

ESTUDIO DE LOS REGÍMENES DE DESGASTE POR DESLIZAMIENTO SIN  
LUBRICACIÓN DE ACEROS

EDGARDO MARIO SAAVEDRA PIÑERES

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

2019

ESTUDIO DE LOS REGÍMENES DE DESGASTE POR DESLIZAMIENTO SIN  
LUBRICACIÓN DE ACEROS

EDGARDO MARIO SAAVEDRA PIÑERES

Trabajo de Grado (Modalidad, proyecto de investigación) para optar al título de  
Ingeniero Metalúrgico

Director

Dr. CRISTIAN CAMILO VIÁFARA ARANGO

Ingeniero Mecánico

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

2019

## DEDICATORIA

A Dios por ser mi guía, por brindarme sabiduría y fuerza a lo largo de esta carrera.

A mis padres Edgardo y Mercedes por siempre estar a mi lado, por apoyarme en mis sueños, por todos sus consejos. Por estar presente no solo en esta etapa de mi vida sino en todo momento. Son mi ejemplo para seguir, mi motor y mi orgullo.

A mi hermano Daniel que es uno de los principales motores para culminar este ciclo. Recuerda que los sueños se pueden cumplir con esfuerzo y dedicación.

A mi abuela Noris por su amor, motivación, ayuda y por siempre creer en mí.

A mi abuelo Mario y a mis tíos Claudia, Mónica, Maruja, Eudaldo, Mauricio y Jairo, por todo su apoyo desde el inicio hasta el fin de esta etapa.

A mis primos Claudia, Claudeth, William, Diego, Ariadna, Gabriela, Alejandro, Daniela, Danna, Miguel, Ledys, por su motivación y compañía en este proceso.

A Yeraldí Cogollo por ser mi amiga, consejera, apoyo, novia, por ser mi polo a tierra, por amarme.

A la familia Cogollo Torres por abrirme las puertas de su casa, por su cariño y apoyo incondicional.

A Carlos Zafra, Yeilly Buitrago, Alejandro Lozano, Carolina Reyes, Anderson Toloza, Silvia Orduz, Cristian Rodríguez y Alexis Castillo por su amistad, apoyo y compañía.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE), por el financiamiento para la realización de este trabajo, mediante el proyecto capital semilla Titulado “Análisis de problemas de desgaste de herramientas en la industria manufacturera”.

Al Ingeniero Alejandro Toro por su asesoría y apoyo en las pruebas realizadas en el Laboratorio de Tribología y Superficies de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (UnalMed).

Al laboratorio de estereoscopía de la UnalMed por su servicio y al Ingeniero encargado Efraín Zulúaga por su colaboración.

Al laboratorio de microscopía de la Universidad Industrial de Santander (UIS) sede Guatiguará por la prestación de sus servicios y al Ingeniero Carlos Alberto Chacón por su ayuda.

Al laboratorio de espectroscopía de emisión atómica por chispa de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales UIS por la prestación de sus servicios y al Ingeniero Pedro Delvasto por su colaboración.

Al laboratorio de Ciencia de Materiales Biológicos y Semiconductores (CIMBIOS) de la UIS sede Guatiguará y al Ingeniero Rogelio Ospina Ospina por su apoyo.

A todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales UIS por la formación y las enseñanzas impartidas.

A los técnicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales UIS: Sergio, Domingo, Ambrosio, Javier, Mario y Oscar por su orientación, disposición y ayuda.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	14
1. ANTECEDENTES.....	15
1.1 MECANISMOS DE DESGASTE .....	15
1.2 MÁQUINA PIN-SOBRE-DISCO .....	17
1.3 RÉGIMENES DE DESGASTE POR DESLIZAMIENTO DE LOS ACEROS .....	17
1.4 EFECTO DE LA DUREZA DE LOS CUERPOS EN EL DESGASTE.....	18
2. OBJETIVOS.....	20
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
3. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN.....	21
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	21
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES A ENSAYAR.....	21
3.3 ENSAYO DE DESGASTE POR DESLIZAMIENTO .....	23
3.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES DESGASTADAS.....	25
3.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON INVESTIGACIONES .....	25
3.6 MICRODUREZA DE LAS SUPERFICIES DESGASTADAS .....	26
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	28
4.1 FUERZA DE FRICCIÓN.....	28
4.2 PÉRDIDA DE MASA EN LOS PINES .....	30
4.3 OBSERVACIÓN DE LAS SUPERFICIES DE DESGASTE .....	31
4.4 ANÁLISIS GENERAL .....	35
4.5 MICRODUREZA DE LAS SUPERFICIES DESGASTADAS .....	37
5. CONCLUSIONES.....	40
6. RECOMENDACIONES.....	41
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42
BIBLIOGRAFÍA.....	44
ANEXOS.....	45

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición química en % atómico de los aceros AISI H13 y AISI 4140. ....	22
Tabla 2. Durezas medidas, grados de resistencia y límite elástico de los pines [15]. ....	22
Tabla 3. Tratamiento térmico y dureza obtenida por los discos de acero AISI H13. ....	23
Tabla 4. Condiciones de los ensayos experimentales. ....	24
Tabla 5. Condiciones ensayadas en el proyecto de investigación. ....	26
Tabla 6. Condiciones de medidas de microdureza. ....	27
Tabla 7. Resultados de fuerza y coeficientes de fricción promedios. ....	30
Tabla 8. Resultados representativos de la pérdida de masa que presentaron los pines en los ensayos de desgaste. ....	31
Tabla 9. Resultados de fuerza de fricción promedio, coeficiente de fricción promedio y pérdida de masa promedio de las condiciones estudiadas. ....	36
Tabla 10. Resultados de microdureza de los cuerpos antes y después de ensayados y porcentaje de endurecimiento obtenido. ....	37

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Descripción de los cuatro mecanismos de desgaste: a) Abrasión, b) Adhesión, c) Reacción triboquímica, d) Fatiga Superficial. ....	16
Figura 2. Esquema del montaje de un equipo pin-sobre-disco para ensayos de desgaste por deslizamiento. ....	17
Figura 3. Área aparente y área real de contacto [1]. ....	18
Figura 4. Relación entre microdureza de disco y de pin ( $H_d/H_p$ ) como una función del tiempo de deslizamiento [4] para cuerpos duros (a) y cuerpos blandos (b). ....	19
Figura 5. Esquema de las 4 regiones en donde fueron realizadas las medidas del pin (a) y el disco (b). ....	27
Figura 6. Curva representativa de la fuerza de fricción para las réplicas de la condición D35-P28. ....	28
Figura 7. Curva representativa de la fuerza de fricción para las réplicas de la condición D35-P34. ....	29
Figura 8. Curva representativa de fuerza de fricción para las réplicas de la condición D35-P39. ....	30
Figura 9. Superficies de los cuerpos desgastados a 1X en la condición D35-P28 a) Superficie del disco y b) Superficie del pin. ....	32
Figura 10. Superficies de los cuerpos desgastados a 1X según la condición D35-P34 a) superficie del disco y b) superficie del pin. ....	32
Figura 11. Superficies de los cuerpos desgastados a 1X según la condición D35-P39 a) superficie del disco b) superficie del pin. ....	33
Figura 12. Micrografías obtenidas por SEM de la superficie desgastada del disco con la condición D35-P28 a) 40x, b) BSE 40x, c) 100x y d) BSE 100x. ....	34
Figura 13. Micrografías obtenidas por SEM de la superficie desgastada del pin con la condición D35-P28. ....	35
Figura 14. Imágenes de discos representativos de 43 y 50 HRC. Se indican las zonas donde se realizaron las medidas de microdurezas. ....	38
Figura 15. Relación $H_d/H_p$ de los valores de microdureza de las superficies desgastadas en función del tiempo de deslizamiento para cuerpos duros (a) y cuerpos blandos (b). ....	39

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Porcentaje de endurecimiento.....	26
-----------------------------------------------	----

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Micrografías a 1000X obtenidas de los pines con diferentes niveles de durezas en estado de entrega: a) 28 HRC, b) 34 HRC y c) 39 HRC. ....	45
Anexo B. Micrografía a 1000X de los discos de acero AISI H13 después del tratamiento térmico. ....	46
Anexo C. Superficie desgastada de disco 35 HRC para la toma de microdureza. ....	46
Anexo D. Micrografías obtenidas por SEM a 400X de la superficie desgastada del pin (a) y disco (b) para régimen de desgaste severo. ....	47
Anexo E. Micrografías obtenidas por SEM a 400X de la superficie desgastada del pin (a) y disco (b) para régimen de desgaste moderado. ....	48

## RESUMEN

**TITULO:** ESTUDIO DE LOS REGÍMENES DE DESGASTE POR DESLIZAMIENTO SIN LUBRICACIÓN DE ACEROS\*

**AUTOR:** EDGARDO MARIO SAAVEDRA PIÑERES\*\*

**PALABRAS CLAVE:** DESLIZAMIENTO EN SECO, DESGASTE, RÉGIMEN SEVERO, RÉGIMEN MODERADO, ENSAYOS PIN-SOBRE-DISCO.

El objetivo de este trabajo es estudiar los regímenes de desgaste por deslizamiento sin lubricación que ocurren en las superficies de aceros que están en contacto y movimiento relativo. Como metodología se realizaron ensayos de desgaste por deslizamiento sin lubricación de pines de acero AISI 4140 con tres niveles de dureza sobre discos de acero AISI H13 con un nivel de dureza. Las condiciones utilizadas fueron una velocidad de deslizamiento de 0,1 m/s, una carga normal de 49 N, radio de pista de 25 mm y un tiempo de deslizamiento de 3600 s. Se realizaron pruebas de estereoscopia y microscopia electrónica de barrido en las superficies desgastadas. Se elaboraron pruebas de microdureza a las superficies desgastadas y compararon con resultados obtenidos en investigaciones de referencia. Los resultados mostraron que la fuerza de fricción aumenta con el aumento de la dureza de los pines. Se observó presencia de marcas de deformación plástica y no se observó presencia de óxidos en las superficies desgastadas, lo cual se atribuye a un régimen severo de desgaste por deslizamiento. El endurecimiento del material en la zona desgastada da un conocimiento de los mecanismos que interfieren en el desgaste de los cuerpos, ya que son representativos de los distintos regímenes de desgaste. Se concluyó que el aumento de microdureza eran mayores en zonas con presencia de óxido en comparación a las zonas brillantes y con marcas de deformación plástica.

