

ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO EN  
SECO DE FUNDICIONES BLANCAS DE ALTO CROMO

LAURA DANIELA OTÁLORA FAJARDO  
NATALY QUINTERO HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA

2020

ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO EN  
SECO DE FUNDICIONES BLANCAS DE ALTO CROMO

AUTORAS:

LAURA DANIELA OTÁLORA FAJARDO  
NATALY QUINTERO HERNÁNDEZ

Trabajo de Grado (Modalidad, pasantía de investigación) para optar al título de  
Ingeniera Metalúrgica

Director:

Dr. CRISTIAN CAMILO VIÁFARA ARANGO  
Doctor en Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA

2020

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a mi mamá Ximena, mi mamá Flor Alba y mi papá Lucho, por todo el amor, el apoyo y las enseñanzas que me han brindado a lo largo de mi vida.*

*A mis hermanas, por ser cómplices en este camino.*

*A mis tías, por siempre creer en mí.*

*A Gabby y Eddy, por llenarme siempre de alegría.*

*Laura Daniela*

*Dedico este trabajo en memoria de mi padre Orlando, por haberme enseñado buenos valores y por haberme alentado siempre a ser mejor.*

*A mi madre Myriam, por su apoyo, esfuerzo y oraciones constantes y por su amor incondicional.*

*A mi hermana Viviana, mi cuñado Edward y mi sobrina Mariana Lucía por ayudarme en cada meta, sueño y objetivo planteado.*

*Nataly*

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseamos expresar nuestros más sinceros agradecimientos al Dr. Cristian Camilo Viáfara Arango, por la dedicación y apoyo que nos ha brindado en nuestro paso por la universidad, especialmente por su dirección, rigor y empeño que conllevó a la realización de este proyecto. Gracias por confiar y motivarnos a dar lo mejor de nosotras.

A la Profesora Geralda Cristina Durães de Godoy por su amabilidad, colaboración y recibimiento en el grupo de investigación de Modificação e Caracterização de Superfícies del departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais de la Universidad Federal de Minas Gerais.

Al profesor Witor Wolf del departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais de la Universidad Federal de Minas Gerais por apoyarnos y compartir sus conocimientos en la asignatura de tribología.

Al estudiante de doctorado Cláudio Gonçalves de Oliveira miembro del grupo de investigación de Modificação e Caracterização de Superfícies por su recibimiento y por proveernos las muestras.

A los estudiantes de maestría Anderson, Vinicius y João y al entonces estudiante de doctorado Mario, por el apoyo, paciencia y colaboración en los laboratorios del grupo de investigación Modificação e Caracterização de Superfícies del departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

A todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander por las enseñanzas impartidas, las cuales fundamentaron de manera integral nuestra formación personal y profesional.

A las funcionarias administrativas de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica Yaddy,  
Patricia y Nathalia por su disponibilidad para ayudarnos.

A los técnicos de la escuela de Ingeniería Metalúrgica: Domingo, Ambrosio, Javier,  
Mario, Sergio y Oscar por su ayuda y orientación a lo largo de nuestra carrera  
universitaria.

A nuestros compañeros de toda la carrera, por apoyarnos y brindarnos su amistad.  
Especialmente, Estefanía Pinzón, Breyner Parada, Jhon Álvarez y David Peña,  
con los que siempre compartimos grandes momentos.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	8
2. OBJETIVOS.....	11
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3. MARCO TEÓRICO .....	12
3.1 TRIBOLOGÍA.....	12
3.2 CONTACTO ENTRE SUPERFICIES.....	13
3.3 RUGOSIDAD SUPERFICIAL.....	14
3.4 DESGASTE .....	16
3.4.1 Desgaste por deslizamiento .....	17
3.4.2 Ensayo pin sobre Disco.....	19
3.5 FUNDICIONES BLANCAS DE ALTO CROMO.....	20
4. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL .....	22
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....	22
4.2 ENSAYO DE DESGASTE.....	23
4.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES DESGASTADAS .....	25
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	26
5.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES .....	26
5.2 COEFICIENTE DE FRICCIÓN.....	30
5.3 DESGASTE .....	32
5.4 INFLUENCIA DE LA MICROESTRUCTURA EN EL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO.....	34
5.5 INFLUENCIA DEL DESGASTE EN LA TOPOGRAFÍA SUPERFICIAL .....	38

6. CONCLUSIONES .....41  
BIBLIOGRAFÍA.....42  
ANEXOS .....42

## INTRODUCCIÓN

La degradación de las superficies de los materiales es un grave problema de ingeniería, ya que además de causar una gran pérdida económica, puede ser la causa de fallas graves de componentes en un sistema mecánico. Los daños ocasionados por el desgaste de piezas en un equipo ocasionan recambio de partes en la maquinaria continuamente, provocando tiempos de parada de la producción generalmente grandes lo cual se traduce en pérdidas<sup>1</sup>.

En los últimos años, la investigación en tribología ha alcanzado una etapa muy avanzada desde un punto de vista teórico y experimental, con aplicación en todos los sectores de la industria. Aprender más sobre los fenómenos tribológicos ha llevado a mejoras en los sistemas mecánicos como: la reducción del desgaste y la probabilidad de falla, el aumento de la eficiencia energética, la reducción de los costos de mantenimiento y reparación, el ahorro en materias primas y la reducción del ruido y la vibración<sup>2</sup>. La tribología se ha integrado profundamente en la ciencia, la ingeniería, el diseño, la fabricación y la gestión del ciclo de vida en una amplia gama de áreas de aplicación.

Una forma de resolver los problemas tribológicos consiste en realizar ensayos de laboratorio los cuales permiten establecer relaciones entre las microestructuras de los materiales y su comportamiento tribológico sin definir una aplicación industrial particular. Los resultados obtenidos se pueden utilizar para la selección preliminar

---

<sup>1</sup> Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). Tribology: friction and wear of engineering materials. Butterworth-Heinemann.

<sup>2</sup> Holmberg, K., & Erdemir, A. (2017). Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. Friction, 5(3), 263-284.

de materiales y determinar la influencia de variables operativas como la presión de contacto, la velocidad de deslizamiento y el entorno<sup>3</sup>.

Las fundiciones blancas de alto cromo se utilizan principalmente en la industria minera, petrolífera y en general aplicaciones que requieran alta resistencia al desgaste y a la corrosión. Se utilizan como contactos deslizantes y rodantes, como revestimientos de tolvas, placas de las líneas de alimentación, pantallas y rodillos para el laminado en caliente, donde se requieren materiales de alta resistencia al desgaste por deslizamiento y fatiga por contacto rodante<sup>4</sup>. Los intentos de mejorar la resistencia al desgaste en fundiciones blancas con alto contenido de cromo han llevado a los investigadores a probar diferentes elementos de aleación como vanadio, tungsteno, titanio y niobio. Esta estrategia se aplica para mejorar la tenacidad de las aleaciones de hierro blanco, así como la resistencia al desgaste en condiciones de deslizamiento, la cual implica el refinamiento de la estructura de carburo eutéctico mediante la producción de carburos más finos<sup>5</sup>.

En el grupo de investigación de Modificação e Caracterização de Superfícies de la Univerdade Federal de Minas Gerais (UFMG) se vienen estudiando cuatro tipos de fundiciones blancas con alto contenido de cromo y molibdeno (FBCrMo), aleadas

---

<sup>3</sup>Zum Gahr, K. H. (1987). *Microstructure and wear of materials* (Vol. 10). Elsevier.

<sup>4</sup> Bedolla-Jacuinde, A., Correa, R., Mejia, I., Quezada, J. G., & Rainforth, W. M. (2007). The effect of titanium on the wear behaviour of a 16% Cr white cast iron under pure sliding. *Wear*, 263(1-6), 808-820.

<sup>5</sup> Scandian, C., Boher, C., De Mello, J. D. B., & Rezai-Aria, F. (2009). Effect of molybdenum and chromium contents in sliding wear of high-chromium white cast iron: The relationship between microstructure and wear. *Wear*, 267(1-4), 401-408.

con niobio (FBCrMoNb), boro (FBCrMoB) y niobio y boro (FBCrMoNbB)<sup>6-7</sup>. El desgaste por deslizamiento es una de las mayores causas de deterioro en elementos como los cilindros de laminación y las cintas alimentadoras en minería sin embargo solo ha habido un número limitado de investigaciones relacionadas con el desgaste por deslizamiento en las fundiciones blancas de alto cromo<sup>8</sup>. En este trabajo se realizó un análisis de la resistencia al desgaste por deslizamiento de las cuatro aleaciones mediante la ejecución del ensayo Pin-sobre-disco, bajo condiciones de prueba las cuales fueron establecidas a partir de una revisión de la literatura y experimentación previa.

---

<sup>6</sup> Oliveira, C.G. Estudo do desgaste abrasivo de ferro fundido branco alto cromo com adição de nióbio e boro em testes de laboratório e campo. Tesis de doctorado en Engenharia Metalúrgica e Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, Brasil.

<sup>7</sup> Pacheco, D. (2018) Caracterização estrutural e propriedades mecânicas e tribológicas de ferro fundido branco alto cromo com adição de nióbio, Tesis de maestria en Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, Brasil.

<sup>8</sup> Hanlon, D. N., Rainforth, W. M., & Sellars, C. M. (1999). The rolling/sliding wear response of conventionally processed and spray formed high chromium content cast iron at ambient and elevated temperature. *Wear*, 225, 587-599.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Estudiar la resistencia al desgaste por deslizamiento en seco de 4 fundiciones blancas de alto cromo con diferentes aleantes.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Analizar el comportamiento tribológico de los materiales mediante la comparación de los coeficientes de fricción y las tasas de desgaste.
2. Comparar las características microestructurales de las aleaciones y su respuesta tribológica.
3. Relacionar las tasas de desgaste con la topografía superficial de las muestras desgastadas.

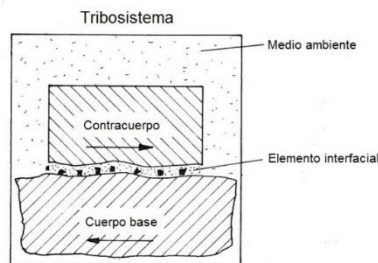
### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Tribología

El transporte, la generación de energía y la manufactura son actividades industriales vitales en la sociedad moderna que implican diferentes tipos de máquinas y sistemas mecánicos que tienen numerosas partes móviles y, por lo tanto, superficies que interactúan. Es inevitable que las piezas que trabajan en contacto entre sí en muchas líneas de producción y control de la industria estén sujetas a desgaste con el tiempo. Las operaciones confiables y duraderas de tales máquinas dependen mucho de qué tan bien se controlen la fricción y el desgaste en las superficies en contacto. La ciencia y la tecnología para comprender y controlar la fricción, el desgaste y la lubricación de tales superficies que interactúan en movimiento relativo se han denominado con el término tribología desde 1966<sup>2</sup>.

Uno de los pilares más importantes de la tribología es el tribosistema, el cual es un modelo de representación de las superficies en contacto que se establece para realizar un análisis de forma aislada. Este consta de cuatro partes fundamentales: cuerpo base, contra-cuerpo, elemento interfacial y medio circundante<sup>3</sup>. En la figura 1 se presenta de manera esquemática el sistema tribológico y sus elementos principales.

Figura 1. Representación esquemática del tribosistema.



Fuente: Goryacheva, I. G. (2013). Contact mechanics in tribology (Vol. 61). Springer Science & Business Media.

Para una resolución óptima de problemas relacionados con desgaste, tienen que conocerse todas las magnitudes de influencia de un sistema tribológico. Cada elemento del sistema tiene un efecto sobre el comportamiento de este, el cual en general cambia con el tiempo debido a la acción de la fricción y el desgaste. Esto puede resultar en un cambio del comportamiento funcional del sistema ya sea deseado o no (daño). Es importante tener en cuenta que los resultados obtenidos en un ensayo de desgaste utilizando un sistema tribológico determinado no deben ser generalizados para usarlos en otros estudios incluso si los elementos del tribosistema estudiado son similares<sup>9</sup>.

### **3.2 Contacto entre superficies**

La interacción de dos superficies se manifiesta por la disipación de energía por fricción, la modificación de las características superficiales (rugosidad), la alteración de las propiedades mecánicas (dureza) y / o la pérdida de material (desgaste). Es necesario reconocer la naturaleza original de las superficies para comprender la interacción que se da entre ellas, si éstas se encuentran libres de contaminantes u óxidos. Para comprender los mecanismos de fricción y desgaste es fundamental reconocer que no existe una superficie perfectamente plana a escala microscópica<sup>10</sup>.

