

ESTUDIO DEL FENÓMENO DE LA TRANSICIÓN SEVERO-MODERADO EN EL
RÉGIMEN DE DESGASTE POR DESLIZAMIENTO DE ACEROS

YERALDI COGOLLO TORRES

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

2018

ESTUDIO DEL FENÓMENO DE LA TRANSICIÓN SEVERO-MODERADO EN EL
RÉGIMEN DE DESGASTE POR DESLIZAMIENTO DE ACEROS

YERALDI COGOLLO TORRES

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

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

2018

DEDICATORIA

A Dios que ha sido mi guía.

A mis padres y hermana, quienes han sido mi apoyo constante, mi motivación y motor para nunca rendirme.

A mi madrina, que ha sido mi ángel de la guarda, quien siempre me ha apoyado.

A mi mejor amigo, compañero y novio por su apoyo, motivación, por creer en mí y por amarme.

A toda mi familia que ha estado conmigo a lo largo de esta etapa brindándome su apoyo y compañía.

A la familia Saavedra Piñeres por su cariño, su apoyo y por tenerme en cuenta en sus oraciones.

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Cristian Camilo Viáfara Arango, por su orientación, apoyo, entendimiento, paciencia y disposición siempre para resolver dudas e inconvenientes.

Al Dr. Alejandro Toro por su cordialidad y recibimiento en el Laboratorio de Tribología y Superficies de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (UnalMed) y al técnico encargado Efraín Zulúaga por su ayuda y colaboración.

A todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica por la formación y las enseñanzas impartidas. En especial a la Profesora Elcy María Córdoba por su cordialidad y disposición constante para escuchar, orientar y ayudar al estudiante.

Al Proyecto Capital Semilla: Análisis de problemas de desgaste de herramientas en la industria manufacturera por su apoyo para el desarrollo de este proyecto.

Al laboratorio de estereoscopía de la Universidad Nacional de Colombia por su servicio.

Al laboratorio de microscopía sede Guatimar por la prestación de sus servicios en pro de este proyecto y al Profesor Carlos Alberto Chacón por su amabilidad y su buena disposición.

Al laboratorio de espectroscopía de emisión atómica por chispa por la prestación de sus servicios y al Profesor Pedro Delvasto por su colaboración.

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

A Carlos Zafra, Yeilly Buitrago, Yenifer Plata, Carolina Florez, Jennifer Motta y Carolina Martínez por su amistad.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 14 |
| 1. ANTECEDENTES | 15 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN AL DESGASTE DE LOS MATERIALES..... | 15 |
| 1.2 DESGASTE POR DESLIZAMIENTO Y MECANISMOS | 15 |
| 1.3 RÉGIMEN DE DESGASTE SEVERO Y MODERADO EN LOS MATERIALES..... | 17 |
| 1.4 PERIODO DE RUNNING-IN | 18 |
| 2. OBJETIVOS | 19 |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL..... | 19 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 19 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 20 |
| 3.1 CONSULTA BIBLIOGRÁFICA..... | 20 |
| 3.2 OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES A ENSAYAR ... | 20 |
| 3.3 EJECUCIÓN DE ENSAYOS PIN-ON-DISK | 23 |
| 3.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS..... | 26 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 27 |
| 4.1 Serie <i>a</i> | 27 |
| 4.1.1 Fuerza de fricción | 27 |
| 4.1.2 Pérdida de masa en los pines | 30 |
| 4.1.3 Observación de las superficies de desgaste..... | 31 |
| 4.2 Serie <i>b</i> | 35 |
| 4.2.1 Fuerza de fricción | 35 |
| 4.2.2 Pérdida de masa en los pines..... | 38 |
| 4.2.3 Observación de las superficies de desgaste..... | 38 |
| 5 CONCLUSIONES..... | 43 |
| 6 RECOMENDACIONES..... | 44 |
| REFERENCIA..... | 45 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 46 |
| ANEXOS..... | 47 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Tratamiento térmico, microestructuras y durezas de los discos de acero AISI H13. | 21 |
| Tabla 2. Propiedades mecánicas de los pines..... | 21 |
| Tabla 3. Composiciones químicas de los aceros AISI 4140 y AISI H13. | 21 |
| Tabla 4. Condiciones de las series de los ensayos experimentales | 25 |
| Tabla 5. Resultados de fuerza de fricción para la serie <i>a</i> | 30 |
| Tabla 6. Resultados de desgaste para la serie <i>a</i> | 30 |
| Tabla 7. Resultados de fuerza de fricción para la serie <i>b</i> | 37 |
| Tabla 8. Resultados de desgaste para la serie <i>b</i> | 38 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Descripción esquemática de los cuatro principales mecanismos de desgaste: adhesión, abrasión, reacción triboquímica y fatiga superficial [2]..... | 16 |
| Figura 2. Micrografías de los pines ensayados a) 28HRC b) 34HRC c) 39HRC. ... | 22 |
| Figura 3. Microestructura de los discos después del tratamiento térmico de temple-revenido a) 43 HRC b) 50 HRC | 23 |
| Figura 4. Imagen del tribómetro | 24 |
| Figura 5. Curva de fuerza de fricción de la condición D43-P28 de la serie a..... | 28 |
| Figura 6. Curva de fuerza de fricción de la condición D43-P39 de la serie a..... | 29 |
| Figura 7. Superficies de los cuerpos desgastados según la condición D43-P28 a) superficie del pin b) superficie del disco. | 31 |
| Figura 8. Imágenes obtenidas por SEM de la superficie desgastada del disco con la condición D43-P28 de la serie a. | 32 |
| Figura 9. Imágenes obtenidas por SEM de la superficie desgastada del pin con la condición D43-P28 de la serie a. | 33 |
| Figura 10. Superficies de los cuerpos desgastados según la condición D43-P39 a) superficie del pin b) superficie del disco. | 34 |
| Figura 11. Curva de fuerza de fricción de la condición D50-P28 de la serie <i>b</i> | 35 |
| Figura 12. Curva de fuerza de fricción de la condición D50-P34 de la serie <i>b</i> | 36 |
| Figura 13. Curva de fuerza de fricción de la condición D50-P39 de la serie <i>b</i> | 37 |
| Figura 14. Superficies de los cuerpos desgastados según la condición D50-P28 a) superficie del pin b) superficie del disco. | 39 |

| | |
|---|----|
| Figura 15. Superficies de los cuerpos desgastados según la condición D50-P34 a) superficie del pin b) superficie del disco. | 39 |
| Figura 16. Superficies de los cuerpos desgastados según la condición D50-P39 a) superficie del pin b) superficie del disco. | 40 |
| Figura 17. Imágenes obtenidas por SEM de la superficie desgastada del disco con la condición D50-P39 de la serie b..... | 41 |
| Figura 18. Imágenes obtenidas por SEM de la superficie desgastada del pin con la condición D50-P39 de la serie b. | 42 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|---|----|
| Anexo 1. Imágenes tomadas por estereoscopia de las superficies desgastadas de los discos para las dos condiciones. | 47 |
| Anexo 2. Imágenes tomadas por estereoscopia de las superficies desgastadas de los discos para las dos condiciones. | 48 |

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DEL FENÓMENO DE LA TRANSICIÓN SEVERO-MODERADO EN EL RÉGIMEN DE DESGASTE POR DESLIZAMIENTO DE ACEROS*

AUTOR: YERALDI COGOLLO TORRES**

PALABRAS CLAVE: DESGASTE POR DESLIZAMIENTO, RÉGIMEN SEVERO, RÉGIMEN MODERADO, PIN-ON-DISK, MECANISMOS DE DESGASTE.