**\*Trabajo de grado (modalidad, proyecto de investigación)**

**\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas.**

**Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.**

**Director: Dr. Cristian Camilo Viáfara Arango, Ingeniero Mecánico.**

## ABSTRACT

**TITLE:** STUDY OF DRY SLIDING REGIMES OF STEELS \*

**AUTHOR:** EDGARDO MARIO SAAVEDRA PIÑERES\*\*

**KEYWORDS:** DRY SLIDING, WEAR, SEVERE REGIME, MILD REGIME, PIN-ON-DISK TEST.

The objective of this work is to dry study the sliding wear regimes occurring in steel surfaces that are in contact and relative movement. Sliding wear tests were carried out with of AISI 4140 steel pins with three hardness levels on discs of AISI H13 steel with a hardness level. The conditions used were sliding speed of 0.1 m / s, normal load of 49 N, track radius of 25 mm and sliding time of 3600 s. Stereoscopic and scanning electron microscopy tests were performed on worn surfaces. Microhardness tests were made on weathered surfaces. The results showed that friction force increases with the rise in the hardness. Presence of plastic deformation marks was observed at worn surface, which is attributed to a severe wear regime. The strain-hardening of the steel in the worn surface gives an understanding of the mechanisms that interfere in the wear of the bodies, since they are representative of the different wear regimes. It was concluded that the increase in microhardness was greater in worn surface regions with the presence of oxide compared to bright and plastic deformation marks.

\* Degree work (modality, research project

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas.

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Director: Dr. Cristian Camilo Viáfara Arango, Ingeniero Mecánico.

## INTRODUCCIÓN

El estudio de la fricción y el desgaste es importante para fines industriales, ya que algunos mecanismos presentes en máquinas están basados en el movimiento generado por el contacto de una superficie sólida sobre otra. Siempre que se encuentren dos superficies en contacto y movimiento relativo se producirá fricción generando pérdida de material y con ello la variación de las dimensiones del diseño original de una pieza, disminuyendo la eficiencia de un sistema.

No hay forma de evitar el desgaste de los cuerpos producto de la fricción, pero se puede disminuir la intensidad de su efecto. Una forma de evaluar el desgaste producido en los materiales es la simulación en laboratorio de un sistema tribológico ejecutando ensayos pin-sobre-disco.

El estudio del endurecimiento del material en la zona afectada ayuda a la comprensión de los mecanismos que interfieren en el desgaste de dos cuerpos, ya que estos mecanismos son representativos de los distintos regímenes que se presentan en el sistema. Se puede encontrar un sistema que presente un régimen severo de desgaste en donde predomina un mecanismo adhesivo y posee una alta tasa de desgaste casi de tres órdenes de magnitud mayor con relación al régimen moderado en donde predomina un mecanismo oxidativo de desgaste [1].

Son muchas las investigaciones encontradas en la literatura sobre el estudio del fenómeno de desgaste por deslizamiento en seco de aceros [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Este proyecto busca complementar los resultados obtenidos en la investigación realizada por Viáfara [2, 3, 4], frente a la importancia de avanzar en el entendimiento del estudio de los regímenes de desgaste por deslizamiento. Los materiales utilizados para la realización de este proyecto son un acero de herramienta H13 utilizado en la fabricación de matrices de trefilado y un acero 4140 utilizado en el conformado de tornillos, los aceros están en contacto continuó industrialmente en la fabricación de herramientas.

## **1. ANTECEDENTES**

El desgaste es un fenómeno en el cual se presenta pérdida de material causado por el contacto entre dos superficies en movimiento [1]. Este fenómeno genera grandes pérdidas económicas en el ámbito industrial, ya que no permite el funcionamiento óptimo de las máquinas. El desgaste se puede observar en un entorno cotidiano ya sea en la pérdida del filo de un cuchillo de cocina, hasta en la punta de un lápiz que se está utilizando. Cualquier cuerpo en movimiento que genere roce o una pequeña fricción con otra superficie por más lisa que parezca, va a producir desgaste.

El desgaste es estudiado por la tribología la cual se conoce como “La ciencia que estudia la interacción entre dos cuerpos en movimiento” [1]. Para el estudio de los cuerpos en contacto es necesario definir un sistema para delimitar el campo de validez de las propiedades tribológicas, teniendo en cuenta los elementos, las propiedades y las interacciones ocurridas en el sistema con el fin de determinar el tipo de desgaste presente. Este sistema se denomina tribosistema y está definido por un cuerpo, un contra-cuerpo, los elementos entre ambos cuerpos y la interacción con el medio ambiente [11].

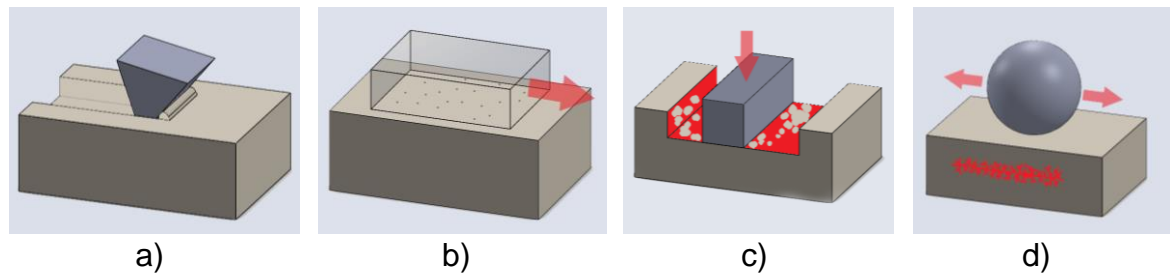
El estudio de los sistemas tribológicos da a conocer que existen diferentes tipos de desgaste los cuales son causantes de la pérdida de material en un tribosistema. Según Zum-Gahr [1] existen cinco tipos de desgaste que denomina como: deslizante, por rodaduras, por oscilación, por impacto y erosivo. Cada tipo de desgaste está representado por la acción de uno o más mecanismos de desgaste los cuales son los causantes de la remoción de material en el tribosistema.

### **1.1 MECANISMOS DE DESGASTE**

El fenómeno por el cual se presenta la remoción de material entre los cuerpos en contacto con movimiento relativo tiende a ser más complejo, por eso se estudian una serie de mecanismos de desgaste. Zum-Gahr basándose en la norma DIN

50320 [12], propone cuatro mecanismos de desgaste que son: abrasión, adhesión, fatiga superficial y reacción triboquímica como se ilustra en la Figura 1.

**Figura 1.** Descripción de los cuatro mecanismos de desgaste: a) Abrasión, b) Adhesión, c) Reacción triboquímica, d) Fatiga Superficial.



El desgaste abrasivo es el desprendimiento de material causado por la presencia de partículas duras entre las caras de las superficies de dos cuerpos en movimiento relativo, o por la presencia de protuberancias duras en una o ambas superficies [1].

El desgaste adhesivo ocurre cuando dos superficies que se encuentran en movimiento relativo generan una alta presión local entre las asperezas de contacto, la cual da como resultado una deformación plástica, la adhesión o formación de uniones locales. El deslizamiento relativo entre las superficies de contacto provoca la ruptura de estas uniones, lo que provoca la pérdida del material de uno o ambos cuerpos del tribosistema [1].

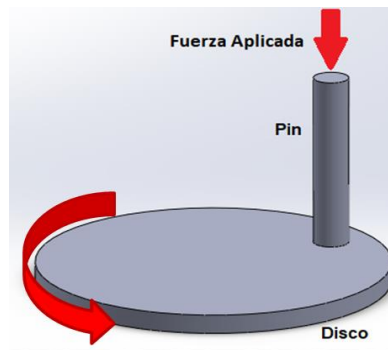
El desgaste debido a la fatiga superficial se caracteriza por la formación de grietas y el desprendimiento del material causado por cargas repetitivas sobre la superficie sólida [1].

El desgaste triboquímico se caracteriza por tener un efecto fisicoquímico en el tribosistema, en el cual los cuerpos en contacto generan fricción entre ellos a causa del movimiento y a su vez reaccionan con el medio ambiente [1].

## 1.2 MÁQUINA PIN-SOBRE-DISCO

Una máquina del tipo pin-sobre-disco (pin-on-disk), es un equipo que se utiliza para estudiar el desgaste, la lubricación y la fricción entre materiales que se encuentran en contacto deslizante. El ensayo consiste en presionar un pin fijo con una carga determinada sobre un disco giratorio, como se observa en la Figura 2. El sistema genera una pérdida de masa producto del desgaste por el movimiento entre los cuerpos. Los resultados de desgaste pueden ser reportados como una pérdida de volumen tanto para el pin, como para el disco. También se puede establecer la fuerza de fricción existente entre los dos materiales sometidos al ensayo, mediante la incorporación de una celda de carga [9]. El ensayo se rige por la norma ASTM G99 [10].

**Figura 2.** Esquema del montaje de un equipo pin-sobre-disco para ensayos de desgaste por deslizamiento.



## 1.3 REGÍMENES DE DESGASTE POR DESLIZAMIENTO DE LOS ACEROS

En el desgaste por deslizamiento sin lubricación de los aceros se presentan normalmente dos mecanismos de desgaste dominantes: el desgaste adhesivo y el desgaste oxidativo [1]. Estos mecanismos resultan en regímenes de desgaste severo y moderado como consecuencia de las altas y bajas tasas de desgaste producidas [3]. Una pequeña variación en las condiciones ya sea en la rugosidad de las superficies, la dureza de los materiales, la velocidad de deslizamiento, entre

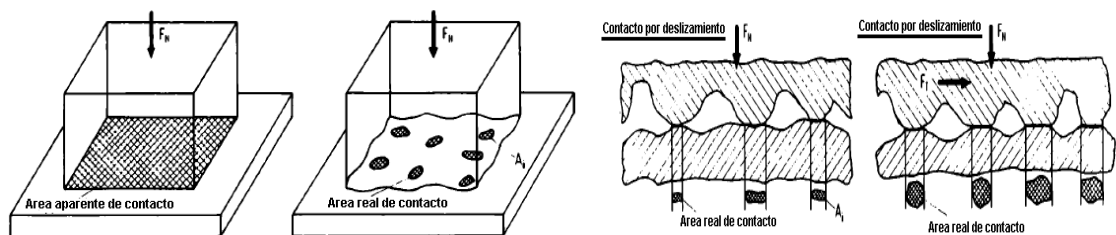
otros, puede producir una transición entre los dos regímenes, ya sea del régimen severo al moderado o viceversa [2].

#### 1.4 EFECTO DE LA DUREZA DE LOS CUERPOS EN EL DESGASTE

El desgaste por deslizamiento se puede ver afectado por las propiedades mecánicas de los metales como la dureza, la resistencia a la fatiga, la resistencia a la fractura entre otros [1]. En los ensayos por deslizamiento se puede decir que las uniones de adhesión se promueven al disminuir la dureza de los materiales en contacto con una carga dada. Esto se debe a que las superficies más blandas se deforman plásticamente a cargas más bajas favoreciendo la formación de un área real de contacto más grande [1].

Las superficies de los cuerpos no son completamente lisas, poseen una rugosidad que está compuesta por asperezas (colinas y valles a escala microscópica) [1]. Se conoce como área real de contacto a la unión de los contactos puntuales formados por las asperezas. En la Figura 3 se muestra el área real de contacto producida durante el contacto de dos superficies rugosas [1].