Es importante tener en cuenta que cuando dos superficies entran en contacto, hay un área aparente de contacto y un área real de contacto, antes de definir los mecanismos principales que interactúan en una interfaz tribológica en movimiento

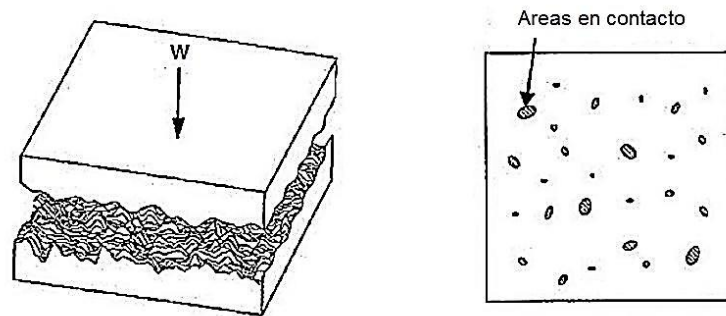
---

<sup>9</sup> Goryacheva, I. G. (2013). Contact mechanics in tribology (Vol. 61). Springer Science & Business Media.

<sup>10</sup> Bhushan, B. (1999). Principles and applications of tribology. New York: John Willey & Sons. 198-199-254.

relativo. El área de contacto real está formada por la suma de todos los puntos discretos donde las dos superficies están contacto como se muestra en la figura 2. El área aparente es la que solo tiene en cuenta la superficie total de los cuerpos en contacto. Es por esta razón que el área de contacto real es una función de la rugosidad, las propiedades interfaciales del material (elasticidad y plasticidad) y las condiciones de carga aplicadas<sup>11</sup>.

Figura 2. Áreas de contacto real entre de las superficies.



FUENTE: Bhushan, B. (1999). Principles and applications of tribology. New York: John Willey & Sons. 198-199-254

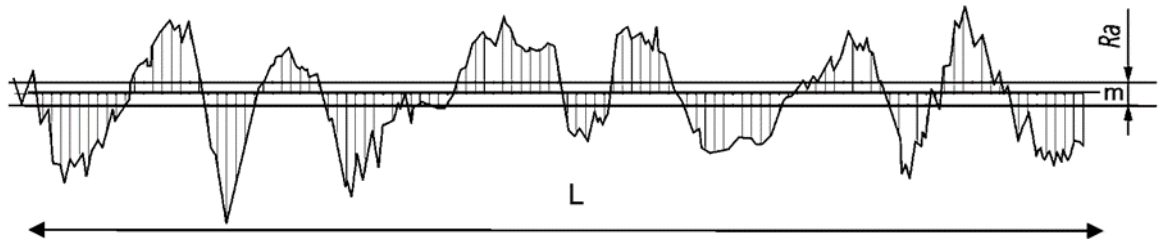
### 3.3 Rugosidad superficial

La superficie de los materiales puede ser caracterizada como irregular o rugosa si es analizada a una escala lo suficientemente fina. Esta característica influye notoriamente en el comportamiento tribológico de los materiales ya que afecta directamente el área real de contacto, la fricción entre materiales, la lubricación y otras características relevantes al sistema. La rugosidad representa las pequeñas

irregularidades en la superficie y se debe diferenciar del error de forma que es la medida de desviación de la forma entre la superficie obtenida y la deseada<sup>11</sup>.

Para medir la topografía superficial de los materiales se utilizan diferentes métodos de caracterización que ofrecen varios rangos de definición. Estos métodos de cuantificación utilizan la variación de altura entre un punto de la superficie y un plano de referencia para dar un valor de rugosidad superficial<sup>8</sup>. La media de rugosidad más usada y universalmente conocida es “Ra” (roughness average), la cual está definida como una media aritmética de los desvíos de altura de la superficie con respecto a la línea media del perfil  $m$ , como se muestra en la figura 3<sup>11</sup>. Esta línea media separa las áreas del perfil de tal modo que el área superior a la línea y el área inferior a la línea sean iguales<sup>11</sup>.

Figura 3. Representación de  $Ra$  con respecto la línea media  $m$  en una longitud determinada.



Fuente: MITUTOYO, A. C. (2016) quick guide to surface roughness measurement, Reference guide for laboratory and workshop, Bulletin No. 2229.

Sin embargo,  $Ra$  por sí misma no puede dar una descripción completa de la rugosidad superficial por lo que otros parámetros como  $Rq$ , rugosidad del desvío medio cuadrático,  $Rt$ , máxima distancia entre pico y valle,  $Rz$ , promedio de las distancias entre pico y valle,  $Rp$  máxima altura de pico y  $Rv$ , máxima profundidad

<sup>11</sup> MITUTOYO, A. C. (2016) quick guide to surface roughness measurement, Reference guide for laboratory and workshop, Bulletin No. 2229.

de los valles, complementan la caracterización superficial y dan un mejor entendimiento de esta. Todos estos parámetros tienen como referencia la línea media del perfil de la superficie de un material<sup>11</sup>.

Si se establece el perfil de rugosidad de la superficie como una función de densidad de amplitudes,  $P(y)$ , que representan la probabilidad de encontrar un punto a determinada altura, se usan parámetros como  $Rsk$ , “Skewness” que representa la simetría del perfil y  $Rku$  “Kurtois” siendo este la agudeza de pico o “sharpness” del perfil de la superficie.

### **3.4 Desgaste**

El desgaste puede definirse como el daño a una superficie sólida, que generalmente implica una pérdida progresiva de material, debido al movimiento relativo entre esa superficie y un material o sustancia en contacto. El desgaste se determina como la pérdida de volumen de superficies sólidas en contacto móvil<sup>12</sup>.

Los coeficientes de fricción y desgaste no son propiedades intrínsecas de los materiales sino dos tipos de respuestas de un tribosistema. Siempre están razonablemente relacionados entre sí cuando las funciones necesarias del tribosistema están bien consideradas. Las variaciones en la fricción y el desgaste pueden explicarse debido al efecto de la rugosidad de la superficie, la dureza, la ductilidad, las películas de óxido y los procesos de transferencia de material<sup>12</sup>. Para metales que se deslizan contra metales en condiciones no lubricadas, se observa uno o varios de los siguientes procesos: el crecimiento de óxido en capas superficiales; adsorción de humedad y fractura de la capa superficial; deformación plástica y cambios microestructurales de las capas superficiales; transferencia adhesiva de material entre las contrapartes; aglomeración; compactación y

---

<sup>12</sup> Davim, J. P. (Ed.). (2011). Tribology for engineers: A practical guide. Elsevier.

molienda mecánica de partículas de desgaste; cambios en la morfología superficial y la rugosidad en el contacto<sup>12</sup>.

**3.4.1 Desgaste por deslizamiento.** El desgaste por deslizamiento se define como un movimiento relativo entre dos superficies sólidas en contacto bajo carga causando daño superficial. El daño por contacto que ocurre durante el movimiento de deslizamiento en materiales metálicos generalmente se caracteriza por deformación plástica y oxidación. El proceso se cuantifica por la tasa de desgaste que se define como el volumen o la masa del material eliminado por unidad de tiempo o por unidad de distancia de deslizamiento, como es representado en la figura 4. La tasa de desgaste generalmente no es constante es decir puede comenzar baja y luego aumentar, o viceversa.

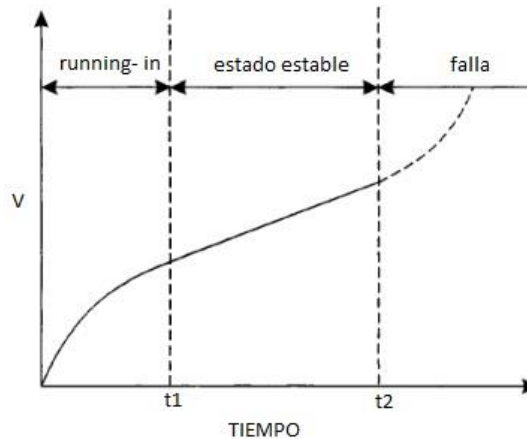
Durante el deslizamiento ocurren transiciones en los mecanismos de fricción y cambios en las condiciones de acoplamiento de las superficies. La figura 4 muestra una curva típica obtenida en un ensayo de fricción. Durante un primer período llamado tiempo de ajuste inicial o running-in, el coeficiente de fricción puede variar ampliamente bien creciendo o bien disminuyendo. En este período pueden ocurrir distintos fenómenos: que las asperezas sean deformadas o bien desgastadas por lo que las superficies se pueden acoplar mejor, que las películas superficiales iniciales se desgasten (óxidos, contaminantes, etc.) o que se formen nuevas películas estables. Después del tiempo de ajuste inicial, generalmente breve, la fuerza de fricción se estabiliza. El valor medio de la fricción medida durante el período estable se considera como el coeficiente de fricción del par ensayado. Dado que se trata de un ensayo de fricción de múltiples pasadas, el estado de la pista de deslizamiento en la muestra puede degenerar y después de un largo período estable puede ocurrir un aumento abrupto de la fricción, en general catastrófico<sup>13</sup>. La utilidad de los coeficientes de desgaste o los datos de desgaste presentados en la literatura

---

<sup>13</sup> Luengo López, Ó. (2008). Estudio tribológico de fricción y desgaste de capas de aleación NiP.

publicada radica más en sus magnitudes relativas es decir su relación con los elementos del sistema tribológico y las características de los componentes que en sus valores absolutos<sup>14</sup>.

Figura 4. Curva experimental típica de volumen de desgaste vs tiempo de deslizamiento.



Fuente: Bhushan, B., & Ko, P. L. (2003). Introduction to tribology. Appl. Mech. Rev., 56(1), B6-B7.

Se han desarrollado muchos modelos cuantitativos para el desgaste por deslizamiento, pero uno de los más simples es el desarrollado por Archard. El modelo de Archard no es válido en todos los casos porque el proceso de desgaste es complejo e involucra múltiples variables como la naturaleza microestructural de los materiales. Sin embargo, es particularmente valioso como un medio para comparar las tasas de desgaste y comprender el comportamiento del material en diferentes condiciones. El modelo Archard para el desgaste por deslizamiento sugiere que el desgaste se asocia con interacciones entre asperezas que se deforman plásticamente (puntos altos) en las superficies de deslizamiento, y conduce a la ecuación simple<sup>9</sup>:

<sup>14</sup> Bhushan, B., & Ko, P. L. (2003). Introduction to tribology. Appl. Mech. Rev., 56(1), B6-B7.

$$Q = \frac{KW}{H}$$

**Ecuación 1.** Ecuación de desgaste de Archard.

Donde Q es el volumen de material eliminado de la superficie por desgaste por unidad de distancia de deslizamiento, W es la carga normal aplicada entre las superficies, K el coeficiente de desgaste y H es la dureza de la superficie más blanda.

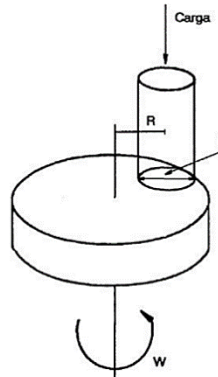
**3.4.2 Ensayo pin sobre Disco** Los materiales de cualquier tipo que son sometidos a deslizamiento sufren desgaste, este es posible evaluarlo con una máquina tribológica de configuración de pin sobre disco cuyo procedimiento de operación se basa en la norma ASTM G99-17 “Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on- Disk Apparatus”. Los resultados dependen en gran medida del grado de simulación de la prueba con la aplicación, entre ellos: propósito de la prueba, características de la máquina, carga aplicada, distancia de deslizamiento, velocidad de deslizamiento, propiedades de los materiales, tamaño y forma del pin, par de materiales, medio ambiente y habilidad del operador entre otros<sup>15</sup>. El movimiento relativo entre pin y disco puede variar entre un diseño y otro. Cualquiera de ellos puede realizar el giro, y generar una trayectoria circular. En la Figura 5, además de la configuración del principio bajo el cual opera la máquina de este tipo, se aprecian algunos de los elementos que la constituyen. En cualquier caso, la trayectoria de la huella de desgaste siempre es de forma circular<sup>16</sup>.

---

<sup>15</sup> Hutchings, I. M. (2001). Wear and lubrication. 9551-9556.

<sup>16</sup> ASTM NORMA G99-17, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on- Disk Apparatus. ASTM Copyright. United States of America.

Figura 5. Sistema de prueba de desgaste de pin sobre disco, donde  $d$  es el diámetro del pin,  $R$  es el radio de la trayectoria de desgaste y  $W$  es la velocidad de rotación del disco.



Fuente<sup>17</sup>: Bayer, R. G. (1994). Mechanical wear prediction and prevention. Marcel! Dekker, Inc, P. O. Box 5005, Monticello, NY 12701-5185, USA, 1994. 657.

### 3.5 Fundiciones blancas de alto cromo

El hierro fundido con alto contenido de cromo es uno de los materiales resistentes al desgaste más utilizados en una variedad de aplicaciones donde la estabilidad en un entorno agresivo es un requisito principal. La microestructura está compuesta de carburos primarios eutécticos (tipo  $M_7C_3$ ) en una matriz de hierro más blanda (es decir, austenítico, martensítico, ferrítico, perlítico o bainítico). La presencia de una fracción de alto volumen de carburos duros de tipo  $M_7C_3$  es el principal responsable de la excelente resistencia al desgaste que proporcionan este tipo de aleaciones. Sin embargo, los mismos carburos también son responsables de la fragilidad observada que a veces limita su uso en aplicaciones donde se experimenta un impacto repetitivo. Por lo tanto, la resistencia a la fractura es una propiedad importante en el desarrollo de aleaciones con alto contenido de cromo.