Este trabajo tiene como objetivo estudiar el fenómeno de la transición severo-moderado en el régimen de desgaste por deslizamiento que sufren las superficies de cuerpos sólidos que están en contacto y movimiento relativo. Se realizaron ensayos de desgaste por deslizamiento en seco de pines de acero AISI 4140 sobre discos de acero AISI H13. Se utilizaron dos niveles de dureza en el disco y se ensayaron dos niveles de dureza de pines con una condición de baja dureza del disco y tres niveles de dureza de los pines para la condición de alta dureza del disco. Se utilizó una velocidad de deslizamiento de 0,1 m/s, una carga normal de 50 N, radio de pista de 25 mm y un tiempo de deslizamiento de 3600 s. Se efectuó la caracterización de los materiales mediante estereoscopía y microscopía electrónica de barrido. Los resultados mostraron que la transición en el régimen severo-moderado de desgaste está influenciada por la dureza de los materiales bajo la condición de baja dureza del disco con el aumento de la dureza de los pines (serie a). Con una alta dureza del disco (serie b) se observó una transición en el régimen de desgaste que con el aumento de la dureza de los cuerpos resultó en la transición de severo a un régimen moderado de desgaste. En la caracterización de las superficies de desgaste se encontró una condición en la que se presentaba una transición simultánea de los regímenes severo-moderado, en donde se observó marcas interrumpidas de deformación plástica producto del contacto metal-metal, mientras que para otra condición se observaron marcas consecutivas de deformación plástica y regiones más extensas de óxido.

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

**** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.**

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

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE MODERATE SEVERE TRANSITION PHENOMENON IN THE WEAR SLIDE WEAR REGIME *

AUTHOR: COGOLLO TORRES, YERALDI**

KEYWORDS: SLIDING WEAR, SEVERE REGIME, MODERATE REGIME, PIN-ON-DISK, WEAR MECHANISMS.

The objective of this work is to study the phenomenon of the severe-moderate transition in the sliding wear regime suffered by the surfaces of solid bodies that are in contact and relative movement. Dry sliding wear tests were performed on AISI 4140 steel pins on AISI H13 steel discs. Two hardness levels were used on the disc and two hardness levels of pins were tested with a condition of low hardness of the disc and three levels of hardness of the pins for the condition of high hardness of the disc. A sliding speed of 0.1 m / s, a normal load of 50 N, a track radius of 25 mm and a sliding time of 3600 s were used. The characterization of the materials was carried out by means of stereoscopy and scanning electron microscopy. The results showed that the transition in the severe-moderate wear regime is influenced by the hardness of the materials under the condition of low hardness of the disc with the increase of the hardness of the pins (series a). With a high hardness of the disc (series b) a transition was observed in the wear regime that with the increase of the hardness of the bodies resulted in the transition from severe to a moderate wear regime. In the characterization of the wear surfaces, a condition was found in which a simultaneous transition of the severe-moderate regimes was observed, where there were observed interrupted plastic deformation marks produced by the metal-metal contact, while for another condition they were observed consecutive marks of plastic deformation and more extensive regions of oxide.

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

**** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.**

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

INTRODUCCIÓN

El desgaste por deslizamiento de los materiales es un fenómeno que requiere de atención debido a las grandes pérdidas económicas que ocasiona en la industria. De acuerdo con lo anterior es importante avanzar en la comprensión de los procesos de desgaste y fricción que ocurren en los materiales.

El desgaste y la fricción son fenómenos que producen una pérdida de material y/o daño superficial, por lo tanto, es necesario considerarlos en el diseño y selección de los materiales [3]. Estos efectos son inevitables, pero por medio de estudios tribológicos y simulaciones realizadas en laboratorios pueden ser controlados [1].

En el estudio de desgaste por deslizamiento de aceros se pueden encontrar dos regímenes. El régimen de desgaste severo, el cual se caracteriza por altas tasas de desgaste y que es producto de un mecanismo dominante de adhesión [1]. Un régimen de desgaste moderado que se presenta con la actuación predominante de un mecanismo de desgaste oxidativo. En este mecanismo los óxidos actúan como lubricante en el deslizamiento de los cuerpos estudiados produciendo bajas tasas de desgaste [1]

La transición de desgaste por deslizamiento puede ocurrir con una pequeña variación de las condiciones de operación [1]. Esto resalta la importancia del estudio del fenómeno con el fin de evitar la acción de estos regímenes de desgaste en la industria. Un factor influyente en la formación de regímenes de desgaste es la dureza de los cuerpos en contacto [1,6], también se debe tener en cuenta factores ambientales que afectan el sistema como la humedad, la temperatura, entre otros [2]. El propósito de este proyecto es estudiar el fenómeno de la transición severo-moderado en el régimen de desgaste por deslizamiento que sufren las superficies de cuerpos sólidos que están en contacto y movimiento relativo.

1. ANTECEDENTES

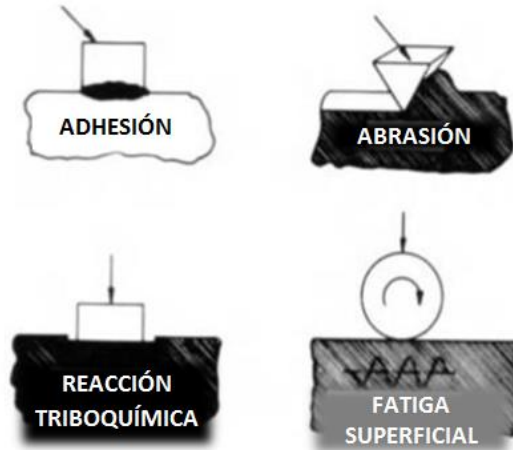
1.1 INTRODUCCIÓN AL DESGASTE DE LOS MATERIALES

Con los avances de la ciencia y la tecnología actualmente las industrias enfocan su interés en lograr una mejor optimización de sus procesos con el fin de obtener resultados adecuados en eficiencia y efectividad a un menor costo. Por esta razón es importante estudiar cómo los materiales pueden presentar un mejor desempeño para cumplir las necesidades de la industria frente a una función o aplicación específica. Cuando en las superficies de las piezas se observan daños relacionados con la remoción de masa ya sea de una o de las dos superficies que se encuentran en contacto y movimiento relativo se puede hablar de un proceso de desgaste por deslizamiento que puede llegar a causar considerables pérdidas económicas [2]. Por lo tanto, es importante comprender el fenómeno del desgaste y la fricción en los materiales con el fin de estudiar su comportamiento de acuerdo a las condiciones de desempeño y de esta manera prolongar la vida útil y un mejor funcionamiento de los componentes de la máquina [3].

1.2 DESGASTE POR DESLIZAMIENTO Y MECANISMOS

En el ámbito del desgaste, un mecanismo describe un fenómeno por medio del cual ocurre un desprendimiento de material durante el contacto de dos cuerpos que se encuentran en contacto y movimiento relativo [2]. La clasificación de los mecanismos de desgaste depende del punto de vista de los autores. Por ejemplo, Jahanmir lista diez mecanismos mientras que Zum-Gahr propone analizar cuatro principales mecanismos de desgaste, siendo esta última la clasificación abordada en el presente texto. Los cuatro mecanismos de desgaste expuestos por el autor son: adhesión, abrasión, fatiga superficial y reacción triboquímica. En la figura 1 se presenta una descripción esquemática de los mecanismos de desgaste.