**Figura 3.** Área aparente y área real de contacto [1].

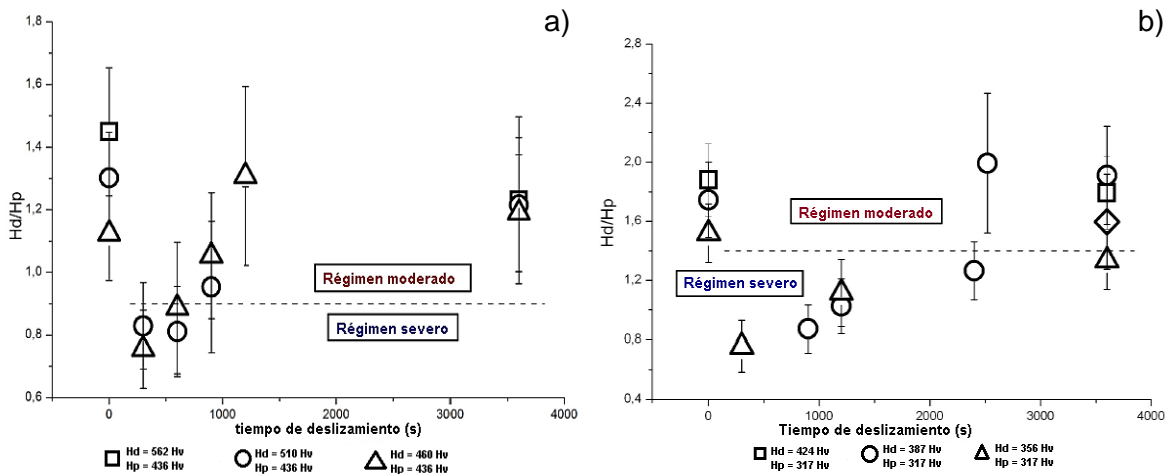


El área de ruptura depende del acabado de la superficie (la rugosidad). Esto se debe que a mayor rugosidad se obtendrá una menor área real de contacto entre las superficies. La tasa de desgaste aumenta con la carga normal y la resistencia de las uniones de adhesión, ya que estos factores aumentan la probabilidad de formar una adhesión local [1]. Según Levy [13] la pérdida de masa disminuye a medida que aumenta la dureza en los cuerpos. Una alta capacidad de endurecimiento de los

cuerpos durante el deslizamiento promueve una menor pérdida de masa [1]. El endurecimiento por deformación depende del metal, su microestructura y de las condiciones de operación [1]. Durante el desgaste por deslizamiento en seco, las deformaciones se acumulan en una superficie cargada debido al paso repetido de asperezas de la superficie opuesta multiplicando las dislocaciones [1]. Para un material dado, las deformaciones se ven aumentadas por un coeficiente de fricción y presión aplicada. Las deformaciones superficiales y las densidades de dislocación resultantes aumentan con el número de pasajes repetidos de asperezas de la superficie opuesta.

Según los estudios realizados por Viáfara [4], se propone una relación entre la microdureza del disco y del pin para los ensayos de desgaste por deslizamiento en función del tiempo de deslizamiento para la determinación de los regímenes de desgaste severo y moderado, teniendo en cuenta la dureza inicial de los cuerpos y el incremento del endurecimiento durante el periodo de deslizamiento. En la Figura 4 se puede observar la relación propuesta por Viáfara para cuerpos duros (a) y cuerpos blandos (b).

**Figura 4.** Relación entre microdureza de disco y de pin ( $H_d/H_p$ ) como una función del tiempo de deslizamiento [4] para cuerpos duros (a) y cuerpos blandos (b).



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Estudiar los regímenes de desgaste por deslizamiento de los aceros AISI H13 y AISI 4140.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- 1.** Reproducir en laboratorio el régimen de desgaste por deslizamiento severo en aceros por medio de ensayos pin-sobre-disco.
- 2.** Caracterizar las superficies desgastadas por medio de análisis estereoscópico, análisis por microscopia electrónica de barrido (SEM) y ensayos de micro-dureza.
- 3.** Relacionar la operación del régimen severo con el endurecimiento de las superficies desgastadas.

### **3. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN**

A continuación, se presentan las actividades realizadas para llevar a cabo los objetivos del proyecto de grado. Este trabajo contó con la financiación del proyecto capital semilla de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE), titulado “Análisis de problemas de desgaste de herramientas en la industria manufacturera” [14].

#### **3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

Se realizó una consulta permanente de artículos científicos, libros, documentos relacionados con los temas de fricción, desgaste de aceros, mecanismos de desgaste, entre otros, con el fin de conocer las características de los regímenes de desgaste. La base del proyecto fue la investigación realizada por Viáfara [2, 3, 4] y el proyecto de grado titulado “Estudio del fenómeno de la transición severo-moderado en el régimen de desgaste por deslizamiento de aceros” [5].

#### **3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES A ENSAYAR**

Los materiales que fueron utilizados para el desarrollo del proyecto son el acero de herramienta AISI H13 para el disco y el acero de baja aleación AISI 4140 para el pin. La selección de estos aceros se realizó siguiendo la investigación de Viáfara [4].

A los materiales AISI H13 y AISI 4140 se les realizó una caracterización metalográfica en el Laboratorio de Metalografía. También se realizó un análisis de composición química en el Laboratorio de Espectrometría de Emisión por Chispa y una prueba de dureza en el Laboratorio de Tratamientos Térmicos. Todos los laboratorios mencionados pertenecen a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la UIS. Con los resultados de dureza, microestructura y composición química se pudo conocer el estado de entrega de los aceros. En la Tabla 1 se pueden observar la composición química de los aceros.

**Tabla 1.** Composición química en % atómico de los aceros AISI H13 y AISI 4140.

ACERO	%C	%Si	%Mn	%P	%Cr	%Mo	%Ni	%Cu	%V	%W
<b>AISI H13</b>	0,511	0,976	0,552	0,017	4,981	1,210	0,702	0,297	0,904	0,263
<b>AISI 4140</b>	0,358	0,071	0,982	0,008	0,435	0,097	0,100	0,097	0,003	0,006

El acero AISI 4140 fue obtenido en ferreterías comerciales en forma de tornillos Bristol con 6 mm de diámetro y con diferentes niveles de resistencias mecánicas. Los tornillos fueron cortados en dimensiones de 12 mm de longitud seleccionando la parte sin rosca. En la Tabla 2 se pueden observar las propiedades mecánicas de los pines de acero AISI 4140 según los parámetros establecidos por la norma DIN 960 - ISO 8765 [17].

**Tabla 2.** Durezas medidas, grados de resistencia y límite elástico de los pines [15].

Dureza [HRC]	Grado de resistencia Norma DIN 960 - ISO 8765	$\sigma_y$ [Mpa]
28 $\pm$ 1	8.8	640
34 $\pm$ 1	10.9	900
39 $\pm$ 1	12.9	1090

En el Anexo A se observan las micrografías obtenidas por microscopía óptica de los pines de acero AISI 4140 en estado de entrega. Se observa la presencia de una microestructura fina de martensita revenida con una precipitación de carburos posiblemente de cromo, teniendo en cuenta la composición química presentada en la Tabla 1.

El acero AISI H13 fue obtenido de la empresa Aceros BÖHLER de Colombia, adquirido en forma de discos con 11 mm de altura y 76 mm de diámetro. Con los resultados de dureza obtenidos, se realizó un tratamiento térmico para los discos con la empresa TRATAR SAS, con el propósito de obtener las durezas necesarias para garantizar la reproducción del régimen de desgaste severo por deslizamiento en los ensayos de laboratorio. El tratamiento térmico fue de temple y revenido, el

cual consistió en llevar los discos a una temperatura de austenización de 1050 °C con un tiempo de mantenimiento de 1 hora. Las temperaturas de revenido para el primer y segundo revenido se determinaron siguiendo la ficha técnica puesta a disposición por la empresa BÖHLER de Colombia, teniendo en cuenta la dureza deseada. En la Tabla 3 se muestran las durezas y microestructura de los discos obtenidos después del tratamiento térmico.

**Tabla 3.** Tratamiento térmico y dureza obtenida por los discos de acero AISI H13.

Tratamiento térmico	Temperatura de revenido [°C]		Dureza [HRC]
Temple y revenido	Primer revenido	700	35
	Segundo revenido	670	

En el Anexo 2 se observa la micrografía obtenida por microscopía óptica del disco de acero AISI H13 después del tratamiento térmico realizado. En la figura se muestra una micrografía típica de acero con tratamiento térmico de temple y revenido. Se observa una estructura fina de martensita revenida y carburos posiblemente de los elementos aleantes. Los discos después del tratamiento térmico fueron sometidos a un rectificado de sus superficies, para garantizar una tolerancia geométrica adecuada para la realización de los ensayos de desgaste.

### 3.3 ENSAYO DE DESGASTE POR DESLIZAMIENTO

Se ejecutaron pruebas de desgaste por deslizamiento pin-sobre-disco siguiendo las especificaciones de la norma ASTM G99-17 [16]. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Tribología y Superficies de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (UNALMED) bajo la supervisión del Dr. Alejandro Toro. La máquina pin-sobre-disco maneja un rango de carga entre 1 y 50 N y por medio de una celda de carga se puede medir la fuerza tangencial en la intercara de las superficies ejercida por el deslizamiento de los dos materiales. Para el montaje se verificó con un comparador de carátula una tolerancia geométrica de 1°.

Los ensayos fueron ejecutados en un radio de 25 mm con respecto al centro del disco y sin interrupción. Los parámetros de velocidad de deslizamiento y tiempo fueron constantes para todos los ensayos. Estas condiciones se seleccionaron según los resultados experimentales registrados en la literatura a partir de las investigaciones de referencia [2, 3, 4, 5] en las cuales se aplicó un esfuerzo nominal de 1,86 MPa aproximadamente. Los ensayos se realizaron con una velocidad de 0,1 [m/s], en un tiempo de 3600 [s] y con una carga normal de 49 [N].

Se ejecutaron 14 ensayos utilizando siete discos por ambas caras y un pin para cada ensayo, realizando al menos 3 repeticiones por condición ensayada. Variando solo la dureza de los pines. La nomenclatura utilizada fue  $H_d$  para la dureza de los discos y  $H_p$  para la dureza de los pines. En la tabla 4 se muestra las condiciones de los ensayos de desgaste, donde se trabajó una dureza de disco y tres niveles de durezas de pines distintas.

**Tabla 4.** Condiciones de los ensayos experimentales.

$H_d$ [HRC]	Nomenclatura de la condición	$H_p$ [HRC]
$35 \pm 1$	D35 – P28	$28 \pm 1$
	D35 – P34	$34 \pm 1$
	D35 – P39	$39 \pm 1$

Antes de iniciar los ensayos se verificó la nivelación de la máquina pin-sobre-disco mediante el empleo de un nivel de burbuja. Para garantizar un contacto uniforme entre la superficie del disco mecanizado y la superficie del pin, se realizó un pulido a la superficie del pin por medio de lijas 360 y 600 montadas sobre el disco a ensayar simulando una prueba de desgaste con el fin de eliminar las irregularidades presentes en el pin causadas por el proceso de corte. Se realizó un diseño para la fabricación de un porta-pin teniendo en cuenta las dimensiones de los discos y pines.