---

<sup>17</sup> Bayer, R. G. (1994). Mechanical wear prediction and prevention. Marcel! Dekker, Inc, P. O. Box 5005, Monticello, NY 12701-5185, USA, 1994. 657.

Dado que se requiere una alta proporción de carburos en la estructura para maximizar la resistencia al desgaste, muchos investigadores han tratado de mejorar la tenacidad mediante modificaciones en la estructura del carburo. Al agregar los elementos de aleación se forman carburos adicionales como  $M_6C$  o  $M_2C$  y  $MC$ , las extensas aplicaciones industriales han atraído a los investigadores a probar diferentes elementos formadores de carburo como Ti, V, Nb, Mo y W, estos elementos mejoran la capacidad de endurecimiento del material. Además, otros enfoques efectivos para mejorar la resistencia al desgaste y la corrosión de las fundiciones blancas de alto cromo incluyen la aplicación del tratamiento térmico apropiado<sup>18</sup>. Estos estudios han encontrado, con diversos grados de éxito, que la dureza de los hierros fundidos puede mejorarse disminuyendo la proporción de carburos en la estructura, disminuyendo el tamaño del carburo, aumentando el espacio entre los carburos y modificando la forma del carburo. Además, se ha observado que la resistencia al desgaste mejora en condiciones de deslizamiento, cuando los carburos son más pequeños y están menos interconectados<sup>8</sup>.

La mayor parte de la investigación tribológica sobre las fundiciones blancas trata de la resistencia a la abrasión de dos o tres cuerpos con una amplia gama de elementos de aleación, bajo diversas condiciones de procesamiento y tratamientos térmicos. En general, la resistencia al desgaste depende de la microestructura de la matriz, los tipos, fracción volumétrica y características de carburo (tamaño, morfología, distribución, orientación), la resistencia a la fractura y la dureza de las aleaciones. También depende de las condiciones de carga, las características de los entornos tribológicos, el movimiento relativo de la superficie de contacto y el tipo y tamaño de los cuerpos abrasivos<sup>5</sup>.

---

<sup>18</sup> Lu, H., Li, T., Cui, J., Li, Q., & Li, D. Y. (2017). Improvement in erosion-corrosion resistance of high-chromium cast irons by trace boron. *Wear*, 376, 578-586.

## 4. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

La presente investigación de las autoras se basó en el trabajo desarrollado durante la estancia de investigación en el departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG). Esta estancia se realizó en el periodo 2019-I en un trabajo conjunto con el grupo de investigación Modificação e Caracterização de Superfícies a cargo de la profesora Geralda Cristina Durães de Godoy. Esta colaboración tenía como fin analizar el desgaste por deslizamiento en fundiciones blancas con alto contenido de cromo, como contribución al trabajo de doctorado de Cláudio Gonçalves de Oliveira, miembro del grupo de investigación mencionado. El soporte documental de la realización de la pasantía de investigación se presenta en el Anexo A.

Para la realización del presente estudio se utilizaron muestras en forma de disco de cuatro diferentes aleaciones, fundiciones blancas con alto contenido de cromo y con adición de molibdeno, boro y niobio. Todas las muestras fueron sometidas a un tratamiento térmico el cual es descrito a continuación. Las aleaciones serán identificadas de la siguiente manera: FBCrMo, 1TT; FBCrMoB, 2TT; FBCrMoNb, 3TT; FBCrMoNbB, 4TT.

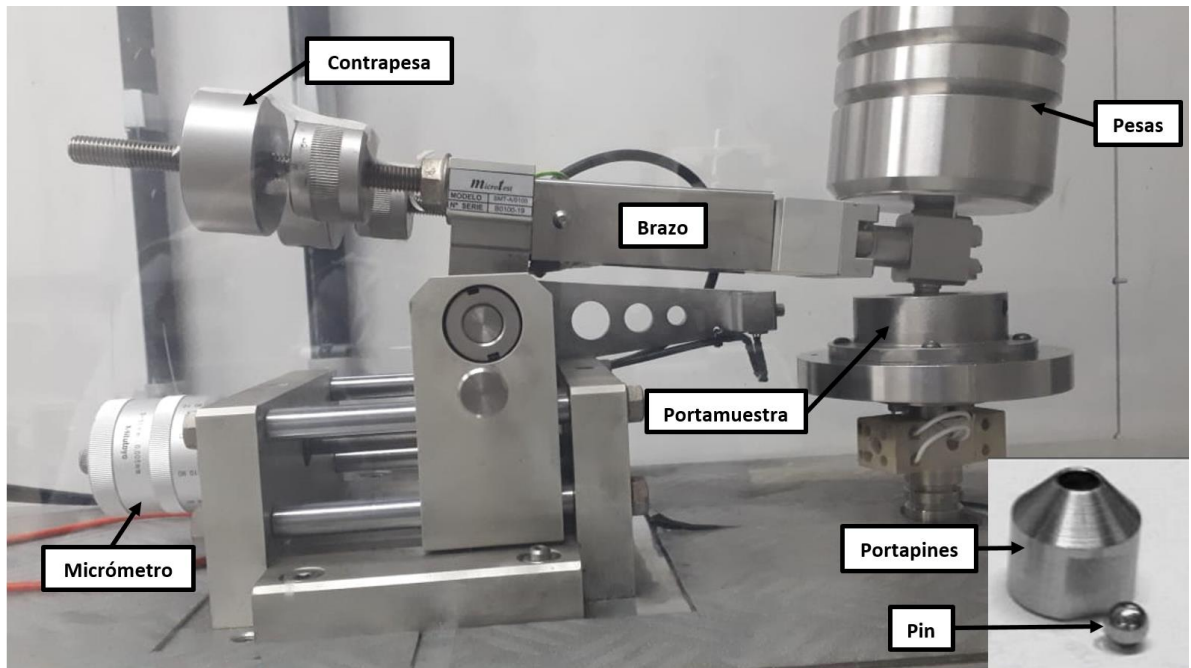
### 4.1 Caracterización de los materiales

La composición química de las 4 aleaciones se obtuvo mediante espectrometría óptica. Estas muestras tuvieron además un tratamiento térmico según se especifica en la norma ASTM A532 teniendo en cuenta las siguientes etapas: recocido 730°C por 2,5h; austenizado a 1020°C por 2,5 h; enfriado en aire forzado; y revenido a 250°C por 2h. La rampa de calentamiento y enfriamiento usada (exceptuando el enfriamiento forzado) fue de 120°C/h. La macrodureza Vickers de las muestras fue medida con una carga de 50 kgf con un tiempo de penetración de 15 s<sup>6-7</sup>.

## 4.2 Ensayo de desgaste

El ensayo de desgaste se realizó bajo la norma ASTM G99-17. El tribómetro usado fue de tipo pin sobre disco de MicroTest MT mostrado en la figura 6. La lectura del ensayo se realizó por medio del programa Nanovea Tribometer Software Version 1.5.3 Micro Photonics Inc. El resultado obtenido por medio del software es la curva del coeficiente de fricción vs el tiempo de ensayo. Para la preparación de las superficies para el ensayo se realizó un pulido con lijas de carburo de silicio No. 600. Como contra-cuerpo se utilizó una esfera de carburo de tungsteno. Cada uno de los discos y la esfera usados fueron sometidos a limpieza ultrasónica en alcohol etílico al 99% por 5 minutos y secados con aire caliente antes de realizar las pruebas. Los parámetros establecidos para los ensayos se encuentran en la tabla 1. Para estimar la tasa de desgaste el ensayo se realizó en 3 tiempos diferentes de 20, 40 y 60 min en las 4 aleaciones. En la determinación del coeficiente de fricción en cada uno de los 4 sistemas tribológicos se realizaron 4 ensayos de 1h por cada aleación en orden aleatorio.

Figura 6. Fotografía del tribómetro MicroTest MT.



Fuente: Autoras.

La representación de la pérdida de volumen en el tiempo presentó un comportamiento lineal, por lo que la pendiente de su recta determinó la velocidad a la cual se desgastan las fundiciones.

Tabla 1. Parámetros fijos del ensayo de desgaste.

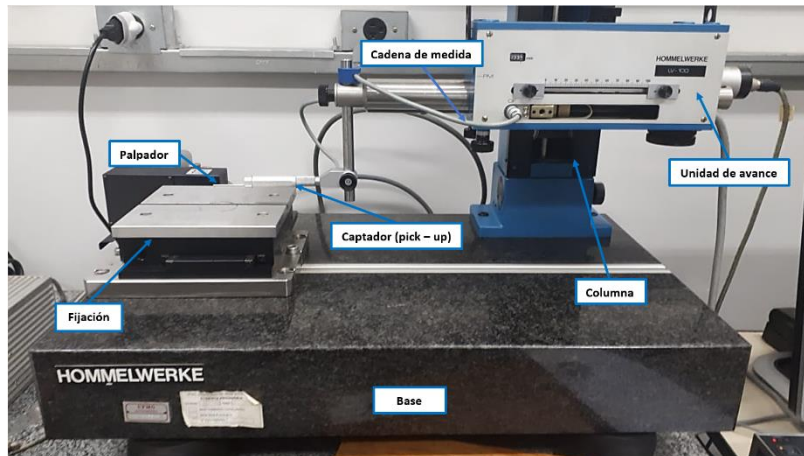
Parámetro	Valor
Carga	40 [N]
Diámetro de la pista de desgaste	6 [mm]
Material de la esfera	Carburo de tungsteno
Diámetro de la esfera	6 [mm]
Velocidad de giro	316 [rpm]

Fuente: Autoras.

### 4.3 Caracterización de las superficies desgastadas

Por medio del sistema de medición topográfica Hommelwerke con ayuda del programa Hommelmap Expert versión 6.2.7487, el cual se muestra en la figura 7, se obtuvo el perfil de desgaste de la superficie de los discos, al igual que el volumen desgastado. El equipo utiliza una punta fina sensible para realizar un barrido en la superficie de la muestra. El barrido se realiza en el plano xz midiendo las variaciones que se encuentran en el eje y. Estas mediciones generan una representación topográfica en 3D de la superficie de los discos de ensayo. El programa del equipo se basa en las especificaciones de la norma ISO 4287:1997<sup>19</sup> y la norma ISO 25178-606: 2015<sup>20</sup>. En el barrido superficial se tomaron 300 mediciones en un espacio cuadrado con 8mm de lado y una separación entre cada medición de 26.8  $\mu\text{m}$ .

Figura 7. Sistema de medición topográfica Hommelwerke.



Fuente: Autoras.

<sup>19</sup> ISO, EN. "4287: 1997." Geometrical product specifications (GPS)-surface texture: profile method—terms, definitions and surface texture parameters (ISO 4287: 1997+ Cor 1: 1998+ Cor 2: 2005+ Amd 1: 2009) (includes Corrigendum AC: 2008 and Amendment A1: 2009) (2015).

<sup>20</sup> ISO, EN. "25178-606: 2015." Geometrical product specification (GPS) — Surface texture: Areal — Part 606: Nominal characteristics of non-contact (focus variation) instruments.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Caracterización de materiales

La composición química obtenida mediante Espectrometría Óptica de los cuatro tipos de fundiciones al alto cromo se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2. Composición química en porcentaje peso de las fundiciones blancas de alto cromo aleadas.

Aleación	%Fe	%C	%Cr	%Mn	%Si	%Ni	%Mo	%Nb	%B
1TT	68,7	2,92	24,60	0,79	1,00	0,55	1,00	-	-
2TT	68,35	2,92	24,75	0,83	0,82	0,43	1,05	2,35	-
3TT	68,44	3,02	24,75	1,15	0,85	0,41	0,97	-	0,6
4TT	66,08	2,87	25,01	0,71	0,93	0,45	1,13	2,34	0,62

Fuente: Oliveira, C.G. Tesis de doctorado en Engenharia Metalúrgica e Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, Brasil.

Pacheco, D. (2018) Tesis de maestria en Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, Brasil.

Tabla 3. Resultados obtenidos por dureza Vickers (HV50).