Figura 1. Descripción esquemática de los cuatro principales mecanismos de desgaste: adhesión, abrasión, reacción triboquímica y fatiga superficial [2].



El desgaste por adhesión surge cuando dos superficies que se encuentran en contacto sufren un desprendimiento de material que es transferido al cuerpo opuesto. Este desprendimiento surge de la formación de juntas de adhesión que se originan por el establecimiento de enlaces y la rotura de estas [2].

En el desgaste abrasivo una superficie es más dura que la otra. El daño se presenta cuando un material es removido de una superficie por la presencia de partículas duras que se encuentran en medio de ambos cuerpos o incrustadas en una o ambas caras que están en contacto [2].

El desgaste por fatiga surge de una aplicación repetitiva de esfuerzos entre dos cuerpos que se encuentran en contacto. La característica de este mecanismo es la formación de grietas en la subsuperficie que dan como resultado el desprendimiento de material en una o ambas superficies. Por último, el desgaste triboquímico es la combinación de una reacción química con un efecto mecánico y consiste en la interacción de las superficies con el medio [2]. En otras palabras, este mecanismo es el resultado de interacciones fisicoquímicas entre los elementos que conforman el sistema tribológico.

1.3 RÉGIMEN DE DESGASTE SEVERO Y MODERADO EN LOS MATERIALES

En el desgaste por deslizamiento de los aceros actúan principalmente dos mecanismos de desgaste: adhesivo y oxidativo. Cada uno de estos mecanismos opera de forma dominante durante el régimen permanente establecido para cada condición del sistema tribológico, donde la fuerza y el coeficiente de fricción es aproximadamente constante [1]. Estos mecanismos al actuar de forma dominante tienden a producir tasas de desgaste altas (régimen severo) y bajas (régimen moderado), relacionados directamente con un contacto metálico y regiones de oxidación, respectivamente. Dentro de un régimen con contacto metálico se observa un mecanismo de adhesión y marcas de deformación plástica que surge de la formación de juntas que se originan por el establecimiento de enlaces metálicos y la rotura de estas como producto de una fuerte interacción entre las asperezas [1]. Por otro lado, un régimen con mayor presencia de regiones de oxidación indica la actuación de un mecanismo oxidativo que origina una disminución en la interacción mecánica entre las asperezas [1].

La operación de los regímenes de desgaste depende fuertemente de las condiciones del sistema tribológico tales como la carga normal, la dureza de los materiales, entre otros. Lo anterior indica que una pequeña variación en la magnitud de estos factores puede resultar en una transición en el régimen de desgaste de moderado a severo o viceversa [1,6]. Los resultados estudiados en esta investigación y que han sido de referencia para este estudio, relacionan principalmente el efecto de la variación de la dureza sobre el desgaste de los cuerpos que se encuentran en contacto. Los resultados de esta investigación demostraron que ambos cuerpos (pin y disco) sufrían una mayor pérdida masa con la disminución de la dureza en el disco [1].

1.4 PERIODO DE RUNNING-IN

El periodo de running-in es el tiempo de inicio de la interacción entre dos superficies que se encuentran en contacto y movimiento relativo. Este periodo comienza con una variación del área de contacto como consecuencia del acomodamiento de las superficies de los cuerpos hasta lograr un área de contacto uniforme donde se da inicio a un régimen permanente de desgaste donde la fuerza de fricción es aproximadamente constante [1]. Esta variación del área de contacto provoca un comportamiento inestable del valor de la fuerza de fricción y por ende una pérdida de material significativa de los dos cuerpos. Un periodo de running-in mayor indica que hubo más tiempo de acomodamiento de las superficies de los cuerpos lo que sugiere un posible desgaste significativo de los cuerpos durante este periodo [1].

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el fenómeno de la transición en el régimen de desgaste severo y moderado por deslizamiento de aceros.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Reproducir los regímenes severo y moderado de desgaste por deslizamiento de los aceros con la variación de la dureza de los cuerpos.
2. Caracterizar las superficies desgastadas por medio de las técnicas de estereoscopía y microscopía electrónica de barrido.
3. Analizar el efecto de las durezas de los cuerpos deslizantes sobre la transición en el régimen de desgaste severo y moderado por deslizamiento.

3. METODOLOGÍA

3.1 CONSULTA BIBLIOGRÁFICA

Se realizó una consulta constante en base de datos disponible en la Universidad con el propósito de identificar estudios recientes relacionados al tema de investigación. Diversas fuentes de literatura especializada fueron consultadas, como libros con fundamentación teórica relacionada al estudio de la fricción y el desgaste, trabajos de grado y normas como la ASTM G-99 que es de gran importancia en la ejecución de ensayos por deslizamiento pin-on-disk [4]. Estas consultas bibliográficas se realizaron con el propósito de obtener un conocimiento adecuado sobre el tema para el buen desarrollo de la investigación.

3.2 OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES A ENSAYAR

Se seleccionaron los materiales de acero AISI H13 para el disco y acero AISI 4140 para los pines con el fin de estudiar el mismo sistema tribológico analizado en el trabajo por C.Viáfara [1]. Los aceros AISI H13 fueron comprados en la empresa BÖHLER y adquiridos en forma de disco de 76 mm de diámetro por 12 mm de espesor. Se realizó un tratamiento térmico de temple más revenido a los discos a una temperatura de austenización de 1050°C con un tiempo de mantenimiento de una hora. Las temperaturas y tiempos de revenido se determinaron de acuerdo a las condiciones de niveles de durezas (H_d) deseadas, con el fin de garantizar la operación de los regímenes de desgaste severo y moderado. Estos tratamientos térmicos junto con el proceso de mecanizado se realizaron en la empresa TRATAR SAS en la ciudad de Medellín. En la tabla 1 se presentan las microestructuras y durezas obtenidas en el tratamiento térmico.

Tabla 1. Tratamiento térmico, microestructuras y durezas de los discos de acero AISI H13.

| Tratamiento térmico | Temperatura de revenido [°C] | | Microestructura | Dureza [HRC] |
|---------------------|------------------------------|-----|---------------------|--------------|
| | Primer revenido | 670 | | |
| Temple y revenido | Segundo revenido | 640 | Martensita revenida | 43 |
| | Primer Revenido | 630 | | |
| | Segundo Revenido | 600 | | 50 |
| | | | | |

Los pines de acero AISI 4140 fueron obtenidos a partir del corte de Tornillos Allen con diferentes niveles de resistencia y dureza (H_p). En Colombia son conocidos como tornillos Bristol.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los pines.

| H_p [HRC] | Medida de resistencia | σ_y [Mpa] |
|-------------|-----------------------|------------------|
| 28 ± 1 | 8.8 | 640 |
| 34 ± 1 | 10.9 | 900 |
| 39 ± 1 | 12.9 | 1090 |