Se realizó un proceso de limpieza de las probetas al iniciar y finalizar cada ensayo. La limpieza de los pines se realizó por medio de un baño de ultrasonido durante 5

min, sumergiendo el pin en alcohol industrial con 96% de pureza. Luego el pin fue secado completamente para posteriormente ser pesado. La limpieza de los discos se realizó manualmente empleando un algodón anteriormente sumergido en alcohol, frotándolo sobre el disco con el fin de eliminar impurezas que se encontraran en la superficie. Posteriormente el disco fue secado completamente. La manipulación tanto de los discos como de los pines se realizó con el uso de guantes y pinzas para evitar la contaminación de estos después del lavado. Los discos no fueron pesados ya que sobrepasaba el rango permitido por la balanza de precisión.

### **3.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES DESGASTADAS**

Se realizó un análisis de la morfología de las superficies desgastadas por medio de Estereoscopía en el Laboratorio de Microscopía Óptica en UNALMED y Microscopía Electrónica de Barrido en el Laboratorio de Microscopía de la UIS ubicado en el Parque Tecnológico de Guatiguará (PTG), el haz de electrones usados en SEM fue: electrones secundarios y electrones retrodispersados. Las imágenes obtenidas fueron comparadas con los resultados adquiridos en las investigaciones de referencia [4, 5] buscando complementar el estudio realizado. Las características superficiales obtenidas de las muestras fueron comparadas con los datos de fuerza de fricción y la pérdida de masa sufrida por el pin, con el fin de caracterizar la actuación del régimen de desgaste presentado en los ensayos por deslizamiento.

### **3.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON INVESTIGACIONES**

El análisis de los resultados será complementado con los resultados encontrados en la literatura [5], donde se trabajó con dos durezas de disco ( $H_d$ ) de 43 y 50 HRC y tres niveles de dureza en el pin ( $H_p$ ). En la tabla 5 se muestran las condiciones ensayadas en el trabajo de investigación [5] en donde se utilizaron acero AISI H13 para los discos y acero AISI 4140 para los pines. En estas condiciones de dureza de disco se obtuvieron como resultados la acción de dos regímenes predominantes severo y moderado. En las condiciones de dureza de disco 43 HRC se mostró una simultaneidad entre los regímenes severo y moderado. En las condiciones de

dureza de disco de 50 HRC se obtuvo una transición de régimen severo a régimen moderado, siendo el régimen moderado el dominante.

**Tabla 5.** Condiciones ensayadas en el proyecto de investigación.

H <sub>d</sub> [HRC]	Nomenclatura de la condición	H <sub>p</sub> [HRC]
43 ± 1	D43 – P28	28 ± 1
	D43 – P39	39 ± 1
50 ± 1	D50 - P28	28 ± 1
	D50 – P34	34 ± 1
	D50 – P39	39 ± 1

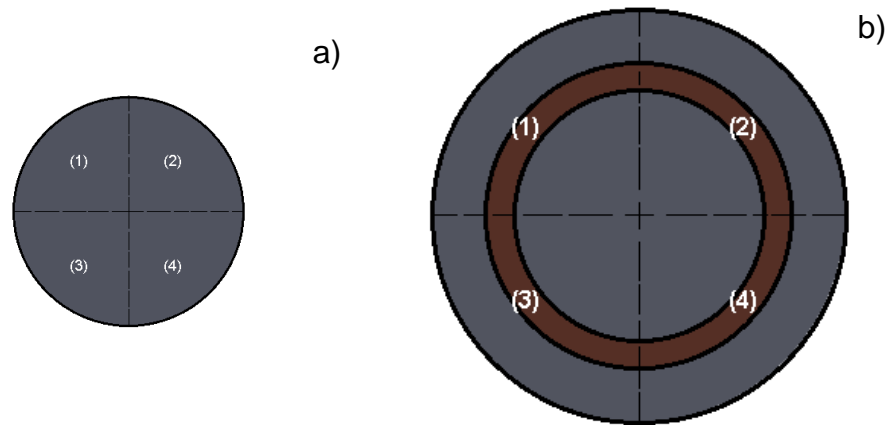
### 3.6 MICRODUREZA DE LAS SUPERFICIES DESGASTADAS

Se realizaron ensayos de microdureza en el Laboratorio de Ciencia de Materiales Biológicos y Semiconductores (CIMBIOS) de la UIS en el PTG para determinar la variación de la dureza superficial en las superficies desgastadas. La toma de microdureza se efectuó en escala Vickers aplicando una fuerza de indentación de 1 Kg durante 15 s y como mínimo 10 medidas por condición para obtener una alta confiabilidad en los resultados. Las mediciones fueron ejecutadas en las superficies desgastadas de los dos cuerpos, en donde se tomaron al menos 10 medidas en la zona sin desgaste y como mínimo 5 medidas en 4 regiones distintas de las marcas de desgaste con el fin de comparar la variación de dureza después del desgaste. Los resultados obtenidos fueron comparados por el porcentaje de endurecimiento [% ΔE], la fórmula utilizada se muestra en la Ecuación 1. En la Figura 5 se presenta un esquema que muestra las 4 regiones en donde fueron realizadas las medidas en el pin (a) y en el disco (b).

**Ecuación 1.** Porcentaje de endurecimiento.

$$\% \Delta E = \frac{\text{Dureza final} - \text{Dureza inicial}}{\text{Dureza inicial}} * 100\%$$

**Figura 5.** Esquema de las 4 regiones en donde fueron realizadas las medidas del pin (a) y el disco (b).



Se realizaron medidas de microdureza a tres condiciones estudiadas, una condición de este proyecto de investigación y dos condiciones del proyecto de investigación “Estudio del fenómeno de la transición severo-moderado en el régimen de desgaste por deslizamiento de aceros” [5]. Estas condiciones se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Condiciones de medidas de microdureza.

$H_d$ [HRC]	Nomenclatura de la condición	$H_p$ [HRC]
$35 \pm 1$	D35 – P39	$39 \pm 1$
$43 \pm 1$	D43 – P28	$28 \pm 1$
$50 \pm 1$	D50 – P34	$34 \pm 1$

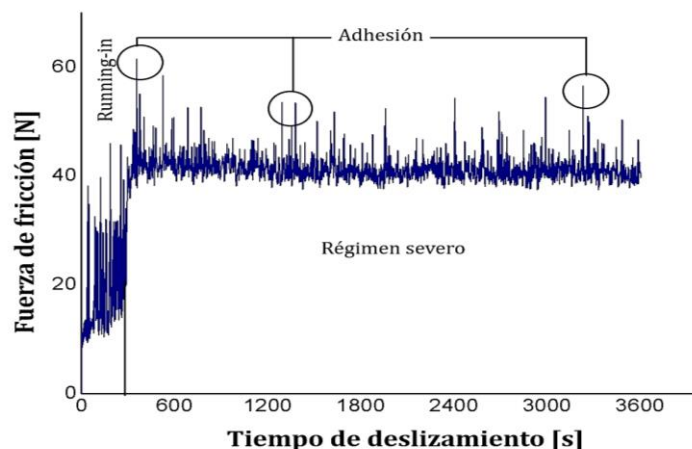
## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La presentación de los resultados y su discusión se fundamentan en el análisis de la fuerza de fricción, la pérdida de masa de los pines, la observación de las superficies de desgaste y las medidas de microdureza.

### 4.1 FUERZA DE FRICCIÓN

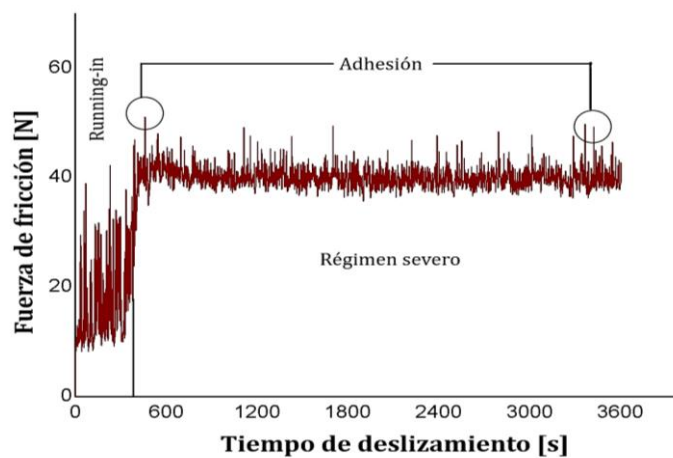
En la Figura 6 se presenta una curva representativa de la fuerza de fricción en función del tiempo de deslizamiento para la condición D35 – P28. El periodo de running-in fue de aproximadamente 300 s, lo que indica que se estableció un área de contacto uniforme de las superficies en un tiempo relativamente corto de acuerdo con la literatura de referencia [4]. Después del periodo de running-in inicia un régimen permanente de desgaste a una fuerza de fricción relativamente constante de 38 N aproximadamente. En la gráfica se observa una alta variación en la fuerza de fricción producto de un desgaste adhesivo por la fuerte interacción entre las asperezas. Este análisis de la curva sugiere que durante el régimen permanente observado se presentó la actuación de un mecanismo de desgaste por adhesión de modo dominante, lo cual se puede atribuir a la actuación de un régimen severo de desgaste.

**Figura 6.** Curva representativa de la fuerza de fricción para las réplicas de la condición D35-P28



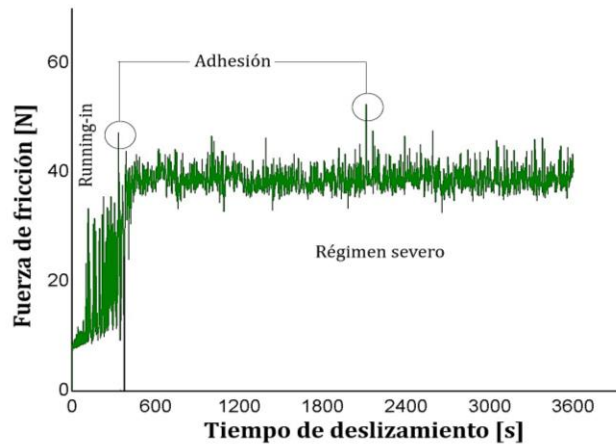
En la Figura 7 se presenta una curva representativa de la fuerza de fricción en función del tiempo de deslizamiento de la condición D35 – P34. La curva presenta características similares a las del periodo de running-in de la condición analizada anteriormente. El régimen permanente inicia con una fuerza de fricción de 39 N aproximadamente. En este régimen se observa nuevamente una alta variación en la fuerza de fricción con la identificación de picos altos como se muestra en la Figura 6. Este análisis del comportamiento de la curva sugiere que bajo esta condición operó un régimen de desgaste severo siendo el mecanismo de desgaste adhesivo el que dominó en este régimen.