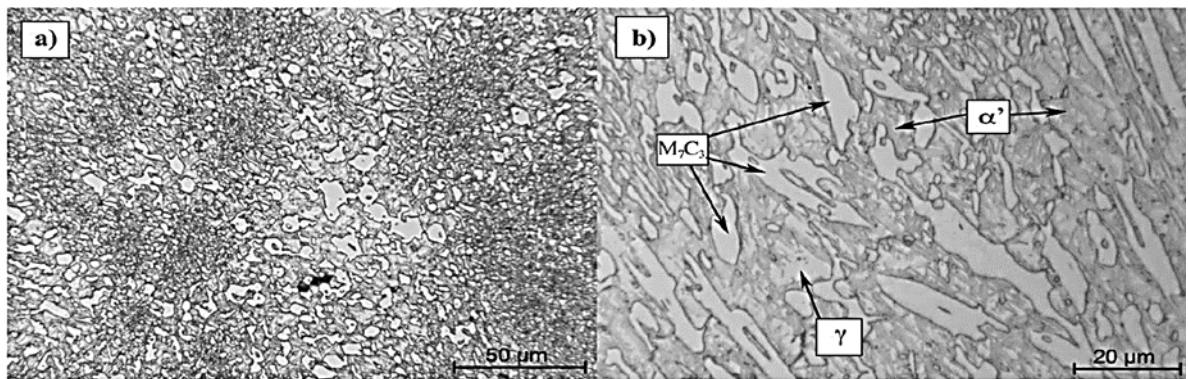
Aleación	Dureza, HV <sub>50</sub>
FBCrMo 1TT	844 ± 22
FBCrMoNb 2TT	796 ± 48
FBCrMoB 3TT	907 ± 29
FBCrMoNbB 4TT	883 ± 21

Fuente: Oliveira, C.G. Tesis de doctorado en Engenharia Metalúrgica e Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, Brasil.

Pacheco, D. (2018) Tesis de maestria en Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, Brasil.

La figura 8 presenta las micrografías obtenidas por microscopía óptica de la fundición 1TT tratada térmicamente. Se observa la presencia de agujas de martensita ( $\alpha'$ ) y cementita ( $M_7C_3$ ) en la matriz, además de regiones con presencia de austenita retenida ( $\gamma$ )<sup>6-7</sup>.

Figura 8. Micrografías ópticas de la fundición 1TT tratada térmicamente a) tomada a 500x de aumento b) tomada a 1000x de aumento.

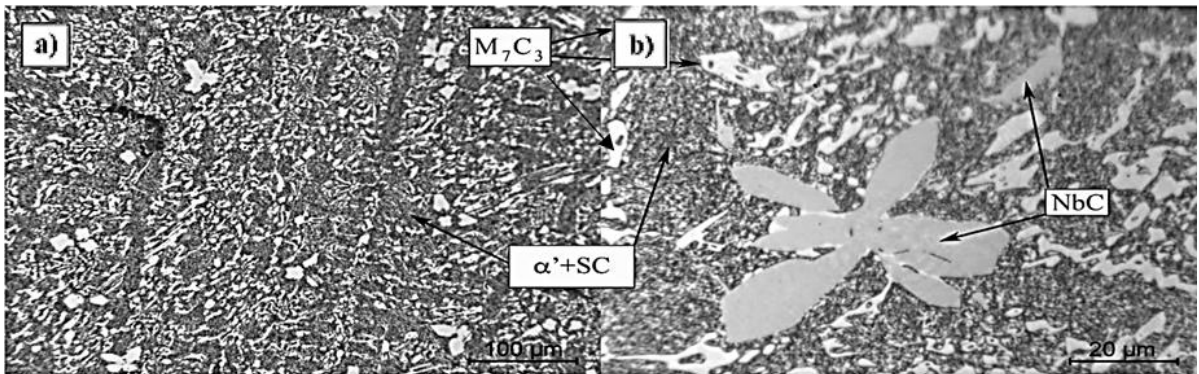


Fuente: Oliveira, C.G. Tesis de doctorado en Engenharia Metalúrgica e Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, Brasil.

Pacheco, D. (2018) Tesis de maestria en Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, Brasil.

La figura 9 presenta las micrografías obtenidas por microscopía óptica de la fundición 2TT tratada térmicamente. Se identifica una matriz martensítica con presencia de cementita, carburos eutécticos ( $NbC$ ) y carburos secundarios ( $SC$ )<sup>6-7</sup>.

Figura 9. Micrográficas ópticas de la fundición 2TT tratada térmicamente a) tomada a 500x de aumento b) tomada a 1000x de aumento.

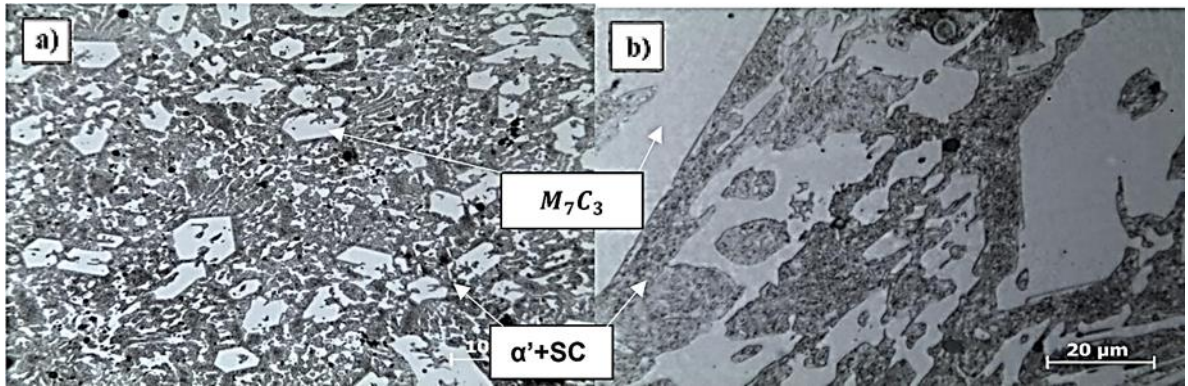


Fuente: Oliveira, C.G. Tesis de doctorado en Engenharia Metalúrgica e Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, Brasil.

Pacheco, D. (2018) Tesis de maestria en Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, Brasil.

La figura 10 presenta las micrográficas obtenidas por microscopía óptica de la fundición 3TT tratada térmicamente. Se identifica una matriz martensítica con presencia de carburos secundarios y carburos ricos en cromo del tipo  $(Fe, Cr)_7C_3 - M_7C_3$ , llamado en adelante simplemente  $M_7C_3$ <sup>6-7</sup>.

Figura 10. Micrográficas ópticas de la fundición 3TT tratada térmicamente a) tomada a 500x de aumento b) tomada a 1000x de aumento.

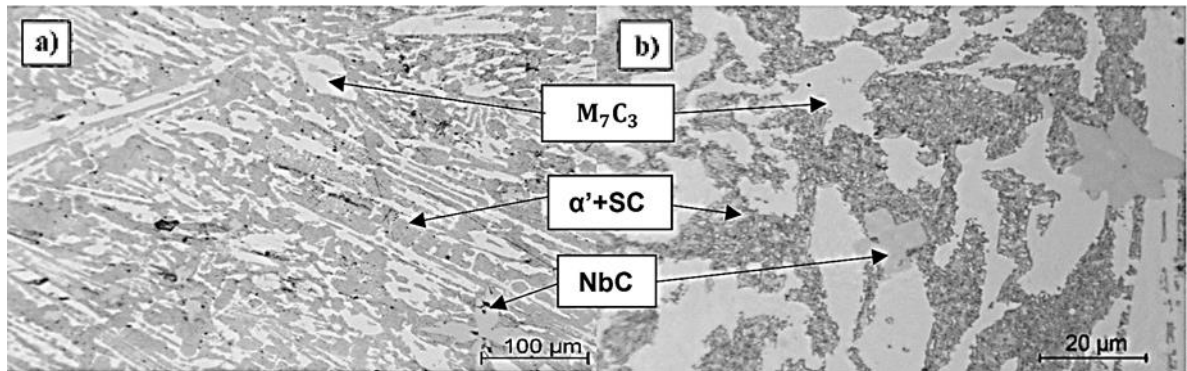


Fuente: Oliveira, C.G. Tesis de doctorado en Engenharia Metalúrgica e Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, Brasil.

Pacheco, D. (2018) Tesis de maestria en Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, Brasil.

La figura 11 presenta las micrográficas obtenidas por microscopía óptica de la fundición 4TT tratada térmicamente. Se identifica una matriz martensítica con presencia de carburos secundarios, carburos eutécticos de niobio y carburos ricos en cromo del tipo  $(Fe, Cr)_7C_3 - M_7C_3^{6-7}$ .

Figura 11. Micrográficas ópticas de la fundición 4TT tratada térmicamente a) tomada a 500x de aumento b) tomada a 1000x de aumento.



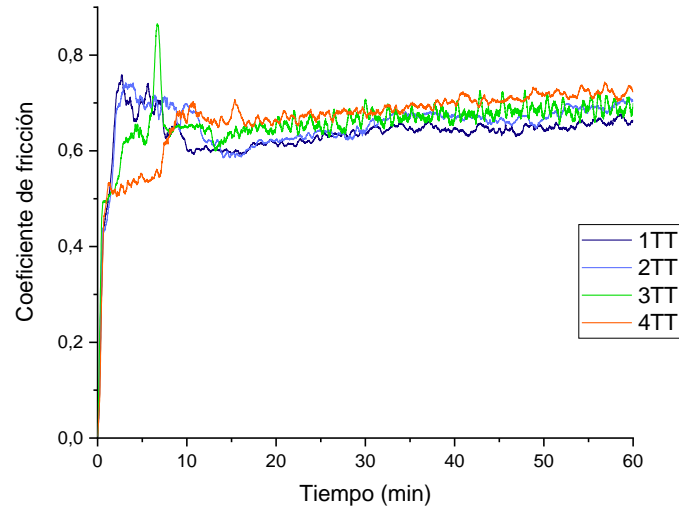
Fuente: Oliveira, C.G. Tesis de doctorado en Engenharia Metalúrgica e Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, Brasil.

Pacheco, D. (2018) Tesis de maestria en Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, Brasil.

## 5.2 Coeficiente de fricción

Las curvas de coeficiente de fricción de las cuatro aleaciones se encuentran representadas en la figura 12. En el régimen permanente, todas tuvieron un comportamiento similar donde las variaciones en el coeficiente se mantuvieron constantes en el rango. Durante el running-in, la aleación 4TT tuvo el mayor tiempo de estabilización con 20 minutos, mientras que las aleaciones 1TT, 2TT y 3TT demoraron aproximadamente 10-13 minutos. Las 4 aleaciones mostraron un comportamiento general de bajo ruido. Este bajo ruido es un indicador de la baja interacción que hay entre las asperezas de las superficies. La aleación 3TT evidenció un aumento en el ruido de la curva del coeficiente de fricción, esta variación en la interacción entre las superficies de la esfera y el disco implica que, para este sistema, el mecanismo de desgaste cambia a medida que cambia el área real de contacto entre las asperezas.

Figura 12. Curvas de coeficiente de fricción en función del tiempo de deslizamiento para las 4 aleaciones.



Fuente: Autoras.

Las réplicas de cada una de las aleaciones se encuentran en el anexo B. Un resumen de los coeficientes de fricción para cada una de las aleaciones es mostrado en la tabla 4.

Las aleaciones 3TT y 4TT presentaron los coeficientes de fricción más altos entre las 4 fundiciones, con valores de 0,684 y 0,713 respectivamente. Estas aleaciones corresponden igualmente a las que tienen mayor dureza entre las fundiciones. Scandian y colaboradores<sup>5</sup> presentan en su investigación el efecto que tiene el aumento de la concentración de cromo y boro en el coeficiente de fricción. El ensayo de desgaste que realizaron utilizaba como pin una barra cilíndrica de 10 *mm* con un corte cónico al final, terminando en una cara circular plana de 2 *mm*, la carga usada fue de 20 *N*. Como resultado del ensayo para la aleación con 24 wt% Cr y 3 wt% de Mo, mostró un coeficiente de fricción menor a 0,7, contrastando con el 0,645 de la aleación 1TT de nuestra investigación.

Tabla 4. Coeficientes de fricción para las 4 aleaciones.

Aleación		Coeficiente de fricción
FBCrMo	1TT	$0,645 \pm 0,012$
FBCrMoNb	2TT	$0,651 \pm 0,012$
FBCrMoB	3TT	$0,684 \pm 0,011$
FBCrMoNbB	4TT	$0,713 \pm 0,013$

Fuente: Autoras.

### 5.3 Desgaste

Los resultados de desgaste y su evaluación son enfocados en el efecto que tiene la variación de la composición en la resistencia al desgaste, por lo que se procuró que el pin, en este caso la esfera usada como contra cuerpo en el ensayo, no tuviera un desgaste significativo como se muestra en su superficie en a figura 13.

Figura 13. Superficie de esfera de Carburo de Tungsteno.



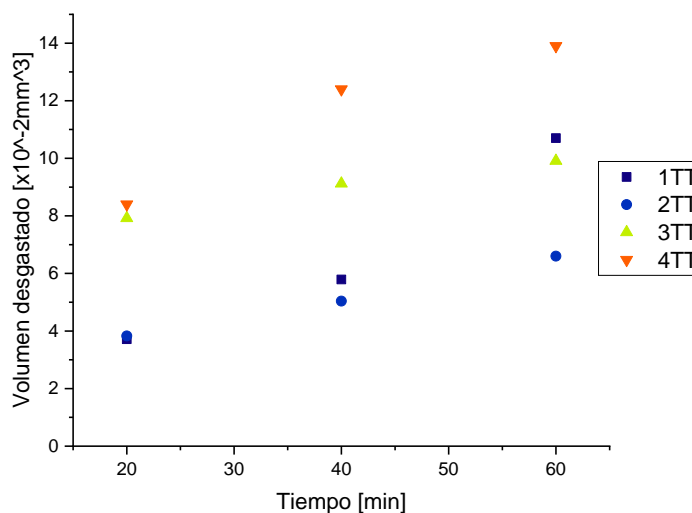
Fuente: Autoras.