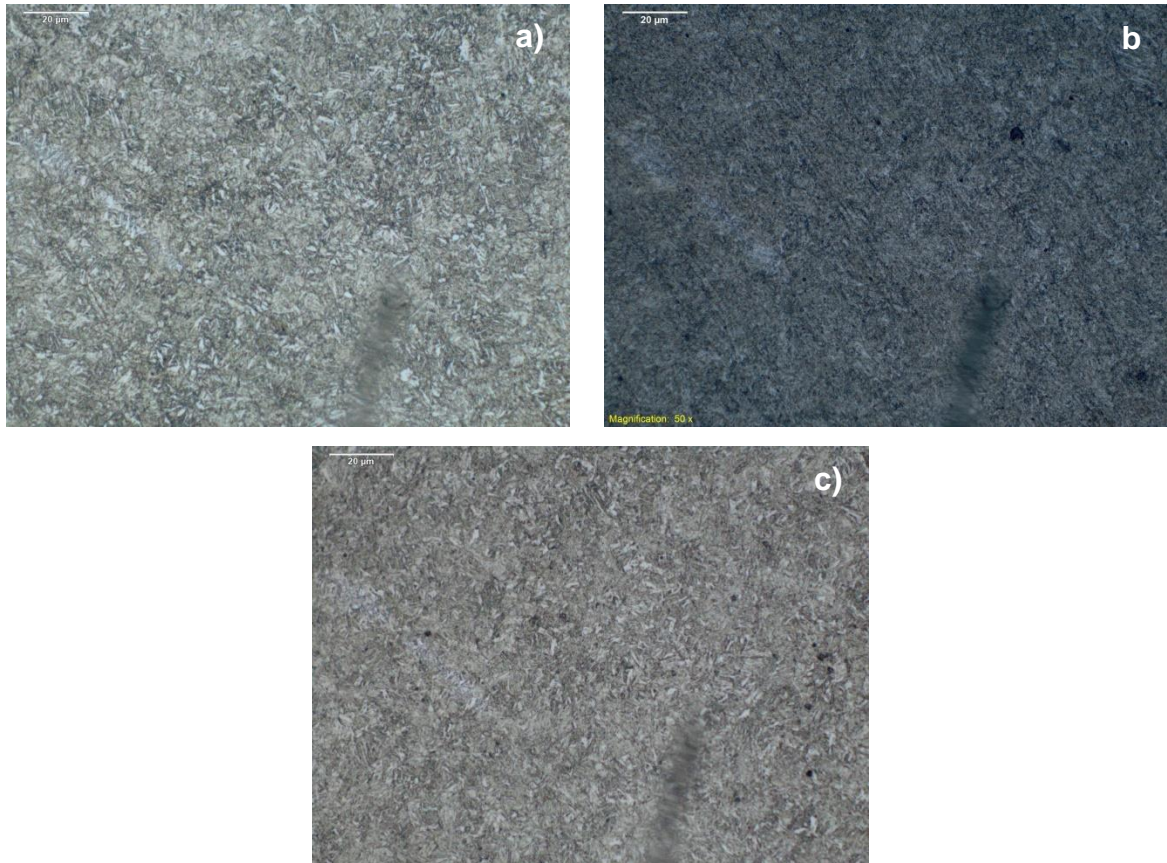
Las composiciones químicas de los aceros fueron determinadas mediante pruebas de espectrometría de emisión por chispa. En la tabla 3 se muestra las composiciones químicas de los aceros.

Tabla 3. Composiciones químicas de los aceros AISI 4140 y AISI H13.

| Acero | C [%] | Mn [%] | P [%] | S [%] | Si [%] | Cr [%] | Mo [%] | V [%] |
|-------------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
| 4140 | 0,35 | 0,91 | 0,01 | 0,007 | 0,15 | 0,25 | 0,069 | 0,002 |
| H13 | 0,51 | 0,55 | 0,017 | 0,005 | 0,976 | 4,98 | 1,21 | 0,90 |

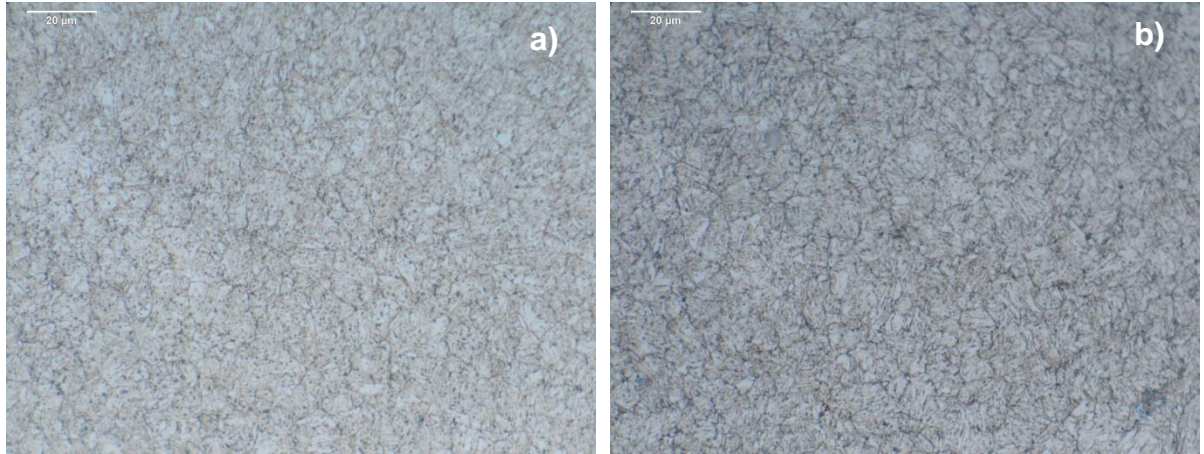
La caracterización de los materiales se realizó en el Laboratorio de Metalografía de la Universidad, donde se aplicaron las técnicas de preparación metalográfica con el fin de obtener una muestra representativa para su posterior caracterización.

Figura 2. Microestructura de los pines en estado de entrega a) 28 HRC b) 34 HRC c) 39 HRC.



En la figura 2 se observan las micrografías obtenidas por microscopía óptica de los pines en estado de entrega con tres niveles de dureza correspondientes a un acero AISI 4140. Se observa la presencia de una microestructura fina (martensita revenida) ya que tiene la apariencia de finas agujas. Se observa una precipitación de carburos posiblemente de cromo, teniendo en cuenta la composición química presentada en la tabla 3.

Figura 3. Microestructura de los discos después del tratamiento térmico de temple-revenido a) 43 HRC b) 50 HRC.

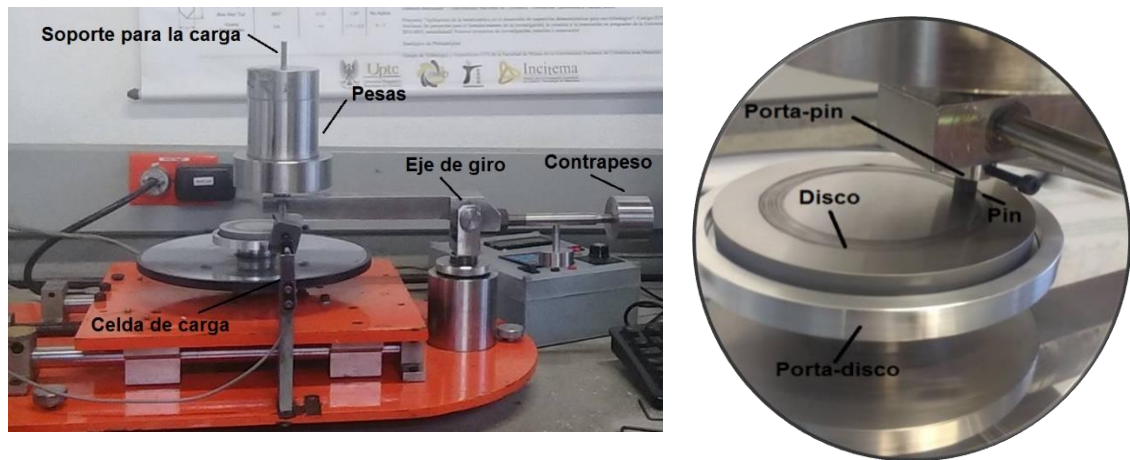


En la figura 3 se observan las micrografías obtenidas por microscopía óptica de los discos después de un tratamiento térmico de temple y revenido. Se observa una microestructura homogénea y fina compuesta de martensita revenida junto con precipitados de carburos de elementos aleantes.