**Figura 7.** Curva representativa de la fuerza de fricción para las réplicas de la condición D35-P34.



En la Figura 8 se presenta una curva representativa de la fuerza de fricción en función del tiempo de deslizamiento para la condición D35 – P39. Después del periodo de running-in inicia el régimen severo con una fuerza de fricción de 40 N aproximadamente. En esta condición se observan picos producto de la adhesión con menor magnitud en comparación a la condición de pin 28 la cual alcanza fuerzas de fricción cercanas a los 60 N. El mecanismo de desgaste dominante al igual que en las condiciones anteriores es el de adhesión, lo que sugiere la acción de un régimen de desgaste severo.

**Figura 8.** Curva representativa de fuerza de fricción para las réplicas de la condición D35-P39.



En la Tabla 7 se presenta un resumen de los resultados de la fuerza de fricción obtenida para cada condición estudiada y los coeficientes calculados mediante la relación entre la fuerza de fricción promedio y la carga normal aplicada (49 N). Este valor de la fuerza de fricción ( $F_{f1}$ ) se estimó en la región comprendida por el régimen permanente que inicia una vez termina el periodo running-in hasta finalizar el ensayo como se observó en las curvas de las Figuras 6, 7 y 8. Los resultados obtenidos muestran valores de fuerza de fricción estadísticamente iguales en las tres condiciones estudiadas, lo que indica que no se obtuvo una diferencia apreciable con la variación de la dureza de los pines. Se observan altos coeficientes de fricción ( $\mu_{f1}$ ) lo que indican una mayor interacción entre las asperezas en contacto.

**Tabla 7.** Resultados de fuerza y coeficientes de fricción promedios.

Condición	$F_{f1}$ [N]	$\mu_{f1}$
D35-P28	$38,6 \pm 5,3$	$0,79 \pm 0,11$
D35-P34	$38,9 \pm 5,2$	$0,79 \pm 0,11$
D35-P39	$39,4 \pm 2,2$	$0,80 \pm 0,05$

## 4.2 PÉRDIDA DE MASA EN LOS PINES

La pérdida de masa representa el desgaste sufrido por el pin. Sin embargo, se debe tener en cuenta el desgaste producto de la duración del periodo de running-in y la

transferencia de material durante el ensayo. Este último ocurre con la actuación de un mecanismo de desgaste por adhesión, donde el pin ganaría masa que se transfiere desde el disco. En la tabla 8 se presentan los resultados de pérdida de masa ( $\Delta m$ ) de los pines donde se observa una disminución a medida que aumenta la dureza del pin.

**Tabla 8.** Resultados representativos de la pérdida de masa que presentaron los pines en los ensayos de desgaste.

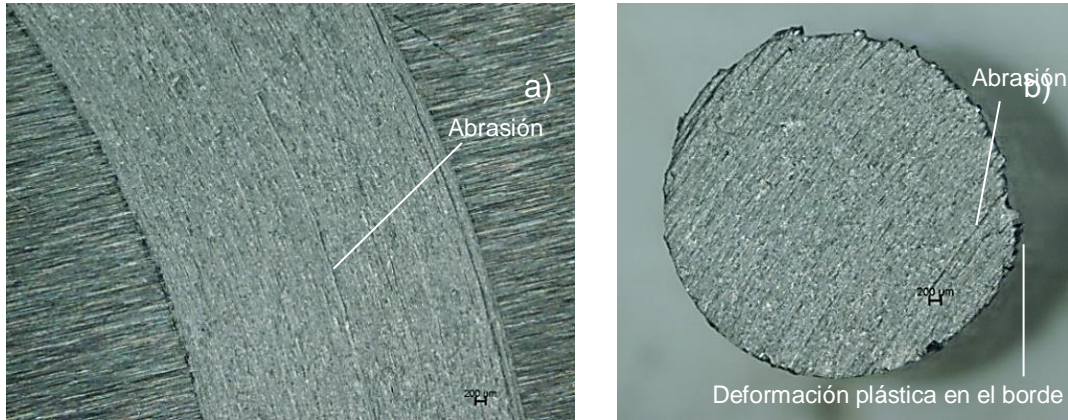
Condición	Pin		
	Masa inicial [g]	Masa final [g]	$\Delta m$ [g]
D35-P28	2,92 ± 0,2	2,22 ± 0,2	0,70 ± 0,1
D35-P34	2,89 ± 0,1	2,30 ± 0,1	0,59 ± 0,1
D35-P39	2,86 ± 0,2	2,31 ± 0,2	0,55 ± 0,1

Los resultados muestran una pérdida de masa apreciable en las condiciones de  $H_d$  de 35 HRC en comparación a los resultados encontrados en la literatura de referencia [4, 5], la cual se puede relacionar con los altos coeficientes de fricción que sugieren que una fuerte interacción entre las asperezas puede provocar una pérdida significativa de material bajo estas condiciones.

#### 4.3 OBSERVACIÓN DE LAS SUPERFICIES DE DESGASTE

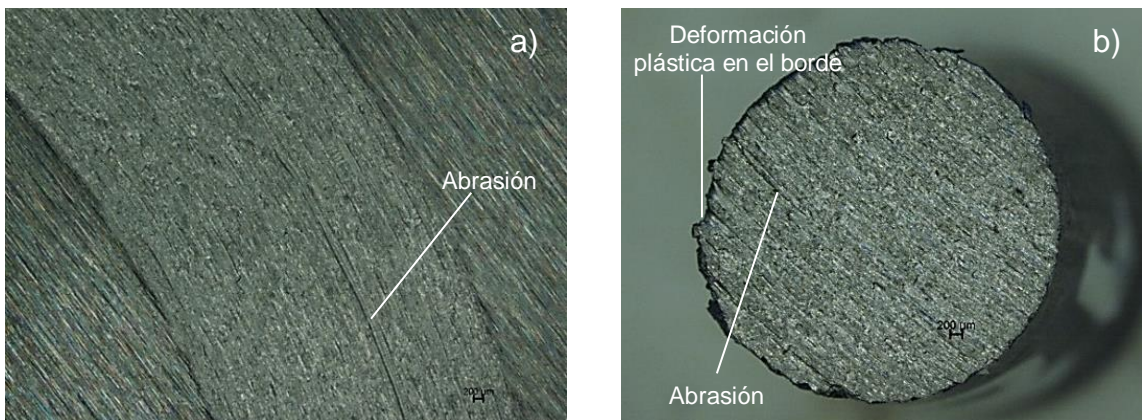
En la Figura 9 se presentan las imágenes obtenidas por estereoscopía de las superficies desgastadas de disco (a) y pin (b) de la condición D35-P28. Se observan en ambas superficies una zona brillante homogénea que se pueden relacionar con marcas de deformación plástica. En el disco se observa una marca continua de abrasión en sentido del deslizamiento, posiblemente derivado de la presencia de partículas en la intercara producto del desgaste. Adicionalmente en los bordes del pin se observan marcas de deformación plástica. Estos resultados confirman la actuación dominante de un mecanismo de desgaste adhesivo identificado en el análisis de la Figura 6.

**Figura 9.** Superficies de los cuerpos desgastados a 1X en la condición D35-P28 a) Superficie del disco y b) Superficie del pin.



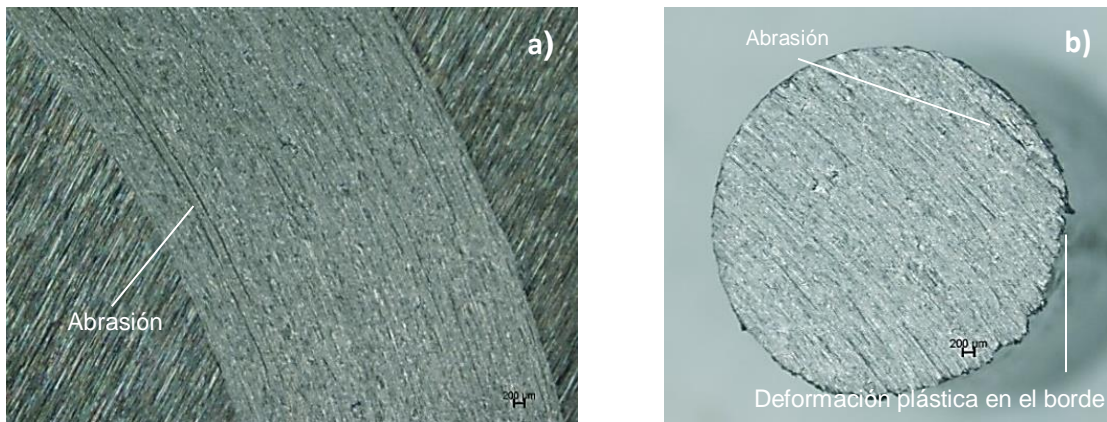
En la Figura 10 se presentan imágenes de las superficies desgastadas del disco (a) y pin (b) de la condición D35-P34. En la superficie del disco se observan marcas de deformación plástica y se logra observar una marca de abrasión continua y en dirección de deslizamiento. Se observan marcas de deformación plástica en los bordes del pin al igual que en la condición anterior. Este análisis confirma que hubo un régimen de desgaste severo permanente.

**Figura 10.** Superficies de los cuerpos desgastados a 1X según la condición D35-P34 a) superficie del disco y b) superficie del pin.