El volumen perdido para las 4 aleaciones a los 20, 40 y 60 minutos se encuentra representado en la figura 14. Como se espera, el volumen perdido va aumentando con el tiempo. Los discos correspondientes a las aleaciones 1TT y 2TT en los

primeros 20 minutos del ensayo presentaron las menores pérdidas de volumen cerca de  $0,04 \text{ mm}^3$ , estas corresponden a las aleaciones con menor dureza como se muestra en la sección 5.1. Por otro lado, las aleaciones de mayor dureza, 3TT y 4TT tienen la mayor pérdida de masa en este mismo tiempo, esta fue de  $0.08 \text{ mm}^3$ , sin embargo, esta pérdida de masa inicial se da en el running-in del ensayo, un periodo con características aleatorias antes de empezar el régimen permanente de desgaste. En este segundo régimen, las aleaciones tienen un mecanismo de desgaste predominante. El volumen total desgastado se encuentra representado en las imágenes del anexo C.

La velocidad a la cual se desgastan las aleaciones se muestra en la tabla 3. Se evidencia que la aleación que tuvo mayor tasa de desgaste es la 1TT y fue de  $17 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{min}$  esta aleación tiene el coeficiente de fricción más bajo. Como se menciona en la sección 5.2. la aleación que presentó la mejor resistencia al desgaste es aquella con la tasa de desgaste más baja y corresponde a la aleación 3TT, su coeficiente de fricción fue el segundo más alto y también corresponde a la aleación que tiene mayor dureza, como se muestra en la sección 5.1.

Figura 14. Volumen desgastado de los discos en función del tiempo de deslizamiento para las 4 aleaciones.



Fuente: Autoras.

Tabla 3. Volumen y tasa de desgaste para 1TT, 2TT, 3TT y 4TT.

		Volumen de desgaste [ $x10^{-2}mm^3$ ]			
Aleación		20 [min]	40 [min]	60 [min]	Tasa de desgaste [ $x10^{-4}mm^3/min$ ]
FBCrMo	1TT	3,716	5,788	10,7	17
FBCrMoNb	2TT	3,828	5,036	6,6	7
FBCrMoB	3TT	7,92	9,12	9,91	5
FBCrMoNbB	4TT	8,4	12,4	13,9	14

Fuente: Autoras.

Hau Lu y colaboradores<sup>18</sup> mostraron en su estudio como la adición de boro tenía un efecto positivo en la resistencia al desgaste de las fundiciones de alto cromo. No solo el aumento de la dureza fue notable, con un cambio de 63HRA con 0%B a 82HRA con 0.6% de adición de boro, sino el aumento de la resistencia al desgaste, que el volumen perdido para 0% de boro fue superior a  $8 x10^3mm^3$  y descendió a una pérdida de volumen menor a  $1 x10^3mm^3$  sin embargo la tasa de desgaste no fue medida. Esta mejora coincide con los datos obtenidos en el presente estudio, ya que la fundición 3TT que corresponde a la que tiene adición de boro, presenta las 2 características, una dureza superior y la mejor resistencia al desgaste. Cabe resaltar que la adición de niobio en la 2TT mejoró notoriamente su resistencia al desgaste pues tiene la segunda menor tasa de desgaste a pesar de ser la aleación de menor dureza.

#### 5.4 Influencia de la microestructura en el comportamiento tribológico

La microestructura típica de los hierros fundidos blancos de alto cromo consiste en carburos de alta dureza dispersos en una matriz metálica que aún contiene una concentración suficiente de carbono para permitir el endurecimiento como resultado

de la transformación de la austenita. Las aleaciones estudiadas presentan una matriz martensítica obtenida por medio de tratamiento térmico, descrito en la sección 4.1.

La alta resistencia al desgaste por deslizamiento de las muestras ensayadas se atribuye a la combinación de la matriz y los carburos precipitados. El carburo eutéctico de tipo  $M_7C_3$  es frecuente en todas las muestras, se trata del precipitado más duro entre los tipos formados por Fe y Cr. Las aleaciones con adiciones de niobio 2TT, boro 3TT y niobio y boro 4TT presentaron precipitación de carburos secundarios<sup>7</sup>. Estos dan como resultado una disminución local del contenido de carbono de la matriz. Por lo tanto, la martensita presente es una fase de bajo carbono, es decir una matriz menos dura en comparación con la martensita de una fundición blanca sin aleantes<sup>7</sup>.

Estudios han demostrado que cantidades apropiadas de elementos formadores de carburo para las fundiciones blancas de alto cromo ofrecen un medio eficaz para mejorar su rendimiento de desgaste a través del refinamiento de la microestructura y la formación de nuevos carburos finos<sup>4-21-22</sup>. En la investigación de refinamiento de microestructura de fundiciones de alto cromo hipereutécticas realizada por Chung y colaboradores en 2013, los elementos B y Nb demostraron el mejor rendimiento general, bajo condiciones de laboratorio en ensayo pin sobre disco de

---

<sup>21</sup> Chen, H. X., Chang, Z. C., Lu, J. C., & Lin, H. T. (1993). Effect of niobium on wear resistance of 15% Cr white cast iron. *Wear*, 166(2), 197-201.

<sup>22</sup> Radulovic, M., Fiset, M., Peev, K., & Tomovic, M. (1994). The influence of vanadium on fracture toughness and abrasion resistance in high chromium white cast irons. *Journal of Materials Science*, 29(19), 5085-5094.

hasta aproximadamente 15 veces menos pérdida de peso, en comparación con la fundición base<sup>23</sup>.

Es importante tener en cuenta que la reducción en la tasa de desgaste mediante la adición de elementos formadores de carburo es significativa en todos los casos, y la serie de boro agregado 3TT muestra la tasa más baja, seguida por la serie de niobio 2TT. Los resultados obtenidos demuestran que las características microestructurales tienen una fuerte influencia en la resistencia al desgaste por deslizamiento, resaltando que la fundición de menor dureza es decir la muestra con adición de niobio 2TT de la cual intuitivamente se espera una respuesta desfavorable de acuerdo con el modelo de Archard, obtuvo una tasa de desgaste baja. Esto puede explicarse teniendo en cuenta que el Niobio, es un elemento fuerte como formador de carburos, precipitando carburos secundarios y NbC en la muestra 2TT, los cuales influenciaron la respuesta tribológica. El carburo  $M_7C_3$  presentó durezas entre 20 a 25 Gpa en la aleación base 1tt y en la 2tt, sin embargo, el carburo de niobio tipo NbC presente en la aleación 2TT y 4TT obtuvo 37 Gpa<sup>7</sup>. La microestructura de esta aleación demostró un mejor comportamiento en comparación con la fundición sin aleantes 1TT y la fundición aleada con los dos elementos Nb y B 4TT.

La superioridad en términos de la tasa de desgaste de la fundición con adición de boro 3TT frente a todas las muestras ensayadas puede explicarse considerando que la resistencia al desgaste por deslizamiento no es exclusivamente dependiente de la dureza de los carburos, sino que es una combinación óptima de dureza y tenacidad de la matriz, ya que en esta muestra no se precipitaron boruros debido a

---

<sup>23</sup> Chung, R. J., Tang, X., Li, D. Y., Hinckley, B., & Dolman, K. (2013). Microstructure refinement of hypereutectic high Cr cast irons using hard carbide-forming elements for improved wear resistance. *Wear*, 301(1-2), 695-706.

que el boro no es un buen formador de carburos como el niobio<sup>7</sup>. Radulovic y colaboradores demostraron que la fase martensítica reduce el desgaste de la matriz y, a su vez, reduce la fractura de carburo, además que los carburos secundarios también influyen en el comportamiento al desgaste ya que fortalecen la matriz martensítica que a su vez aumenta el soporte mecánico a la fase de carburo<sup>23</sup>. Además, Correa y colaboradores estudiaron el efecto del boro en desgaste por deslizamiento en fundiciones de alto cromo demostrando que la adición de boro aumenta la resistencia al desgaste del hierro blanco en un 40% en promedio; tal mejora se atribuyó al refinamiento microestructural<sup>24</sup>. En el caso del presente proyecto se comprueba la afirmación de los investigadores ya que la aleación con boro agregado 3TT con matriz martensítica y carburos secundarios y primarios del tipo  $M_7C_3$  obtuvo la menor tasa de desgaste, es importante destacar que la morfología hexagonal de los carburos primarios es ventajosa porque dificulta la nucleación y propagación de grietas.

En términos de coeficiente de fricción las fundiciones estudiadas presentaron las dos etapas esperadas, inicial transitoria y estacionaria. Las aleaciones de mayor dureza es decir la serie de boro agregado 3TT y la de boro y niobio 4TT presentaron los valores más altos de coeficiente fricción, seguido por la fundición con adición de niobio 2TT y por último la fundición blanca de alto cromo sin aleantes 1TT, la cual presentó el menor valor de coeficiente de fricción. De nuevo la presencia de carburos primarios  $M_7C_3$  influenciaron el comportamiento de los materiales. Pinho y colaboradores en su trabajo con las fundiciones de alto cromo, detectaron que la tendencia a la microfisuración de los carburos  $M_7C_3$  parece contribuir en gran medida a los resultados de fricción debido a la disipación de energía en el contacto deslizante. A medida que aumenta la fracción de volumen de este tipo de carburos

---

<sup>24</sup> Correa, R., Bedolla-Jacuinde, A., Zuno-Silva, J., Cardoso, E., & Mejía, I. (2009). Effect of boron on the sliding wear of directionally solidified high-chromium white irons. *Wear*, 267(1-4), 495-504.

los valores medios del coeficiente de fricción tienden a ser más altos<sup>25</sup>. La muestra 3TT y 4TT confirman el análisis de los investigadores ya que presentan el carburo primario  $M_7C_3$  en su matriz, a diferencia de la aleación con adición de niobio donde predomina el carburo NbC, en su microestructura y finalmente en el caso de la fundición 1TT, aunque presenta el carburo primario  $M_7C_3$ , la presencia de regiones con austenita retenida influye en el valor de coeficiente fricción, ya que su matriz es menos dura que los demás materiales.

### **5.5 Influencia del desgaste en la topografía superficial**

La relación entre el desgaste y la rugosidad fue evaluada con los parámetros de acabado superficial que presentaron mayor variación con respecto a los mismos parámetros antes de realizar los ensayos. De igual manera aquellos que representaron una particularidad importante en la caracterización superficial de las 4 aleaciones estudiadas. Los parámetros seleccionados se encuentran en la tabla 4. Estos valores son obtenidos de acuerdo con los perfiles de desgaste mostrados en el anexo D, donde se presenta el cambio del perfil para cada una de las aleaciones en los 3 tiempos de ensayo.

Ra representa la desviación promedio aritmética de la variación de la altura desde la línea media, por lo que entre menor sea el valor, la superficie es más lisa y menos rugosa. La aleación con mayor tasa de desgaste 1TT, presentó el menor valor de la rugosidad media, Ra, al final de los 60 minutos de ensayo, al igual que Rq. Mientras que en los mismos 60 minutos la aleación 3TT con menor tasa de desgaste tiene los valores mayores de Ra y Rq, esto se evidencia en los valores mostrados en la tabla

---

<sup>25</sup> Pinho, K. F., Boher, C., & Scandian, C. (2013). Effect of molybdenum and chromium contents on sliding wear of high-chromium white cast iron at high temperature. *Lubrication Science*, 25(2), 153-162.

4 y en la figura 30 a y d del anexo D. Esto demuestra que el mecanismo por el cual se realiza el desgaste en ambas aleaciones es distinto, ya que el contacto entre las asperezas cambia y por tanto las irregularidades en la superficie varía de una aleación a la otra. Se establece igualmente que la mayor pérdida de volumen no implica directamente que la superficie aumente su rugosidad promedio. La variación de  $R_a$  y  $R_q$  es notoria cuando se compara en una misma aleación como las dos mediciones de rugosidad aumentan en el tiempo.

Tabla 4. Parámetros de rugosidad superficial de los discos ante y después de los ensayos.

Tiempo de ensayo	Aleación	$R_a [\mu m]$	$R_q [\mu m]$	$R_{sk}$	$R_{ku}$
0 min		0,095	0,043	-0,198	3,026
20 min		0,243	0,294	0,975	2,85
40 min	1TT	0,3	0,385	1,08	2,26
60 min		0,491	0,653	0,538	3,48
20 min		0,289	0,388	0,944	3,55
40 min	2TT	0,381	0,451	0,859	2,44
60 min		0,569	0,75	0,581	2,59
20 min		0,525	0,388	0,96	1,94
40 min	3TT	0,617	0,786	0,633	2,47
60 min		0,697	0,872	0,868	2,81
20 min		0,409	0,501	0,978	1,86
40 min	4TT	0,451	0,549	0,93	2,09
60 min		0,559	0,751	1,19	2,72

Fuente: Autoras.