3.3 EJECUCIÓN DE ENSAYOS PIN-ON-DISK

Para el desarrollo de las pruebas de desgaste por deslizamiento se utilizó un tribómetro tipo pin-disco perteneciente al Laboratorio de Tribología y Superficies de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (UnalMed), bajo la dirección del Dr. Alejandro Toro. Esta máquina pin-on-disk tiene un rango de carga entre 1 y 50 N con una celda de carga que envía la señal a un equipo cómputo y registra la fuerza tangencial ejercida en la interface de deslizamiento. En la figura 4 se muestra la máquina y sus principales componentes [5].

Figura 4. Imagen del tribómetro



Las pruebas de desgaste fueron ejecutadas bajo unas condiciones en las que se presenta la operación de los regímenes de desgaste severo y moderado, tomando como referencia la investigación antes mencionada [1]. Para la ejecución de los ensayos de desgaste el valor de la carga aplicada no fue el mismo de la investigación, debido a que el diámetro del pin era más grande y se requería aplicar un esfuerzo nominal cercano a 1,86 MPa aproximadamente. El pin se posicionó a un radio de pista de 25 mm con respecto al centro del disco y las condiciones establecidas para la prueba fueron: velocidad de deslizamiento de 0,1 m/s y carga normal de 49 N. Estos ensayos se realizaron a temperatura ambiente y sin lubricación durante un tiempo estimado de 3600 s sin interrupción. La configuración de los parámetros de velocidad, tiempo y revoluciones por minuto se programaron mediante el uso de un software [6].

En la tabla 4 se presentan las condiciones planteadas en el desarrollo de las pruebas de desgaste. La nomenclatura usada H_d y H_p corresponden a los valores de dureza del disco y pin, respectivamente. Se ejecutaron en total 15 ensayos con al menos 3 ensayos repetidos por cada condición estudiada. Los pines se ensayaron en su estado de entrega con tres niveles de dureza, mientras que los discos fueron ensayados con dos niveles de dureza.

Tabla 4. Condiciones de las series de los ensayos experimentales

| Serie | Hd [HRC] | Nomenclatura de la condición | Hp [HRC] |
|--------------|-----------------|-------------------------------------|-----------------|
| <i>a</i> | 43 ± 1 | D43 – P28 | 28 ± 1 |
| | | D43 – P39 | 39 ± 1 |
| <i>b</i> | 50 ± 1 | D50 - P28 | 28 ± 1 |
| | | D50 – P34 | 34 ± 1 |
| | | D50 – P39 | 39 ± 1 |

Antes de iniciar la prueba se verificó la nivelación del tribómetro. Esto mediante el empleo de un nivel de burbuja. Para la nivelación del equipo se hace uso de los tornillos de nivelación ubicados en los cuatro extremos de la máquina y del brazo de posicionamiento del sistema de carga. El montaje del disco se dispuso de tal manera que se encontrara paralelo a la base de la máquina y a su vez perpendicular al pin. Para establecer un estado homogéneo y reproducible de las probetas con el fin de obtener una coincidencia adecuada de la superficie del pin que entrará en contacto con la superficie del disco fue necesario someter los pines a un proceso de pulido empleando papel lija 360 montado sobre el mismo disco a ensayar (simulando una prueba de desgaste abrasiva). Esto con el fin de eliminar las irregularidades generadas en las superficies de los pines producto del corte.

El proceso de limpieza de las probetas se ejecutó antes de iniciar el ensayo y una vez finalizado. La limpieza del pin se realizó por medio de un baño ultrasónico durante un tiempo de 5 minutos, sumergiendo el pin en alcohol a 96% de pureza. Una vez extraído el pin del ultrasonido fue secado completamente por medio de una corriente de aire caliente. Para la limpieza del disco se empleó un algodón humedecido con alcohol y se frotó sobre el disco en movimiento con el fin de eliminar impurezas que se encontraran en la superficie. Posteriormente el disco fue secado durante varios segundos con corriente de aire caliente. Para evitar la contaminación del pin, desde el proceso de lavado hasta que se realizó la

operación de pesado final se empleó el uso de pinzas y recipientes de vidrio limpios. Para la manipulación del disco se empleó el uso de guantes. Antes del pesado de los pines se realizó un proceso previo de calibración de la balanza. Una vez realizado se procedió a introducir en la cabina de pesado el pin, esperando un tiempo aproximado de 30 segundos con el fin de que el resultado obtenido en la balanza se estabilizara y poder realizar una lectura correcta del peso. Para el pesado de los discos no fue posible utilizar una balanza de precisión debido a que el peso del disco sobrepasaba el valor permitido por el equipo.

3.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS

Se emplearon dos técnicas de caracterización, 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, con el fin de identificar la morfología de las superficies desgastadas. Estas técnicas permitieron observar los cambios ocurridos en las superficies de los materiales por causa de las condiciones de desgaste establecidas en las pruebas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La presentación de los resultados está dividida por dos partes y su discusión se enfoca principalmente en el análisis de los resultados de fuerza de fricción, pérdida de masa en los pines y observación de las superficies de desgaste. En la primera parte se exponen los resultados obtenidos de la serie *a*. Las condiciones de ensayo para esta serie corresponden a una dureza en el disco (H_d) de 43 HRC con dos niveles de dureza en el pin (H_p). En la segunda parte se presentan los resultados de la serie *b* utilizando una dureza en el disco (H_d) de 50 HRC con tres niveles de dureza en el pin (H_p).