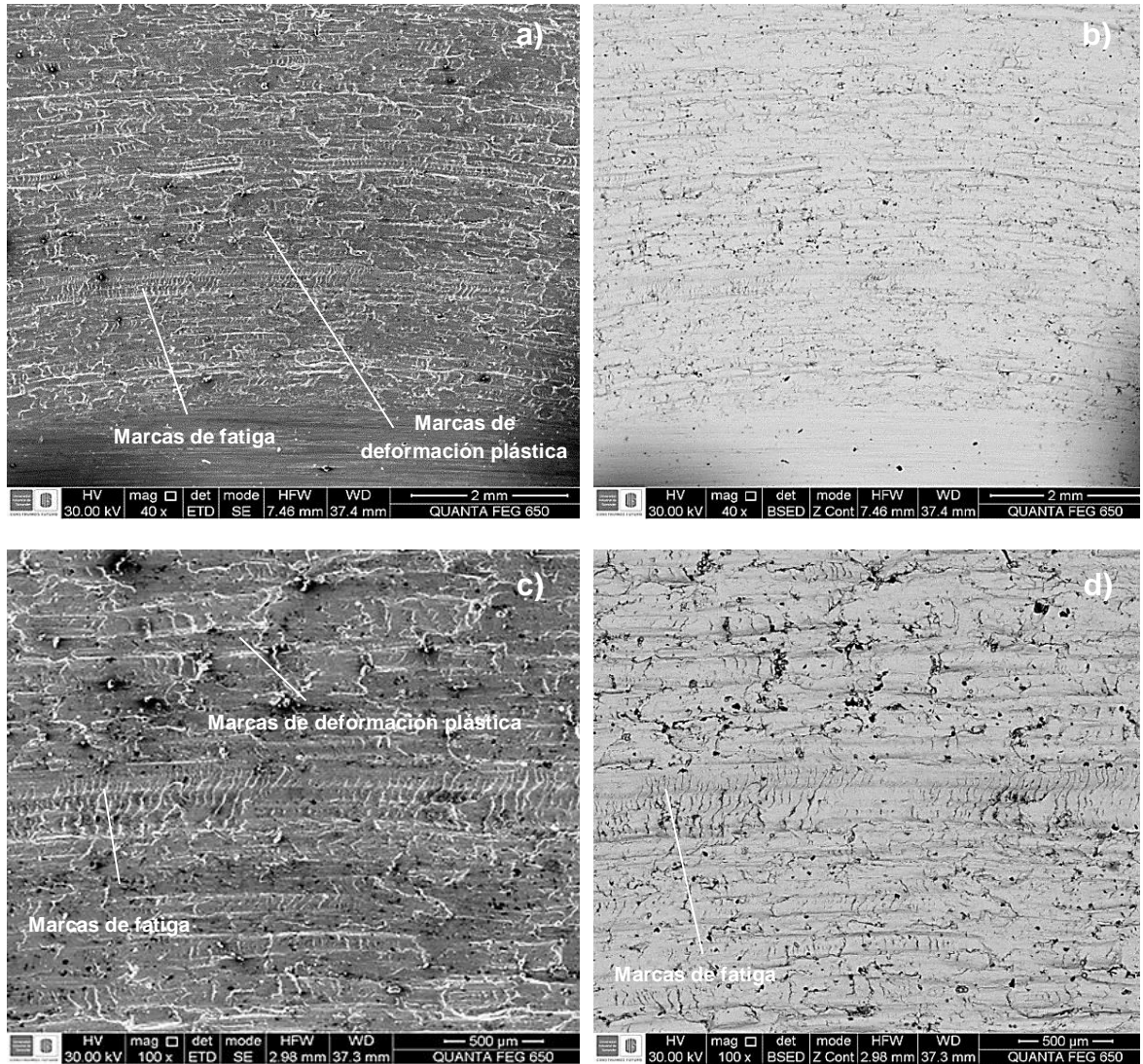
En la Figura 11 se presentan imágenes de las superficies desgastadas del disco (a) y del pin (b) de la condición D35-P39. En la superficie del pin se observan marcas de deformación plástica en la dirección del deslizamiento. En los bordes del pin se observan marcas de deformación plástica al igual que en las condiciones anteriores. Las marcas de contacto metálico sugieren un mecanismo de desgaste adhesivo. En el disco se observan marcas de abrasión más pronunciadas que en las condiciones anteriores posiblemente por causa de la mayor dureza del pin en esta condición. Este análisis confirma la operación de un régimen de desgaste severo permanente.

**Figura 11.** Superficies de los cuerpos desgastados a 1X según la condición D35-P39 a) superficie del disco b) superficie del pin.



En la Figura 12 se muestran las micrografías representativas obtenidas por SEM de la superficie desgastada del disco de las condiciones estudiadas. Se observan marcas de deformación plástica significativas y marcas producto del proceso de rectificado del disco. Lo anterior confirma la actuación de un mecanismo de desgaste adhesivo, que se origina con el rompimiento de las juntas de adhesión de las asperezas en contacto. En la Figura 12 (c) y (d) se pueden observar pequeñas marcas de fatiga cerca de las marcas de deformación plástica. La imagen en el modo BSE en la Figura 12 (c) y (d)) evidencia la presencia de marcas de deformación plástica.

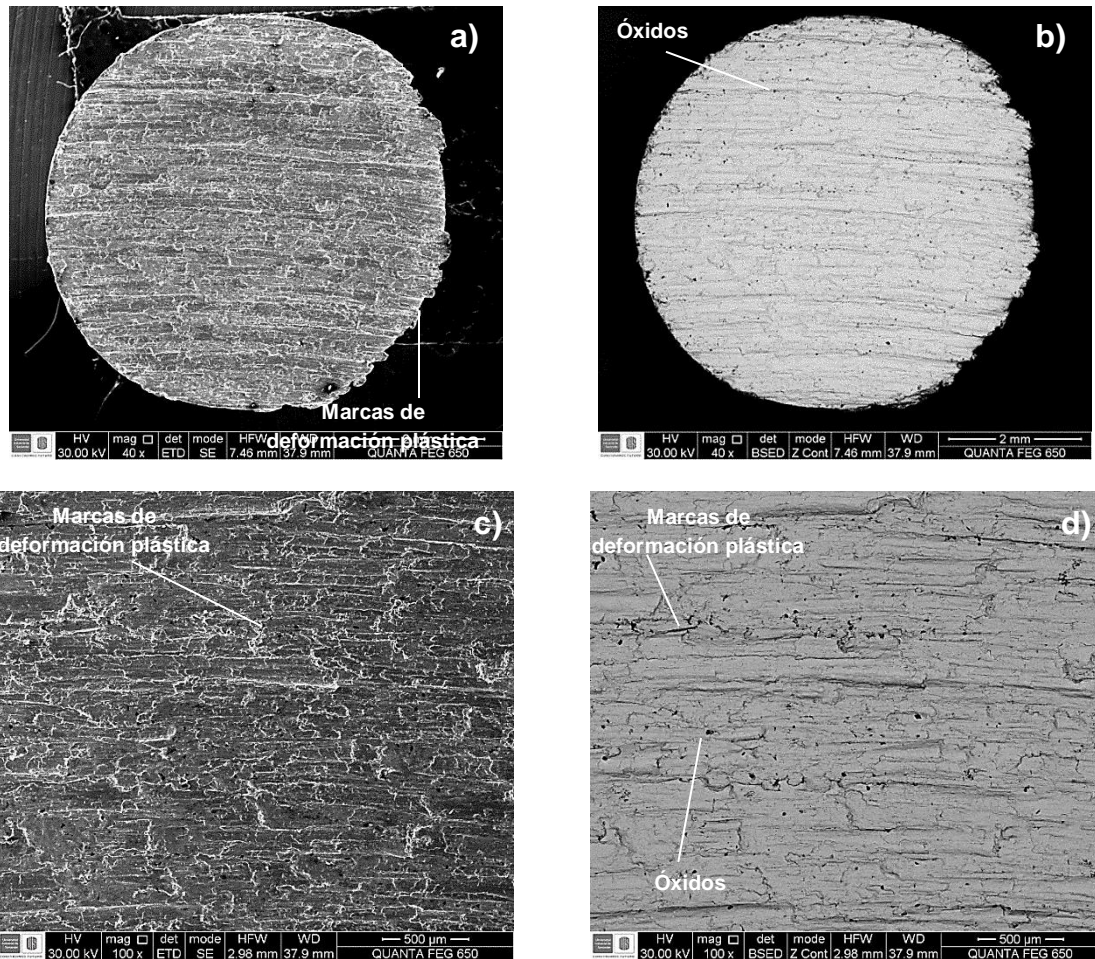
**Figura 12.** Micrográficas obtenidas por SEM de la superficie desgastada del disco con la condición D35-P28 a) 40x, b) BSE 40x, c) 100x y d) BSE 100x.



En la Figura 13 se muestran micrográficas representativas obtenidas por SEM de la superficie desgastada del pin de la condición D35-P28. Se observan marcas de adhesión causada por el contacto metal-metal. En estas imágenes no se observan zonas con marcas de fatiga cerca de las marcas de adhesión como en la superficie del disco. En el modo BSE se observan pequeños puntos negros posiblemente de óxidos en poca cantidad, por lo tanto, no se consideran relevantes en el fenómeno de desgaste. Esto evidencia nuevamente la actuación del mecanismo de desgaste

adhesivo anteriormente identificado en las imágenes por estereoscopía causado por el contacto metálico predominante.

**Figura 13.** Micrografías obtenidas por SEM de la superficie desgastada del pin con la condición D35-P28.



#### 4.4 ANÁLISIS GENERAL

En la tabla 9 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de la fuerza de fricción, coeficiente de fricción y pérdida de masa de las condiciones estudiadas y los resultados obtenidos en los ensayos de la literatura de referencia [5]. La fuerza de fricción  $F_{f2}$  y el coeficiente de fricción  $\mu_{f2}$  representan a una segunda fuerza generada después de la transición del régimen de desgaste severo a moderado que

se obtuvo en los ensayos de la literatura de referencia [5]. Los resultados de la tabla 9 sugieren que la fuerza de fricción disminuye conforme aumenta la dureza de los discos y con la disminución de la fuerza de fricción se reduce la pérdida de masa en los pines.

**Tabla 9.** Resultados de fuerza de fricción promedio, coeficiente de fricción promedio y pérdida de masa promedio de las condiciones estudiadas.

Condición	$F_{f1}$ [N]	$F_{f2}$ [N]	$\mu_{f1}$	$\mu_{f2}$	$\Delta m$ [g]
D35-P28	$38,6 \pm 5,3$	-	$0,79 \pm 0,11$	-	$0,70 \pm 0,1$
D35-P34	$38,9 \pm 5,2$	-	$0,79 \pm 0,11$	-	$0,59 \pm 0,1$
D35-P39	$39,4 \pm 2,2$	-	$0,80 \pm 0,05$	-	$0,55 \pm 0,1$
*D43-P28	$30,2 \pm 2,1$	-	$0,62 \pm 0,01$	-	$0,27 \pm 0,1$
*D43-P39	$33,0 \pm 3,5$	$25,2 \pm 1,2$	$0,73 \pm 0,07$	$0,56 \pm 0,02$	$0,21 \pm 0,1$
*D50-P28	$27,9 \pm 1,7$	$20,7 \pm 1,5$	$0,57 \pm 0,01$	$0,44 \pm 0,02$	$0,21 \pm 0,01$
*D50-P34	$27,9 \pm 1,3$	$21,5 \pm 1,7$	$0,57 \pm 0,01$	$0,48 \pm 0,02$	$0,18 \pm 0,03$
*D50-P39	-	$29,1 \pm 1,6$	-	$0,59 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,02$

\*Datos obtenidos del trabajo de grado “Estudio del fenómeno de la transición severo-moderado en el régimen de desgaste por deslizamiento de aceros” [5].

Con los resultados mostrados en la tabla 9 se puede relacionar las altas fuerzas de fricción en las condiciones de disco de 35 HRC con la alta tasa de desgaste en los pines, la cual para estas condiciones triplica la tasa de desgaste conseguida en el régimen de desgaste moderado obtenido en las condiciones de la dureza de disco de 50 HRC. Los resultados obtenidos sugieren que con el aumento de dureza de los discos disminuye la fuerza de fricción. Los resultados indican que al aumentar la dureza de los pines ensayándolos en cualquier condición de disco, disminuye la pérdida de masa en los pines. Las condiciones de disco de 50 HRC, donde se obtuvo una pérdida de masa baja en los pines se puede asociar a la actuación de un régimen de desgaste moderado como lo sugiere la literatura [1].