Los valores de  $R_{sk}$  y  $R_{ku}$  se basan en la comparación de distribución del perfil de rugosidad con una distribución Gaussiana, por lo que una superficie que tenga una distribución Gaussiana centrada tiene todos sus picos y valles dentro del promedio. Es decir que los valores negativos de  $R_{sk}$ , como el que presenta la superficie antes de realizar el ensayo tiene picos con alturas cercanas a la línea media, contrario con aquellos de valores positivos que presentan un mayor rango de altura de picos alejados de la línea media, como lo evidencia la superficie de las aleaciones después de realizados los ensayos.

Para los valores de  $R_{ku}$ , se tiene como referencia que la distribución Gaussiana tiene un valor de *Kurtois* de 3. Por lo que distribuciones de perfiles que sean mayores a 3, como la superficie antes de realizar el desgaste, la aleación 1TT a los 60 minutos y la 2TT a los 20 minutos, tienen pocas asperezas que superen la altura media, es decir tienen pocos picos delgados en la superficie que sobrepasen la línea media. En el caso de la aleación 1TT es importante resaltar que fue la aleación que tuvo mayor velocidad de desgaste. Valores de *Kurtois* menores a 3 como lo muestran las demás superficies, tiene muchos "picos" gruesos o poco puntiagudos en su superficie que se encuentran cercanos a la línea media. Ejemplo de esto son las aleaciones 4TT a los 40 minutos o la 3TT a los 20, 40 y 60 minutos.

## CONCLUSIONES

A partir del proyecto realizado se pueden indicar las siguientes conclusiones:

La fundición con agregado de boro 3TT demostró la mejor respuesta tribológica luego de la realización del ensayo pin-on-disc. Presentando la tasa de desgaste más baja entre las cuatro aleaciones estudiadas y el segundo coeficiente de fricción más alto durante estado estacionario, además presentó una rugosidad alta de la superficie desgastada como se evidenció en los valores de Ra y un valor de Rku menor a 3 lo cual indica asperezas no agudas. El comportamiento confirma que la combinación de matriz martensítica, carburos primarios de tipo  $M_7C_3$  y carburos secundarios presentes en la fundición 3TT es favorable para mejorar la resistencia al desgaste por deslizamiento de fundiciones blancas de alto cromo.

La resistencia al desgaste por deslizamiento es influenciada por las características microestructurales en las fundiciones blancas de alto cromo, demostrando que la adición de elementos formadores de carburo como el boro y el niobio contribuyen favorablemente en su comportamiento.

El estudio de la topografía superficial de las aleaciones muestra que una mayor velocidad de desgaste producida no implica una mayor rugosidad, de acuerdo con la aleación 1TT que presenta la mayor velocidad de desgaste y el menor cambio de rugosidad final después del ensayo de desgaste. Contrario a la aleación 3TT con la menor tasa de desgaste y el mayor cambio de rugosidad superficial.

## BIBLIOGRAFÍA

ASTM NORMA G99-17, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on- Disk Apparatus. ASTM Copyright. United States of America.

Bayer, R. G. (1994). Mechanical wear prediction and prevention. Marcel! Dekker, Inc, P. O. Box 5005, Monticello, NY 12701-5185, USA, 1994. 657.

Bedolla-Jacuinde, A., Correa, R., Mejia, I., Quezada, J. G., & Rainforth, W. M. (2007). The effect of titanium on the wear behaviour of a 16% Cr white cast iron under pure sliding. *Wear*, 263(1-6), 808-820.

Bhushan, B. (1999). Principles and applications of tribology. New York: John Willey & Songs. 198-199-254.

Bhushan, B., & Ko, P. L. (2003). Introduction to tribology. *Appl. Mech. Rev.*, 56(1), B6-B7.

Chen, H. X., Chang, Z. C., Lu, J. C., & Lin, H. T. (1993). Effect of niobium on wear resistance of 15% Cr white cast iron. *Wear*, 166(2), 197-201.

Chung, R. J., Tang, X., Li, D. Y., Hinckley, B., & Dolman, K. (2013). Microstructure refinement of hypereutectic high Cr cast irons using hard carbide-forming elements for improved wear resistance. *Wear*, 301(1-2), 695-706.

Correa, R., Bedolla-Jacuinde, A., Zuno-Silva, J., Cardoso, E., & Mejía, I. (2009). Effect of boron on the sliding wear of directionally solidified high-chromium white irons. *Wear*, 267(1-4), 495-504.

Davim, J. P. (Ed.). (2011). Tribology for engineers: A practical guide. Elsevier.

Goryacheva, I. G. (2013). Contact mechanics in tribology (Vol. 61). Springer Science & Business Media.

Hanlon, D. N., Rainforth, W. M., & Sellars, C. M. (1999). The rolling/sliding wear response of conventionally processed and spray formed high chromium content cast iron at ambient and elevated temperature. *Wear*, 225, 587-599.

Holmberg, K., & Erdemir, A. (2017). Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, 5(3), 263-284.

Hutchings, I. M. (2001). *Wear and lubrication*. 9551-9556.

Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). *Tribology: friction and wear of engineering materials*. Butterworth-Heinemann.

ISO, EN. "4287: 1997." Geometrical product specifications (GPS)-surface texture: profile method—terms, definitions and surface texture parameters (ISO 4287: 1997+ Cor 1: 1998+ Cor 2: 2005+ Amd 1: 2009) (includes Corrigendum AC: 2008 and Amendment A1: 2009) (2015).

ISO, EN. "25178-606: 2015." Geometrical product specification (GPS) — Surface texture: Areal — Part 606: Nominal characteristics of non-contact (focus variation) instruments.

Lu, H., Li, T., Cui, J., Li, Q., & Li, D. Y. (2017). Improvement in erosion-corrosion resistance of high-chromium cast irons by trace boron. *Wear*, 376, 578-586.

Luengo López, Ó. (2008). Estudio tribológico de fricción y desgaste de capas de aleación NiP.

Mitutoyo, A. C., quick guide to surface roughness measurement, Reference guide for laboratory and workshop, Bulletin No. 2229, 2016.

Oliveira, C.G. Estudo do desgaste abrasivo de ferro fundido branco alto cromo com adição de nióbio e boro em testes de laboratório e campo. Tesis de doctorado en Engenharia Metalúrgica e Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, Brasil.

Pacheco, D. (2018) Caracterização estrutural e propriedades mecânicas e tribológicas de ferro fundido branco alto cromo com adição de nióbio, Tesis de maestria en Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, Brasil.

Pinho, K. F., Boher, C., & Scandian, C. (2013). Effect of molybdenum and chromium contents on sliding wear of high-chromium white cast iron at high temperature. *Lubrication Science*, 25(2), 153-162.

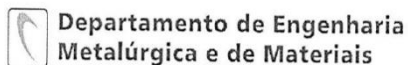
Radulovic, M., Fiset, M., Peev, K., & Tomovic, M. (1994). The influence of vanadium on fracture toughness and abrasion resistance in high chromium white cast irons. *Journal of Materials Science*, 29(19), 5085-5094.

Scandian, C., Boher, C., De Mello, J. D. B., & Rezai-Aria, F. (2009). Effect of molybdenum and chromium contents in sliding wear of high-chromium white cast iron: The relationship between microstructure and wear. *Wear*, 267(1-4), 401-408.

Zum Gahr, K. H. (1987). *Microstructure and wear of materials* (Vol. 10). Elsevier.

## ANEXO A

### Soporte documental



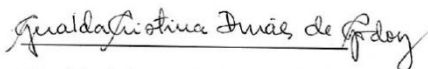
Belo Horizonte, 3 de julho de 2019

Dr. Carlos Enrique Vecino Arenas  
Diretor da Oficina de Relações Internacionais  
Universidade Industrial de Santander  
Bucaramanga, Santander  
Colômbia

Por meio da presente, declaro que a aluna Laura Daniela Otalora Fajardo, estudante de Engenharia Metalúrgica da Universidade Industrial de Santander, com número de identificação C.C. 1098785382 e número de passaporte AR508402, cumpriu satisfatoriamente seu estágio de pesquisa no grupo "Modificação e Caracterização de Superfícies", Ref.: UFMG. 0267 do Diretório de Grupo de Pesquisas do CNPq; criado em 1995 sob minha liderança como Professora Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.

A aluna esteve vinculada ao grupo de pesquisa desde março até junho do presente ano, onde realizou atividades teórico-práticas em tempo integral sob minha supervisão. As atividades desenvolvidas fazem parte do projeto para seu trabalho final do curso.

Atenciosamente,



Geralda Cristina Durães de Godoy  
[gcgodoy@demet.ufmg.br](mailto:gcgodoy@demet.ufmg.br); [cristinagodoyufmg@gmail.com](mailto:cristinagodoyufmg@gmail.com).  
Professora Titular  
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais  
Universidade Federal de Minas Gerais

DEMET - Av. Antônio Carlos, 6627 Escola Engenharia-Pampulha  
31270-900 - Belo Horizonte - MG  
Telefone: +55 (31) 3409-1800/1810  
Fax: +55 (31) 3409-1815

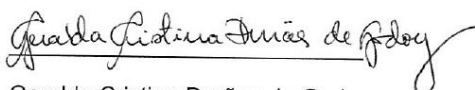
Belo Horizonte, 3 de julho de 2019

Dr. Carlos Enrique Vecino Arenas  
Diretor da Oficina de Relações Internacionais  
Universidade Industrial de Santander  
Bucaramanga, Santander  
Colômbia

Por meio da presente, declaro que a aluna Nataly Quintero Hernández, estudante de Engenharia Metalúrgica da Universidade Industrial de Santander, com número de identificação C.C. 1102380018 e número de passaporte AV058194, cumpriu satisfatoriamente seu estágio de pesquisa no grupo "Modificação e Caracterização de Superfícies", Ref.: UFMG. 0267 do Diretório de Grupo de Pesquisas do CNPq; criado em 1995 sob minha liderança como Professora Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.

A aluna esteve vinculada ao grupo de pesquisa desde março até junho do presente ano, onde realizou atividades teórico-práticas em tempo integral sob minha supervisão. As atividades desenvolvidas fazem parte do projeto para seu trabalho final do curso.

Atenciosamente,



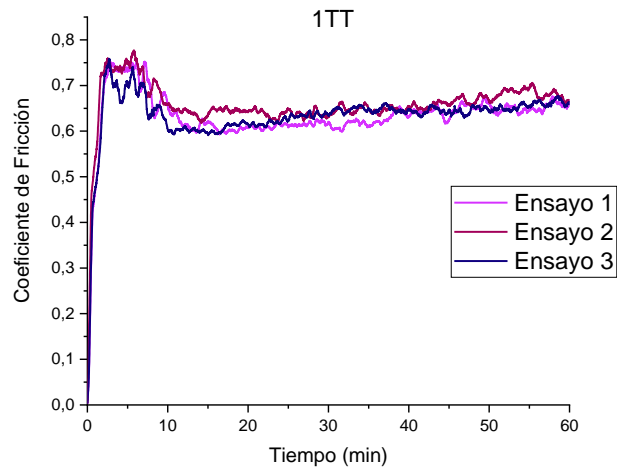
Geralda Cristina Durães de Godoy  
[gcdgodoy@demet.ufmg.br](mailto:gcdgodoy@demet.ufmg.br); [cristinagodoyufmg@gmail.com](mailto:cristinagodoyufmg@gmail.com).  
Professora Titular  
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais  
Universidade Federal de Minas Gerais

DEMET - Av. Antônio Carlos, 6627 Escola Engenharia-Pampulha  
31270-900 - Belo Horizonte - MG  
Telefone: +55 (31) 3409-1800/1810  
Fax: +55 (31) 3409-1815

## ANEXO B

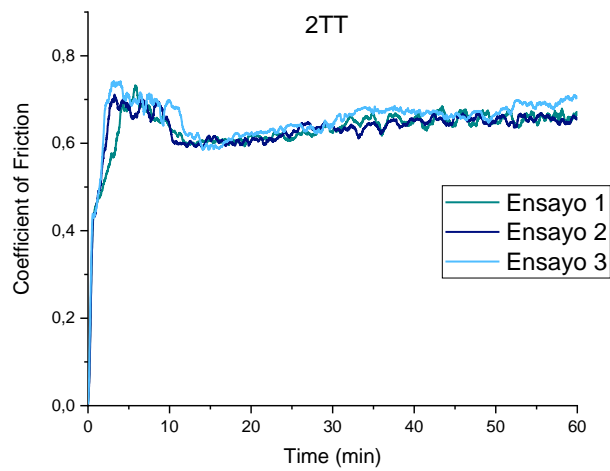
### Gráficas de coeficiente de fricción adicionales

Figura 19. Réplicas de las curvas de coeficiente de fricción en función del tiempo de deslizamiento para la aleación 1TT.