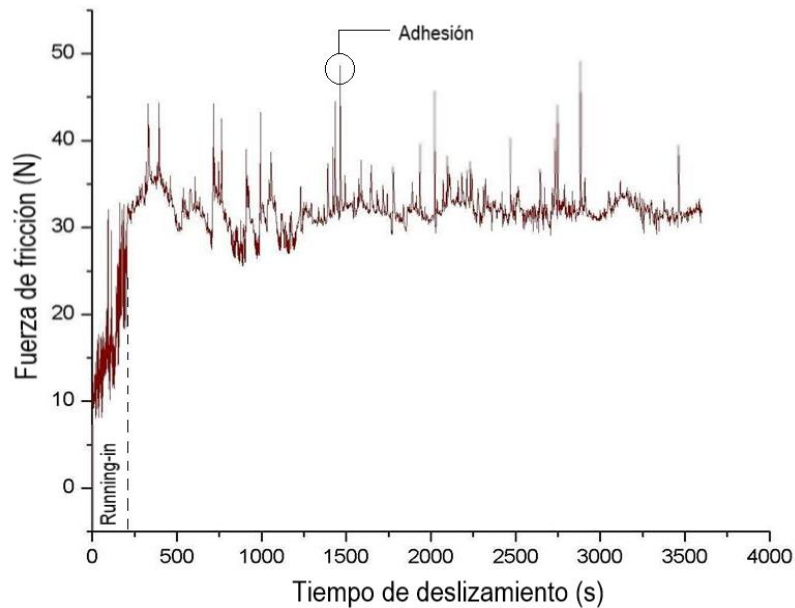
4.1 Serie *a*

4.1.1 Fuerza de fricción

En la figura 5 se presenta la curva de fuerza de fricción en función del tiempo de deslizamiento para la condición de dureza de 43 HRC en el disco y 28 HRC en el pin. En esta gráfica se observan dos regiones correspondientes a los periodos de running-in y régimen permanente. El periodo de running-in fue de aproximadamente 250 s, lo que indica que se logró un área de contacto uniforme de las superficies en un tiempo relativamente corto de acuerdo con la literatura [1]. Después de este periodo inicia el primer régimen permanente de desgaste a una fuerza de fricción relativamente constante de 30 N aproximadamente. En el régimen permanente se observa que eventualmente se presentan periodos de mayor y menor variación en la fuerza de fricción. Se prevee que la mayor variación está asociada a un desgaste por adhesión como se señaló en la curva (picos altos), lo que indica una fuerte interacción entre las asperezas. Los picos bajos representan una baja interacción y una menor variación de la fuerza de fricción que puede relacionarse a un mecanismo oxidativo.

Este análisis de la curva sugiere que durante el régimen permanente se presentó la actuación simultánea de estos mecanismos, comportamiento que no se había observado en las investigaciones de referencia [1,7.8].

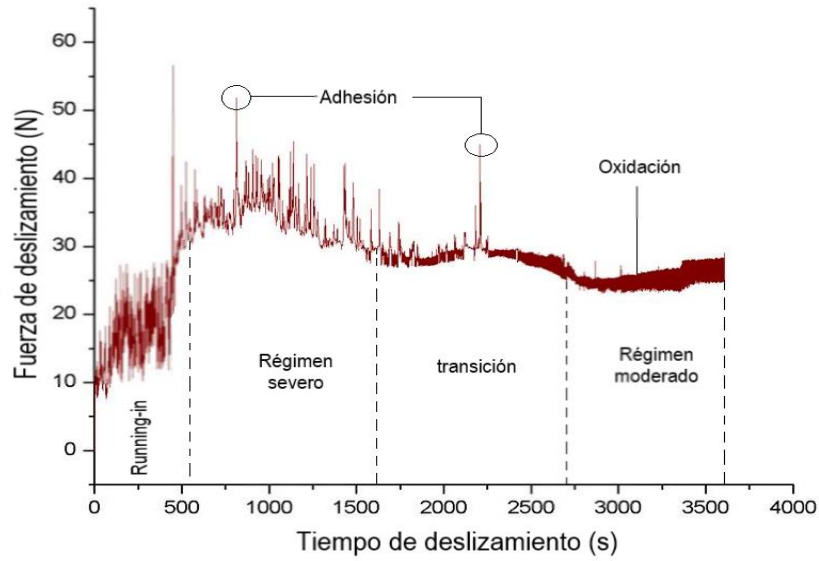
Figura 5. Curva de fuerza de fricción de la condición D43-P28 de la serie a.



En la figura 6 se presenta la curva de fuerza de fricción para la condición de dureza de 43 HRC en el disco y 39 HRC en el pin. La curva muestra el periodo de running-in y dos regímenes permanentes de desgaste. El periodo de running-in fue más largo (580 s) en comparación a la condición D43-P28, lo que indica que hubo un mayor tiempo de acomodamiento de las superficies en contacto. Después de este periodo inicia el primer régimen permanente con una fuerza de fricción de 30 a 35 N. Este primer régimen presenta una mayor variación en la fuerza de fricción con la identificación de picos altos, que indican una fuerte interacción entre las asperezas. En un tiempo de deslizamiento entre 1600 y 2700 s, la fuerza de fricción comienza a disminuir hasta un valor constante aproximado de 24 N, donde se inicia un segundo régimen permanente que presenta una disminución en la variación de la fuerza de fricción. Este análisis del comportamiento de la curva indica una transición en el régimen de desgaste, lo que sugiere que en el primer

régimen permanente operó un desgaste severo y en el segundo régimen un desgaste moderado. El mecanismo de desgaste dominante para cada régimen fue el adhesivo y oxidativo, respectivamente.

Figura 6. Curva de fuerza de fricción de la condición D43-P39 de la serie a.



Los resultados de fuerza de fricción obtenidos para ambas condiciones de la serie a sugieren que una variación de la dureza del pin influenciaría en la operación de los regímenes de desgaste ya que en la condición de menor dureza se presentó solo un régimen permanente y en la condición de dureza más alta del pin se observó una transición en el régimen de desgaste.

En la tabla 5 se presentan los valores de fuerza de fricción obtenidos en las dos condiciones de prueba y los coeficientes de fricción calculados mediante la relación entre la fuerza medida y la carga normal. En el caso de la condición de mayor dureza en el pin (D43-P39), se estimaron dos fuerzas de fricción promedio F_{f1} y F_{f2} , correspondientes a los dos regímenes de desgaste observados. La fuerza de fricción para un primer régimen permanente es estimada desde que termina el periodo running-in hasta finalizar el ensayo o hasta el tiempo de transición donde comienza un segundo régimen.

Tabla 5. Resultados de fuerza de fricción para la serie a

| Condición | F_{f1} [N] | F_{f2} [N] | μ_{f1} | μ_{f2} |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| D43-P28 | 30,2 ± 2,1 | - | 0,62 ± 0,01 | - |
| D43-P39 | 33,0 ± 3,5 | 25,2 ± 1,2 | 0,73 ± 0,07 | 0,56 ± 0,02 |

Los resultados de la tabla muestran que para la condición de alta dureza del pin (D43-P39) la fuerza de fricción del primer régimen permanente es mayor que la del segundo régimen, lo que indica que posiblemente hubo una transición severo-moderado en el régimen de desgaste por deslizamiento, Este comportamiento en la fuerza de fricción fue observado en el análisis de la curva de la figura 6 y en los resultados de la investigación de referencia [1].

4.1.2 Pérdida de masa en los pines

Las pérdidas de masa registradas en cada uno de los ensayos representan el desgaste sufrido por el pin, aunque se deben tener en cuenta algunas limitaciones como el periodo de running-in y la transferencia de material durante el desgaste. Si el periodo de running-in es mayor se considera que habrá una pérdida de masa significativa en el material. La transferencia de material durante el desgaste ocurre con la actuación de un mecanismo de adhesión, donde el pin ganaría masa que se transfiere del disco.

