121366, 2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121366.
- [2] Rail Corp, "Rail Defects Handbook," *Transp. New South Wales - RAILCORP*, no. June 2012, pp. 1–83, 2012, [Online]. Available: <http://www.asa.transport.nsw.gov.au/sites/default/files/asa/railcorp-legacy/disciplines/civil/tmc-226.pdf>
- [3] C. J. Rasmussen, S. Fæster, S. Dhar, J. V. Quaade, M. Bini, and H. K. Danielsen, "Surface crack formation on rails at grinding induced martensite white etching layers," *Wear*, vol. 384–385, pp. 8–14, 2017, doi: 10.1016/j.wear.2017.04.014.
- [4] H. Zhu *et al.*, "Understanding and treatment of squat defects in a railway network," *Wear*, vol. 442–443, no. January, 2020, doi: 10.1016/j.wear.2019.203139.
- [5] R. X. Wang *et al.*, "Effects of abrasive material and hardness of grinding wheel on rail grinding behaviors," *Wear*, vol. 454–455, no. April, p. 203332, 2020, doi: 10.1016/j.wear.2020.203332.
- [6] M. Steenbergen, "Rolling contact fatigue in relation to rail grinding," *Wear*, vol. 356–357, pp. 110–121, 2016, doi: 10.1016/j.wear.2016.03.015.
- [7] J. Wu, R. H. Petrov, M. Naeimi, Z. Li, R. Dollevoet, and J. Sietsma, "Laboratory simulation of martensite formation of white etching layer in rail steel," *Int. J. Fatigue*, vol. 91, pp. 11–20, 2016, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2016.05.016.
- [8] Z. Y. Zhang *et al.*, "Thermal model and temperature field in rail grinding process based on a moving heat source," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 106, no. June, pp. 855–864, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.06.071.
- [9] H. Jamshidi and E. Budak, "Grinding temperature modeling based on a time dependent heat source," *Procedia CIRP*, vol. 77, pp. 299–302, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.09.020.
- [10] A. K. Saxena, A. Kumar, M. Herbig, S. Brinckmann, G. Dehm, and C. Kirchlechner, "Micro fracture investigations of white etching layers," *Mater. Des.*, vol. 180, p. 107892, 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.107892.
- [11] M. Steenbergen, "Squat formation and rolling contact fatigue in curved rail track," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 143, pp. 80–96, 2015, doi: 10.1016/j.engfracmech.2015.05.060.
- [12] S. Zhang, K. Zhou, H. Ding, J. Guo, Q. Liu, and W. Wang, "Effects of grinding passes and direction on material removal behaviours in the rail grinding process," *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 11, 2018, doi: 10.3390/ma11112293.
- [13] E. Uhlmann, P. Lypovka, L. Hochschild, and N. Schröer, "Influence of rail grinding process parameters on rail surface roughness and surface layer hardness," *Wear*, vol. 366–367, pp. 287–293, 2016, doi: 10.1016/j.wear.2016.03.023.
- [14] Q. Lian, G. Deng, H. Zhu, H. Li, X. Wang, and Z. Liu, "Influence of white etching layer on rolling contact behavior at wheel-rail interface," *Friction*, vol. 8, no. 6, pp. 1178–1196, 2020, doi: 10.1007/s40544-020-0388-x.
- [15] A. Al-Juboori *et al.*, "Squat formation and the occurrence of two distinct classes of white etching layer on the surface of rail steel," *Int. J. Fatigue*, vol. 104, pp. 52–60, 2017, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2017.07.005.
- [16] H. W. Zhang, S. Ohsaki, S. Mitao, M. Ohnuma, and K. Hono, "Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 421, no. 1–2, pp. 191–199, 2006, doi: 10.1016/j.msea.2006.01.033.
- [17] W. Lojkowski, M. Djahanbakhsh, G. Bürkle, S. Gierlotka, W. Zielinski, and H. J. Fecht, "Nanostructure formation on the surface of railway tracks," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 303, no. 1–2, pp. 197–208, 2001, doi: 10.1016/S0921-5093(00)01947-X.
- [18] B. Lin, K. Zhou, J. Guo, Q. Y. Liu, and W. J. Wang, "Influence of grinding parameters on surface temperature and burn behaviors of grinding rail," *Tribol. Int.*, vol. 122, pp. 151–162, 2018, doi: 10.1016/j.triboint.2018.02.017.
- [19] P. A. Cuervo Velásquez and A. Toro Betancur, "Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín," *Univ. Nac. Colomb.*, p. 202, 2014, [Online]. Available: <http://www.bdigital.unal.edu.co/43333/1/21533480.2014.pdf>
- [20] W. J. Wang, K. K. Gu, K. Zhou, Z. B. Cai, J. Guo, and Q. Y. Liu, "Influence of granularity of grinding stone on grinding force and material removal in the rail grinding process," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, vol. 233, no. 2, pp. 355–365, 2019, doi: 10.1177/1350650118779495.
- [21] K. H. Z. Gahr, "Wear by hard particles," *Tribol. Int.*, vol. 31, no. 10, pp. 587–596, 1998, doi: 10.1016/S0301-679X(98)00079-6.
- [22] K. Zhou, H. H. Ding, S. Y. Zhang, J. Guo, Q. Y. Liu, and W. J. Wang, "Modelling and simulation of the grinding force in rail grinding that considers the swing angle of the grinding stone," *Tribol. Int.*, vol. 137, no. May, pp. 274–288, 2019, doi: 10.1016/j.triboint.2019.05.012.