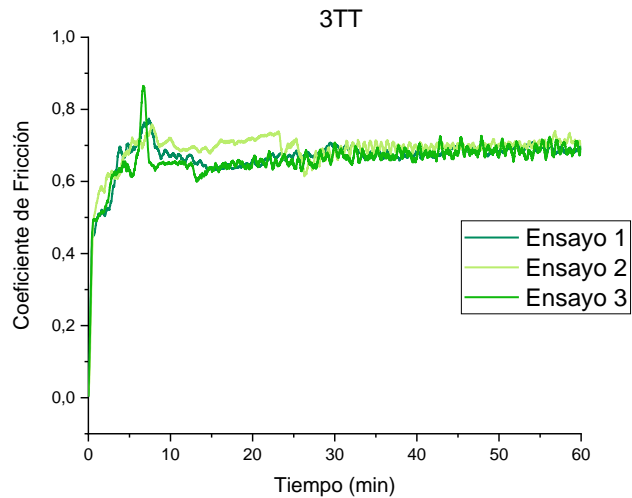
Fuente: autoras.

Figura 20. Réplicas de las curvas de coeficiente de fricción en función del tiempo de deslizamiento para la aleación 2TT.



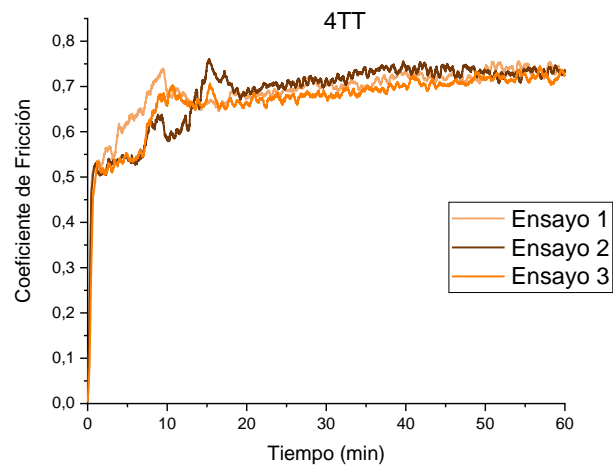
Fuente: Autoras.

Figura 21. Réplicas de las curvas de coeficiente de fricción en función del tiempo de deslizamiento para la aleación 3TT.



Fuente: Autoras.

Figura 22. Réplicas de las curvas de coeficiente de fricción en función del tiempo de deslizamiento para la aleación 4TT.

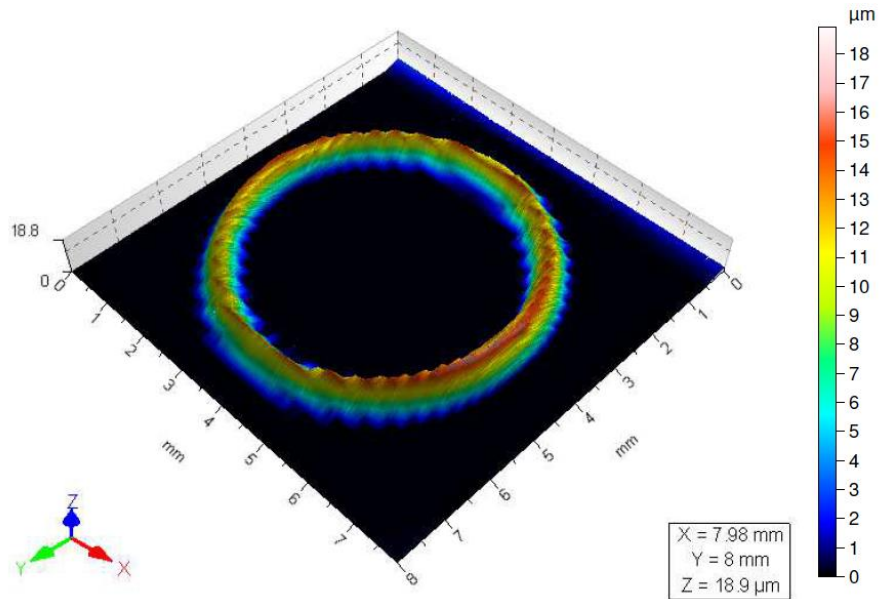


Fuente: Autoras.

## ANEXO C

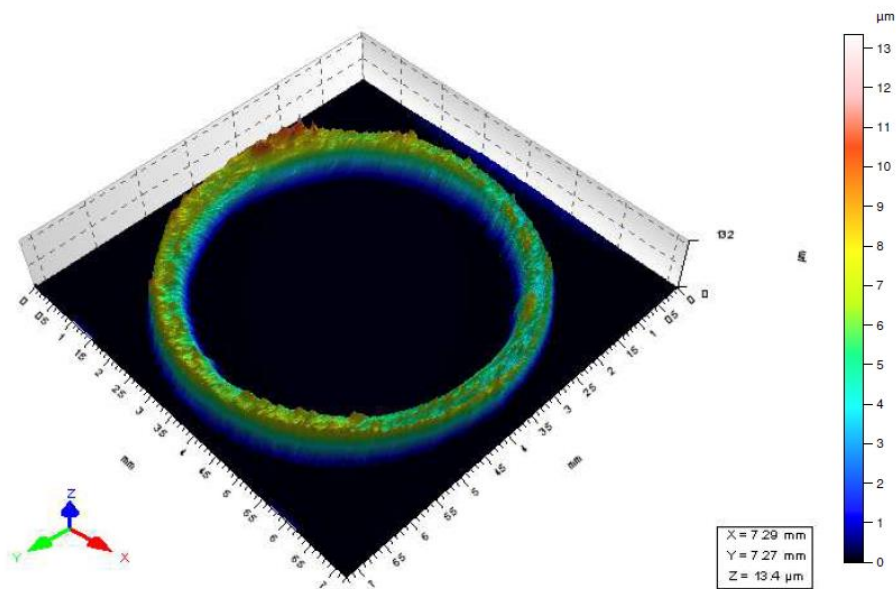
### Representación del volumen final de desgaste

Figura 23. Representación del volumen final desgastado para la aleación 1TT.



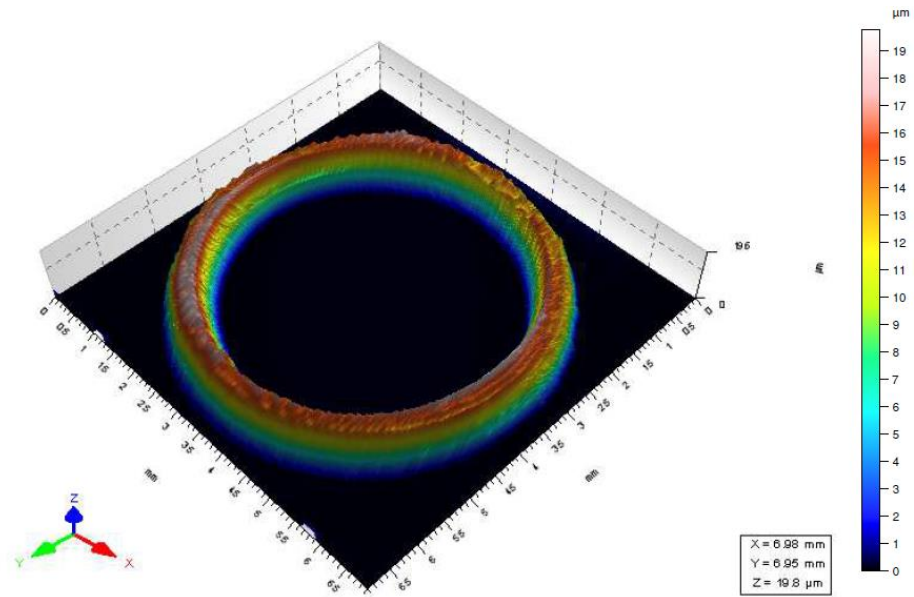
Fuente: Autoras.

Figura 24. Representación del volumen final desgastado para la aleación 2TT.



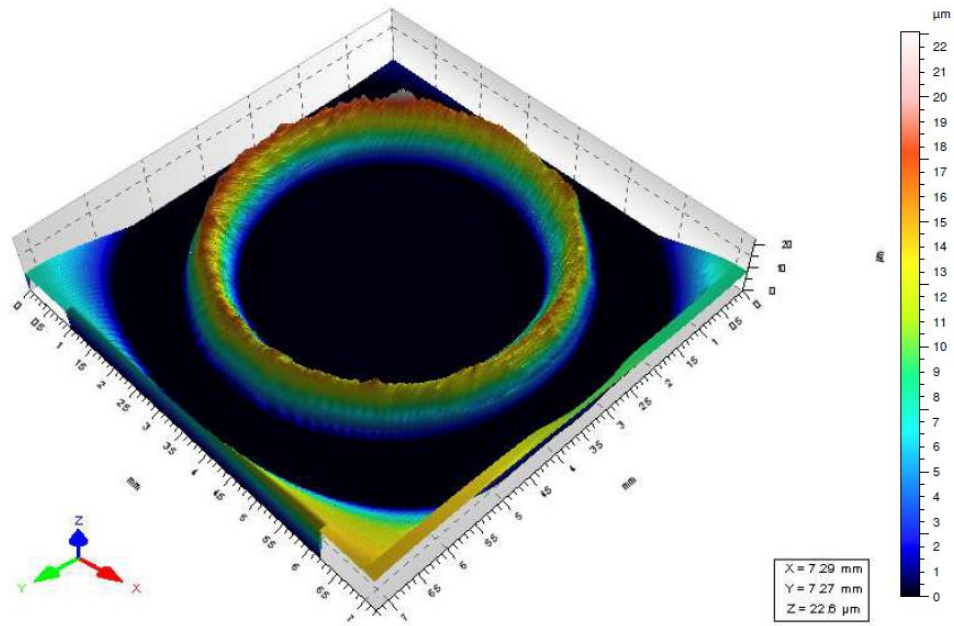
Fuente: Autoras.

Figura 25. Representación del volumen final desgastado para la aleación 3TT.



Fuente: Autoras.

Figura 26. Representación del volumen final desgastado para la aleación 4TT.

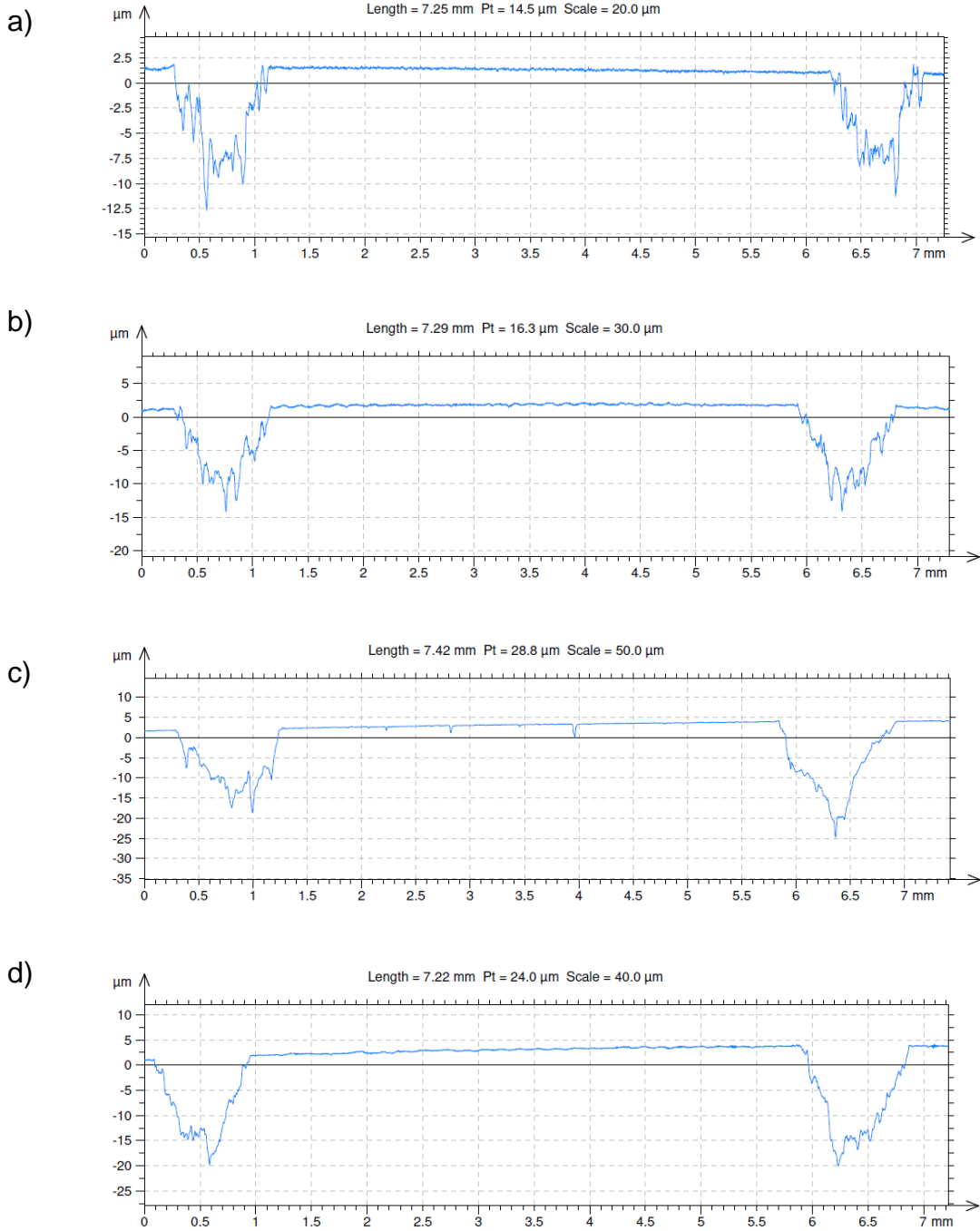


Fuente: Autoras.