Tabla 6. Resultados de desgaste para la serie a

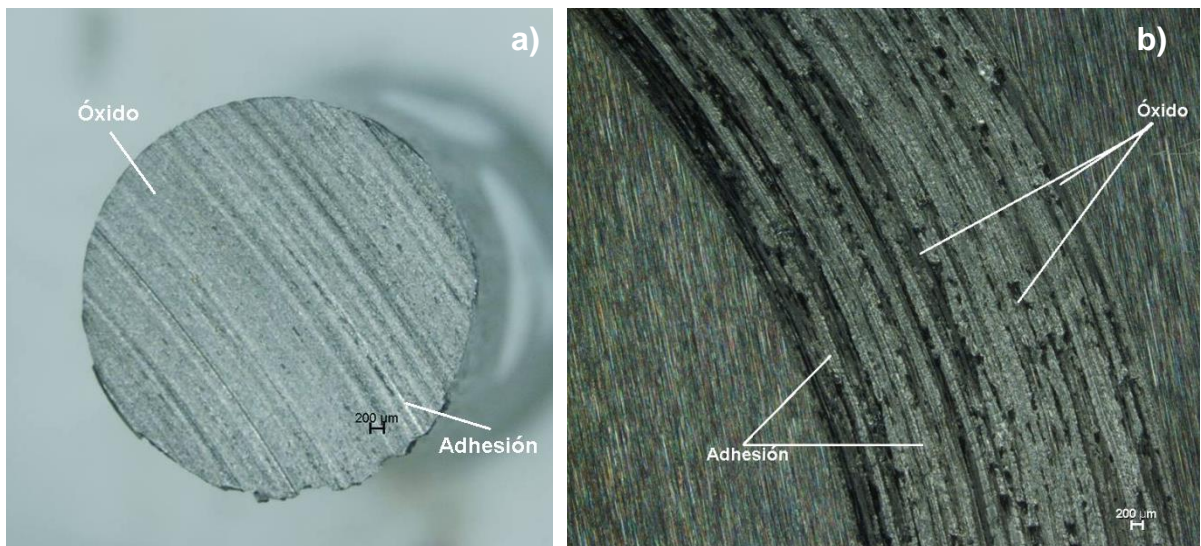
| Condición | Pin | | |
|------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------|
| | Masa inicial [g] | Masa final [g] | Pérdida de masa [g] |
| D43-P28 | 2,81 ± 0,1 | 2,54 ± 0,1 | 0,27 ± 0,1 |
| D43-P39 | 2,53 ± 0,1 | 2,33 ± 0,1 | 0,21 ± 0,1 |

En la tabla 6 se presentan los resultados de pérdida de masa donde se observa una pérdida estadísticamente igual en las dos condiciones. Este resultado puede estar relacionado con la operación de un periodo de running-in mayor presentado en la segunda condición, donde posiblemente hubo un desgaste significativo del material durante este tiempo de acomodamiento de las superficies en contacto.

4.1.3 Observación de las superficies de desgaste

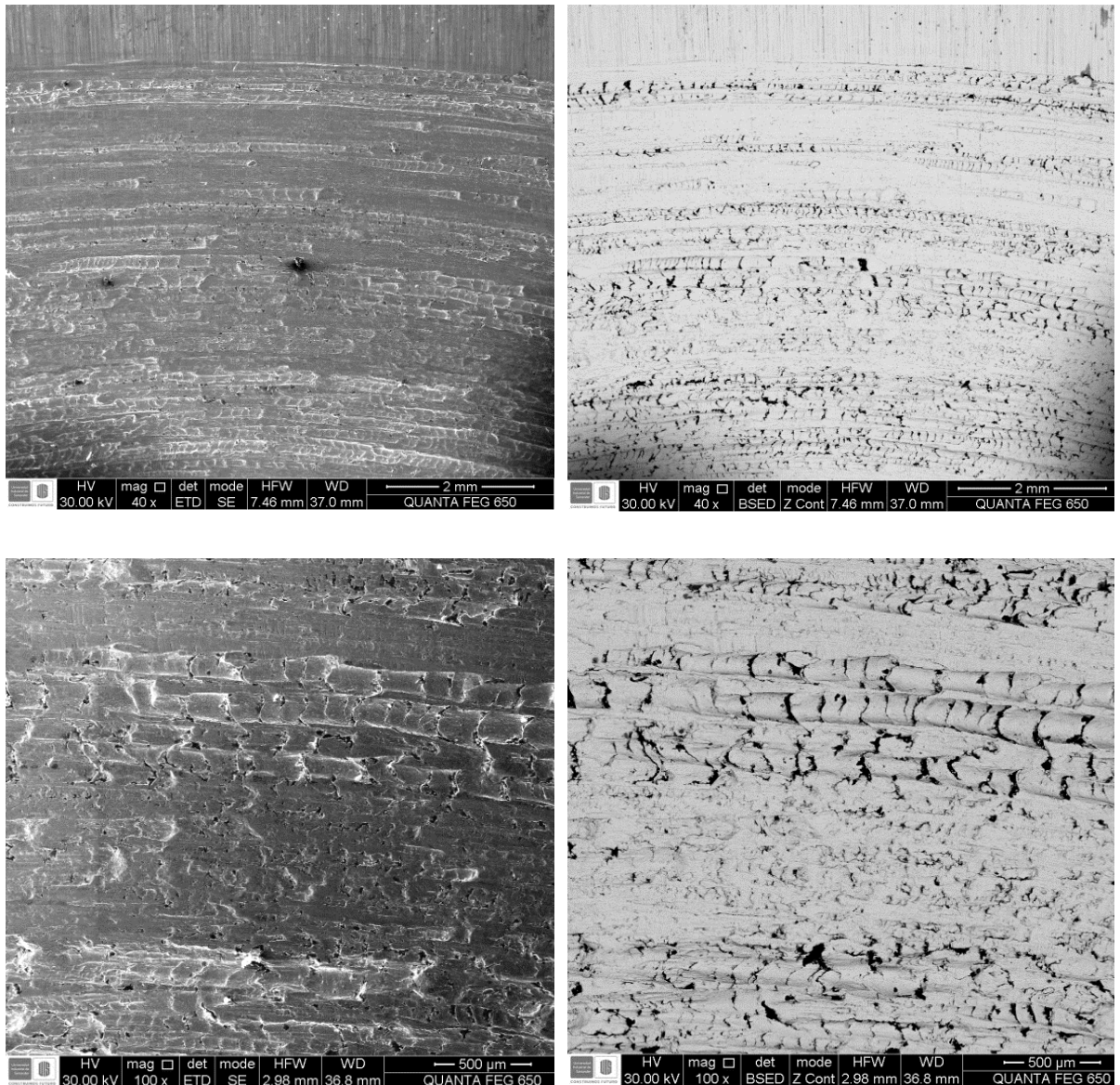
En la figura 7 se presentan las imágenes obtenidas por estereoscopia de las superficies desgastadas de pin y disco. Se pueden observar en ambas superficies dos zonas: una oscura y otra brillante que corresponden a regiones de óxidos y trazos de contacto metálico, respectivamente. Este resultado confirma la actuación de los mecanismos de desgaste oxidativo y adhesivo identificados en el análisis de la figura 5. En la superficie del disco se observa presencia de oxidación y deformación plástica, marcas de fatiga y adhesión como producto de la ruptura de juntas de contacto de las asperezas.

Figura 7. Superficies de los cuerpos desgastados según la condición D43-P28 a) superficie del pin b) superficie del disco.



En las figuras 8 Y 9 se muestran imágenes obtenidas por SEM de las superficies desgastadas del disco y pin para la condición D43-P28. Se presenta la misma imagen en los modos SE y BSE.