#### 4.5 MICRODUREZA DE LAS SUPERFICIES DESGASTADAS

En la Tabla 10 se muestran valores representativos de microdureza de las superficies de pines y disco antes y después de ensayados para la condición D35–P39. Adicionalmente, se realizaron medidas de microdurezas a las condiciones D43-P28 y D50-P34 estudiadas en el trabajo de grado realizado por Cogollo [5]. Para los discos de 43 y 50 HRC, se realizaron medidas a dos zonas en la superficie desgastada, ya que se identificó una zona oscura (zona 1) producto de la formación de óxido atribuido al régimen de desgaste moderado y otra zona brillante (zona 2) con marcas de arado y de deformación plástica atribuido a la actuación de un régimen severo de desgaste. En la Figura 14 se pueden observar imágenes representativas de estas zonas. Se debe tener en cuenta que en estas condiciones los discos mostraron una transición de régimen severo a moderado.

**Tabla 10.** Resultados de microdureza de los cuerpos antes y después de ensayados y porcentaje de endurecimiento obtenido.

Condición		Microdureza inicial [HV]	Microdureza final [HV]	% ΔE	Desgaste
D35-P39	Pin	499 ± 22	747 ± 54	50	Severo
	Disco	427 ± 99	545 ± 42	28	
*D43-P28	Pin	359 ± 19	425 ± 41	19	Simultáneo
	Disco	554 ± 22	823 ± 19 (Zona 1)	49 (Zona 1)	
652 ± 43 (Zona 2)			18 (Zona 2)		
*D50-P34	Pin	447 ± 24	468 ± 25	5	Transición
	Disco	627 ± 17	1129 ± 46 (Zona 1)	80 (Zona 1)	
855 ± 55 (Zona 2)			37 (Zona 2)		

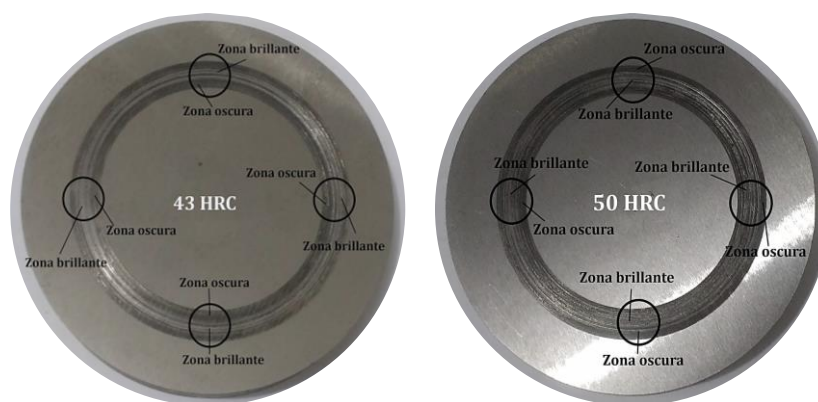
\*Medidas de microdurezas realizadas a las muestras del trabajo de grado “Estudio del fenómeno de la transición severo-moderado en el régimen de desgaste por deslizamiento de aceros” [5].

En los resultados obtenidos en la Tabla 10 se puede observar que en todas las superficies se presentó endurecimiento. El porcentaje de endurecimiento en los pines disminuyó conforme aumentó la dureza inicial de los discos. La condición D35-P39 fue la única que presentó una mayor dureza de pin en comparación con el

disco, siendo la única condición en donde el endurecimiento del pin fue mayor que en el disco excepto la condición D43-P28 la cual el endurecimiento del pin fue mayor que en la zona 2 del disco, lo que se puede atribuir a un desgaste severo que se presentó en esta superficie.

Se puede observar que los discos de mayor dureza 43 y 50 HRC obtuvieron mayor porcentaje de endurecimiento excepto en la zona 2 de la condición D43-P28. En las superficies desgastadas de los discos de dureza de 43 y 50 HRC donde se observaron zonas oscuras se obtuvieron los valores de microdureza altos, alcanzando un porcentaje de endurecimiento de 80 % en los discos de 50 HRC y 49 % en los discos de 43 HRC. En las zonas brillantes se obtuvo un porcentaje de endurecimiento más bajo en comparación con las zonas de óxido, 37 % para los discos de dureza 50 HRC y 18 % para los discos de dureza 43 HRC. Los discos de dureza de 35 HRC en donde solo se presentó la actuación del régimen de desgaste severo se obtuvo un porcentaje de endurecimiento de 28 %, el cual se puede atribuir a la constante pérdida de masa que sufrió la superficie la cual impedía el endurecimiento. Como lo sugieren los textos de referencia [1, 4].

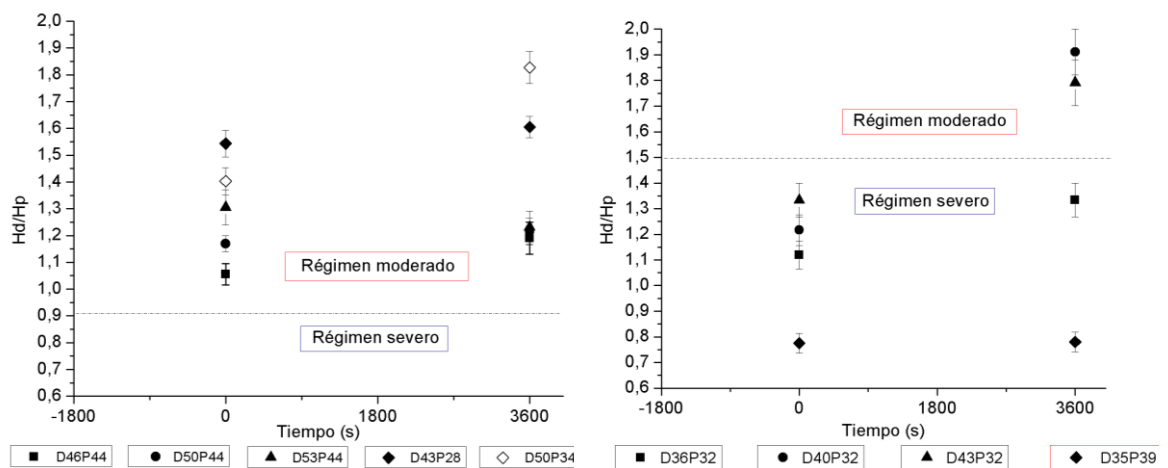
**Figura 14.** Imágenes de discos representativos de 43 y 50 HRC. Se indican las zonas donde se realizaron las medidas de microdurezas.



Según la investigación de Viáfara [4] se puede confirmar que el incremento de endurecimiento en el pin es mayor en las condiciones en donde se presentan menor dureza inicial en los cuerpos como es el caso de la condición (D35-P39) y genera

un régimen permanente de desgaste severo. En la Figura 15 se muestra una gráfica en donde se relaciona los datos de microdureza de los discos obtenidos en la investigación de Viáfara [4] con los resultados obtenidos en este proyecto, se indican la relación  $H_d/H_p$  de los valores de microdureza de las superficies desgastadas iniciales y finales en función del tiempo de deslizamiento para cuerpos duros (a) y cuerpos blandos (b). En la figura se observa que, a mayor dureza de disco en relación con la dureza del pin, se obtendrá un régimen de desgaste moderado, mientras que si la dureza del pin es mayor que la del disco se obtendrá un régimen de desgaste severo.

**Figura 15.** Relación  $H_d/H_p$  de los valores de microdureza de las superficies desgastadas en función del tiempo de deslizamiento para cuerpos duros (a) y cuerpos blandos (b).



Siguiendo con lo propuesto por Viáfara, en la tabla 10 se puede observar que en los pines a medida que aumenta la dureza de los discos disminuye el porcentaje de endurecimiento, lo que concuerda con los datos presentados [4]. Los óxidos formados en la superficie de los discos pueden interferir en el endurecimiento de los pines, ya que la capa de óxido reacciona como lubricante. Caso contrario en las zonas brillantes de los discos en donde se observó un incremento en el porcentaje de endurecimiento de los pines, ya que se produce el endurecimiento por deformación.

## 5. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones principales obtenidas en los ensayos de desgaste por deslizamiento sin lubricación de aceros AISI H13 y AISI 4140:

1. Las superficies desgastadas de las pruebas mostraron marcas de deformación plástica la cual se pudo confirmar por las técnicas de SEM y estereoscopia donde se encontraron marcas de arado y de fatiga. Relacionando lo anterior con la alta pérdida de masa de los pines, se puede determinar que el régimen de desgaste por deslizamiento que actuó en los ensayos fue el severo.
2. Las microdurezas de los cuerpos se vió afectada por el endurecimiento por deformación de los cuerpos. Se observó en el régimen de desgaste severo un mayor porcentaje de endurecimiento en los pines y un menor porcentaje en el disco. Esto es atribuido al contacto permanente del pin con el disco. En cuanto al área de contacto del disco con el pin no fue constante durante el ensayo, por lo tanto, la deformación que se obtuvo fue muy baja.
3. Las condiciones de dureza inicial de los cuerpos es un factor muy importante al momento de ejecutar ensayos de desgaste por deslizamiento ya que estas son determinantes en la actuación de un régimen de desgaste permanente. Se determinó que a bajas durezas de los cuerpos se generaba un régimen de desgaste severo, mientras que a altas durezas iniciales en los cuerpos el régimen de desgaste que actuaba era el moderado.
4. Se confirmó lo encontrado en la literatura, que la presencia de óxidos en la superficie desgastada interfiere en el contacto entre las asperezas de los dos cuerpos evitando la actuación de un desgaste adhesivo y con ello una alta tasa de desgaste.