## ANEXO D

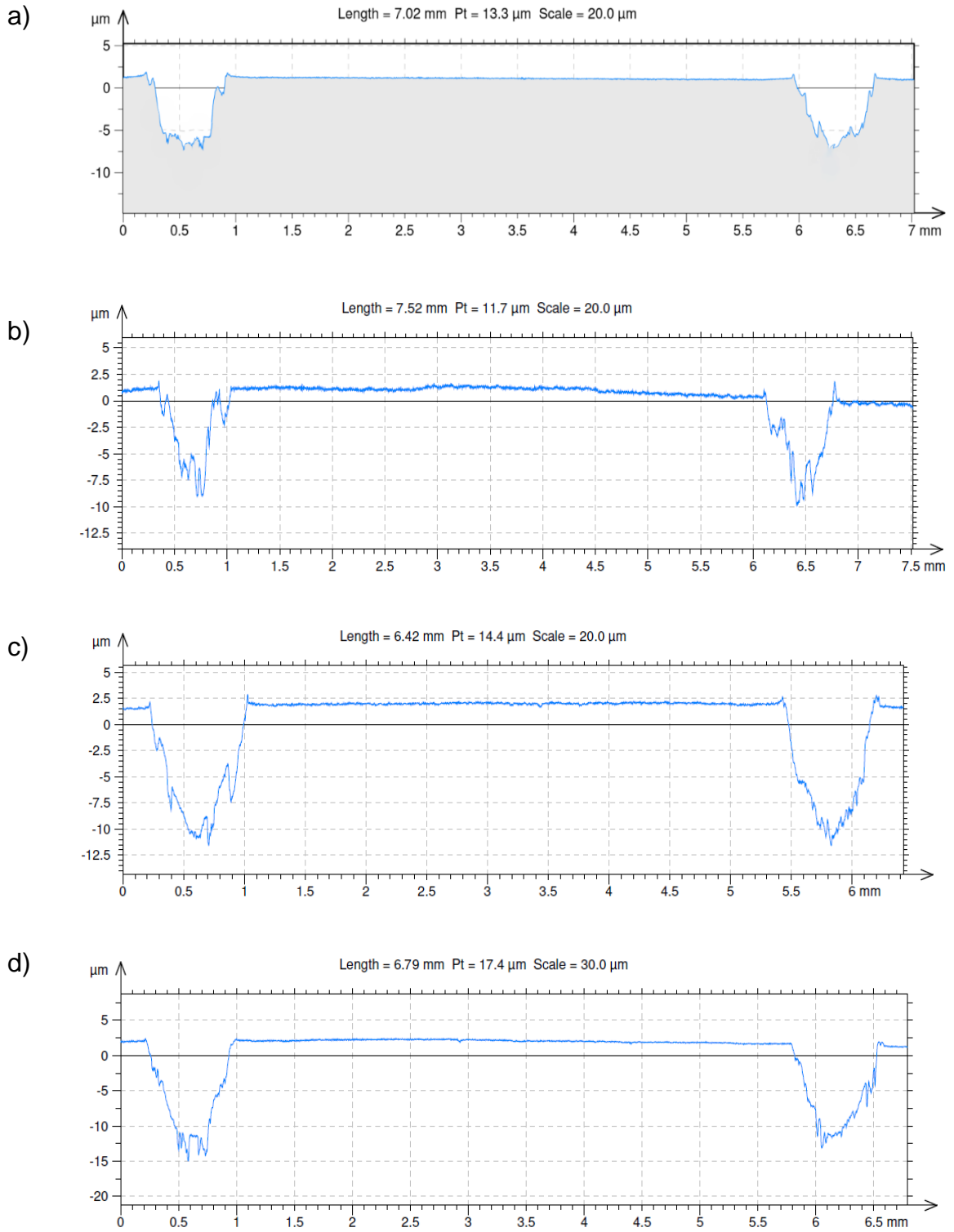
### Perfiles de desgaste

Figura 27. Perfiles de desgaste para 1h continua a) 1TT, b) 2TT, c) 3TT y d) 4TT.



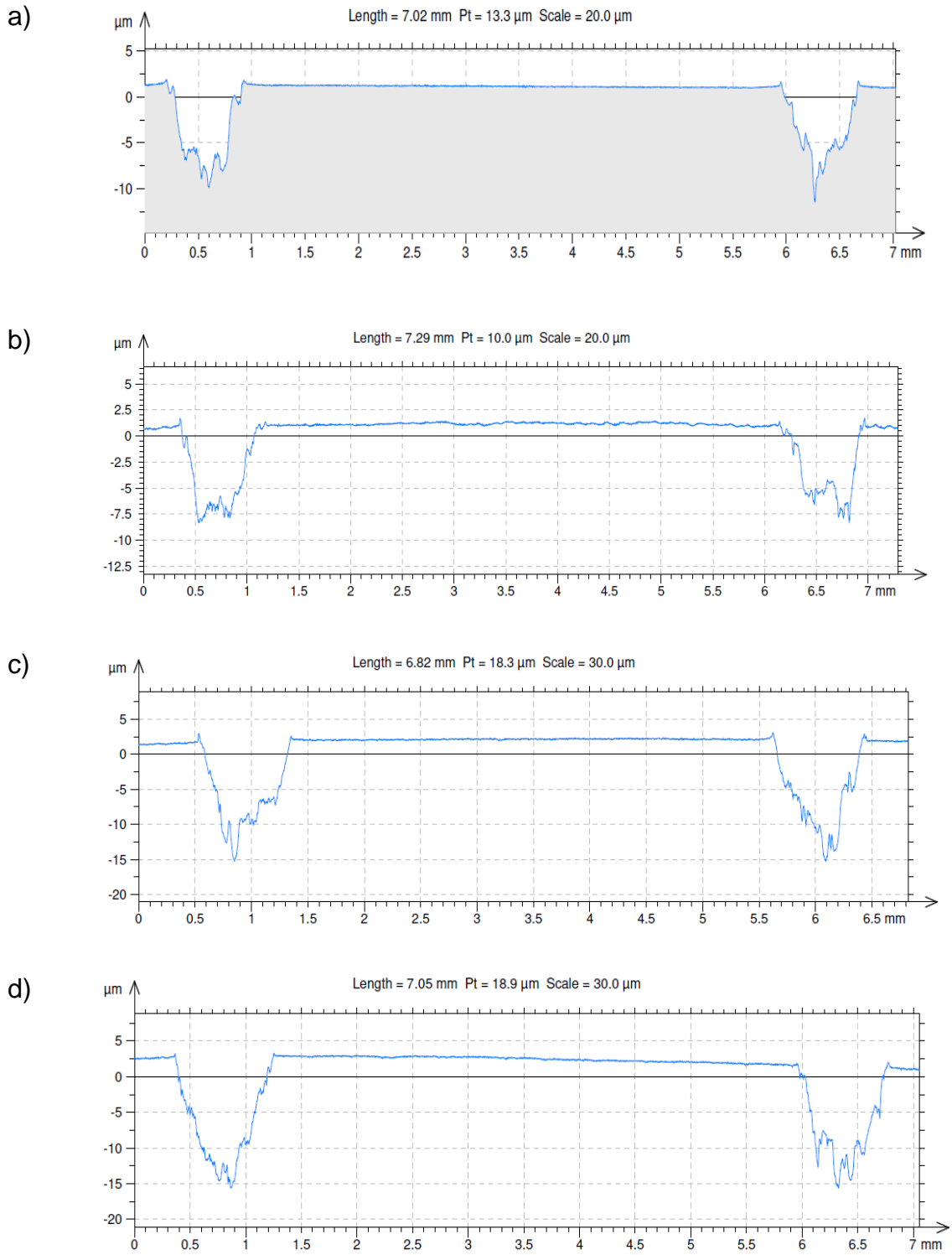
Fuente: Autoras.

Figura 28. Perfiles de desgaste para 20min a) 1TT, b) 2TT, c) 3TT y d) 4TT.



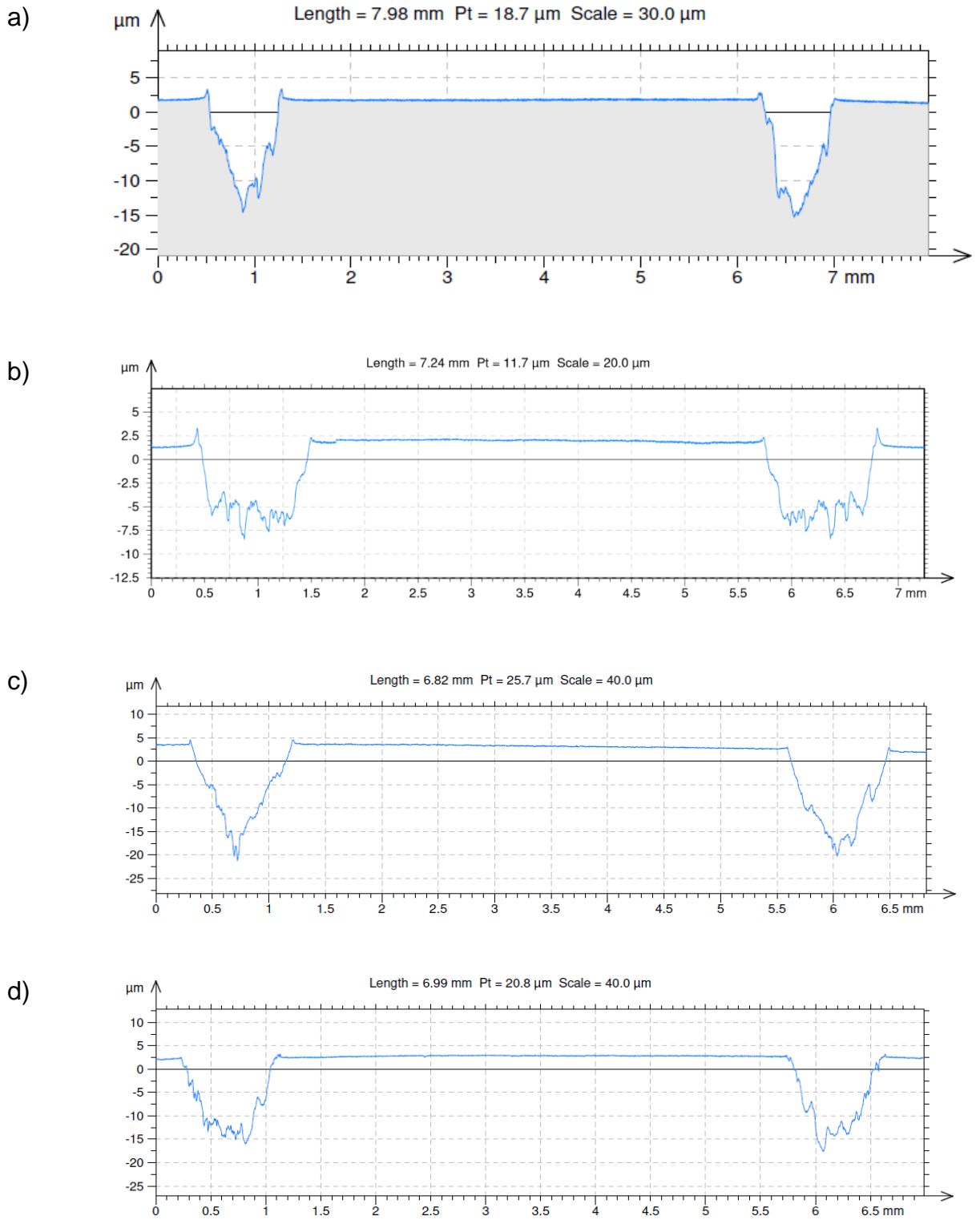
Fuente: Autoras.

Figura 29. Perfiles de desgaste para 40min a) 1TT, b) 2TT, c) 3TT y d) 4TT.



Fuente: Autoras.

Figura 30. Perfiles de desgaste para 60min a) 1TT, b) 2TT, c) 3TT y d) 4TT.



Fuente: Autoras.