## 6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda mantener tanto las partículas de desgaste como las superficies desgastadas en una atmósfera controlada, para evitar la formación de óxidos causados por la humedad del ambiente.
- Se recomienda la realización de ensayos electroquímicos como Voltametría de Micropartículas para la caracterización de las partículas de desgaste por deslizamiento, ya que podría contribuir al estudio y determinación del régimen de desgaste dominante midiendo la reactividad de las partículas producidas en el desgaste.
- Se recomienda garantizar un contacto homogéneo entre los cuerpos de los ensayos de desgaste por deslizamiento, con el fin de obtener condiciones constantes durante la prueba y así reproducir un régimen permanente de desgaste.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Zum Gahr, K.H., Microestructura y desgaste de materiales. Elsevier, (1987).
- [2]. Viáfara, C. C. & Sinatora, A., The effect of hardness of sliding bodies on the wear regime transition of steels. *Lubrication Science*, 25(2), 123-138, (2010).
- [3]. Viáfara, C. C. & Sinatora, A., Unlubricated sliding friction and wear of steels: An evaluation of the mechanism responsible for the T1 wears regime transition. *Wear*, 271(9-10), 1689-1700, (2011).
- [4]. Viáfara, C.C., Transição no regime de desgaste por deslizamento dos aços: uma abordagem termodinâmica. Tese Doctoral. Universidade de Sao Paulo, (2010).
- [5]. Cogollo, Y., Estudio del fenómeno de la transición severo-moderado en el régimen de desgaste por deslizamiento de aceros. Tesis Pregrado. Universidad Industrial de Santander, (2018).
- [6]. Zapata, D.A., Efecto de la microestructura sobre la resistencia al desgaste por rodadura-deslizamiento de aceros ferroviarios. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, (2011).
- [7]. De Mello, J. & Bálsamo, P.S., Comportamiento Tribológico de Aceros Inoxidables para Cubertería. *Información tecnológica*, 17(6), 57-62. (2006).
- [8]. Giraldo D. & Vélez J. M., Estudio del desgaste por deslizamiento en seco de algunos plásticos. *Revista Dyna*, Medellín, 136, 11-20, (2002).
- [9]. Archard J.F., Hirst W. The wear of metals under unlubricated conditions, *Proceedings of the Royal Society of London*, 236(1206), 397-410, (1956).
- [10]. Cogollo, Y., Saavedra, E. M., Flórez-Suárez, M. A., Viáfara, C. C., & Meléndez, A. M., Application of the voltammetry of microparticles for characterizing wear debris produced in the sliding wear regimes of steels. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1119, No. 1, p. 012018). IOP Publishing, (2018).
- [11]. Hutchings, I.M., *Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials*. Edward Arnold. (1992).

- [12]. Norma D.I.N. 50320, Wear terms systematic analysis of wear processes classification of wear phenomena, (1979).
- [13]. Levy,G. , Linford,R.G. & Mitchell,L.A., Wear behaviour and mechanical properties: the similarity of seemingly unrelated approaches. *Wear*, 21(1), 167-177, (1972).
- [14]. Viáfara C.C, Propuesta de Investigación Capital Semilla: Análisis de problemas de desgaste de herramientas en la Industria Manufacturera, Universidad Industrial de Santander, 2016.
- [15]. Tornillo de cabeza hexagonal con grados, rosca fina (Equivalente ISO 8765). (2018).
- [16]. ASTM NORMA G99-17, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. ASTM Copyright. United States of America.

## BIBLIOGRAFÍA

Bhushan, B. *Introduction to Tribology*, John Wiley and Sons, New York, 2002.

Galeano, K. F. R., *Aceros bainíticos y la influencia del boro sobre sus propiedades mecánicas—revisión bibliográfica*. ITECKNE: Innovación e Investigación en Ingeniería, 10(1), 128-136, (2013).

Kumar, S., Bhattacharyya, A., Mondal, D. K., Biswas, K., & Maity, J., *Dry sliding wear behaviour of medium carbon steel against an alumina disk*. *Wear*, 270(5-6), 413-421, (2011).

Lyu, Y., Zhu, Y., & Olofsson, U., *Wear between wheel and rail: A pin-on-disc study of environmental conditions and iron oxides*. *Wear*, 328, 277-285, (2015).

Shariff, S. M., Pal, T. K., Padmanabham, G., & Joshi, S. V., *Comparative Study on Dry Sliding Wear Behavior of Various Railroad Steels*. *Journal of tribology*, 133(2), 021602, (2011).

Syed, A. K., *Tribological behaviour of surface treated and postoxidised tool steels at elevated temperatura*, (2008).

Viafara, C. C., Castro, M. I., Velez, J. M., & Toro, A., *Unlubricated sliding wear of pearlitic and bainitic steels*. *Wear*, 259(1-6), 405-411, (2005).

Viáfara, C. C., & Sinatora, A., *Influence of hardness of the harder body on wear regime transition in a sliding pair of steels*. *Wear*, 267(1-4), 425-432, (2009).

Viáfara, C. C., & Sinatora, A., *The effect of hardness of sliding bodies on the wear regime transition of steels*. *Lubrication Science*, 25(2), 123-138, (2013).

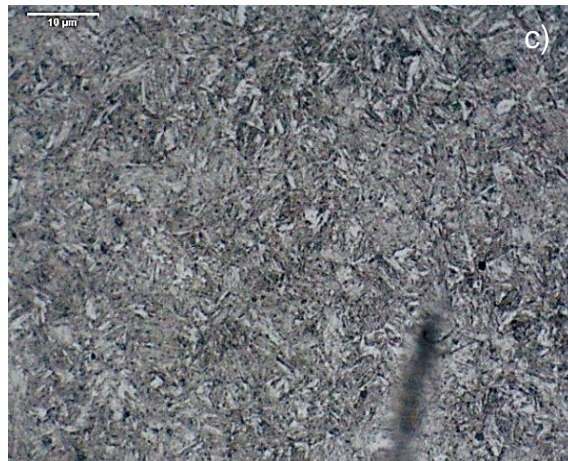
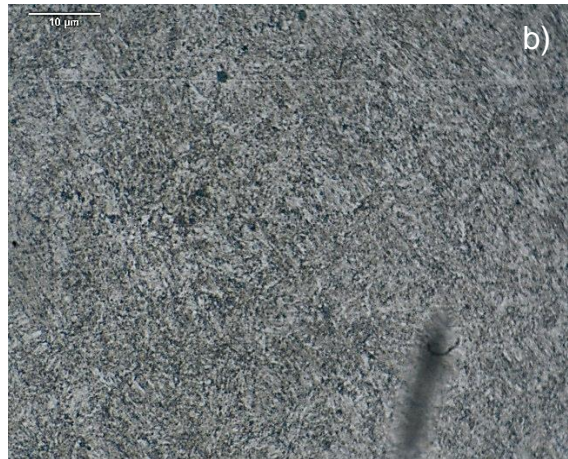
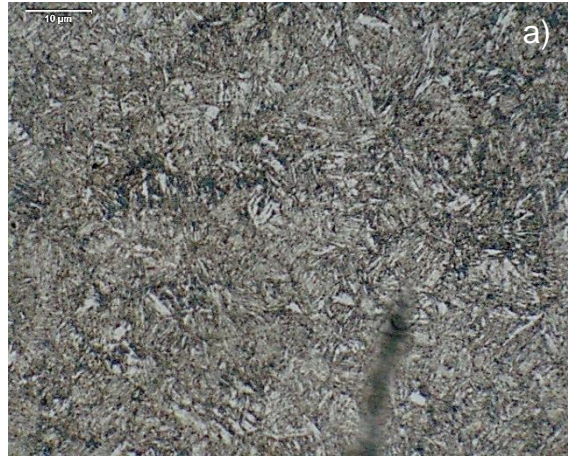
Wang, S. Q., Wang, L., Zhao, Y. T., Sun, Y., & Yang, Z. R., *Mild-to-severe wear transition and transition region of oxidative wear in steels*. *Wear*, 306(1-2), 311-320, (2013).

Windarta, M. B. S., & Khairul, F., *Influence of applied load on wear characterizations of rail material*. *Journal of Applied Science*, 11(9), 1636-1641, (2011).

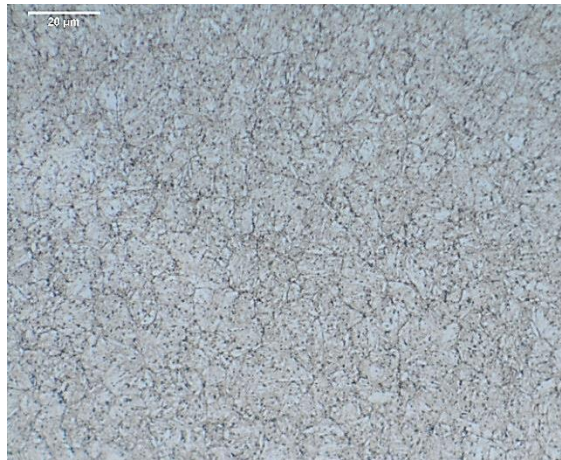
Zhang, Q. Y., Wang, S. Q., Li, X. X., Zhou, Y., Chen, K. M., & Cui, X. H., *Relations of counterface hardness with wear behavior and tribo-oxide layer of AISI H13 steel*. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(12), 5960-5973, (2016).

## ANEXOS

**Anexo A.** Micrografías a 1000X obtenidas de los pines con diferentes niveles de durezas en estado de entrega: a) 28 HRC, b) 34 HRC y c) 39 HRC.



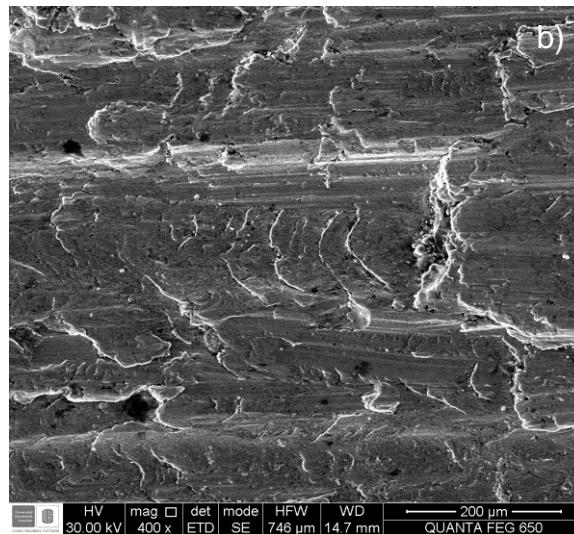
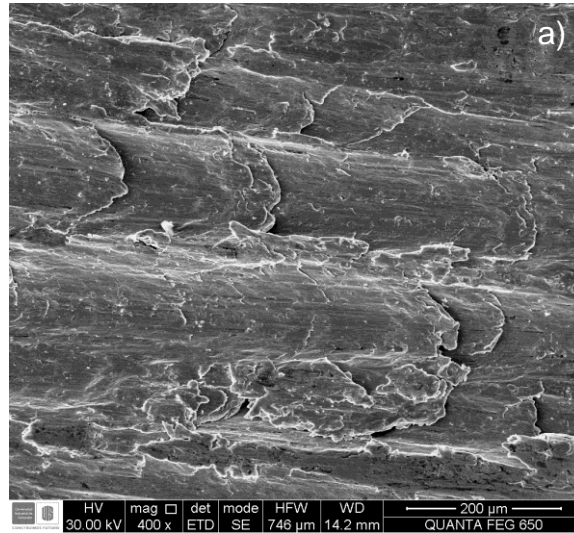
**Anexo B.** Micrografía a 1000X de los discos de acero AISI H13 después del tratamiento térmico.



**Anexo C.** Superficie desgastada de disco 35 HRC para la toma de microdureza.



**Anexo D.** Micrografías obtenidas por SEM a 400X de la superficie desgastada del pin (a) y disco (b) para régimen de desgaste severo.



**Anexo E.** Micrograffías obtenidas por SEM a 400X de la superficie desgastada del pin (a) y disco (b) para régimen de desgaste moderado.