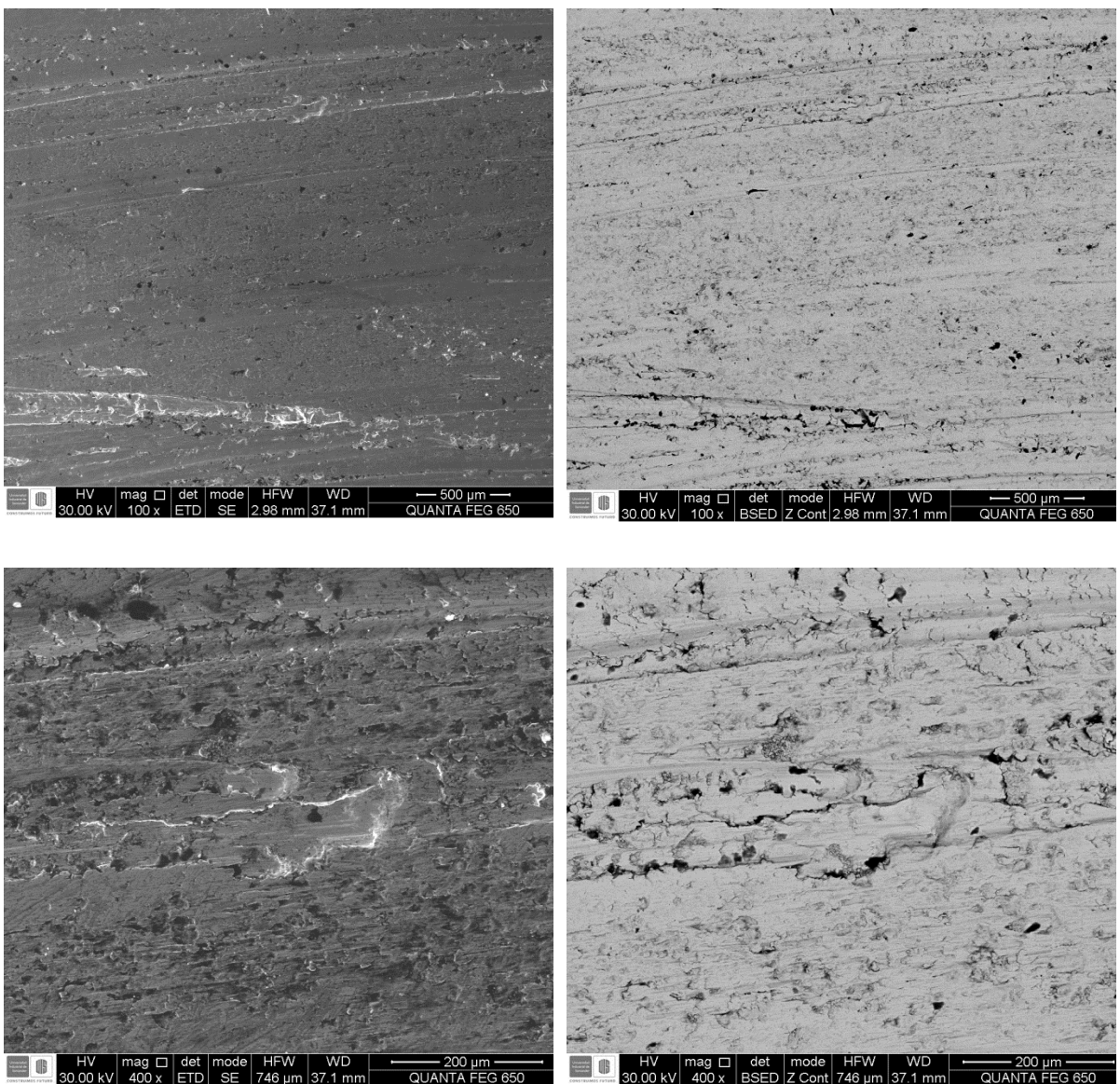
Figura 8. Imágenes obtenidas por SEM de la superficie desgastada del disco con la condición D43-P28 de la serie a.



En la figura 8 se observan marcas de deformación plástica significativas, y marcas producto del proceso de rectificado del disco. La imagen en el modo BSE confirmó

la presencia de óxidos que son identificados como las zonas oscuras. Esto indica que hubo la actuación de los mecanismos de desgaste oxidativo y adhesivo, que ya habían sido identificados en la curva y las imágenes por estereoscopía para esta condición. Las imágenes muestran marcas de fatiga generadas por la actuación de un mecanismo de adhesión.

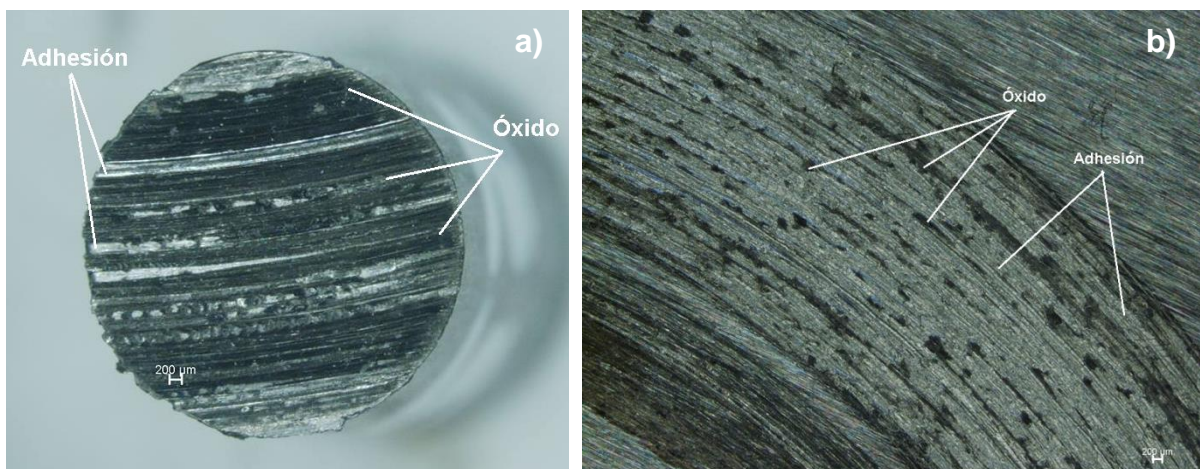
Figura 9. Imágenes obtenidas por SEM de la superficie desgastada del pin con la condición D43-P28 de la serie a.



En la figura 9 se observan marcas de adhesión por la deformación plástica causada por el contacto metal-metal. Las zonas de oxidación se identifican en mayor proporción cerca de las marcas de deformación plástica. Esto evidencia nuevamente la actuación de los mecanismos de desgaste oxidativo y adhesivo que fueron identificados en las imágenes por estereoscopía.

En la figura 10 se presentan imágenes de las superficies desgastadas del pin y disco de la condición D43-P39. En la superficie del pin se observan regiones de oxidación más grandes y continuas a la dirección de deslizamiento. Las marcas de contacto metálico muestran un mecanismo de desgaste adhesivo. Por otro lado, en la superficie del disco se observan regiones de oxidación que no son continuas como ocurre con la superficie del pin. Estas regiones presentan una mayor proporción que en la condición D43-P28, siendo las zonas de oxidación más predominantes en la superficie del pin. Este análisis indica que hubo una transición severo-moderado en el régimen de desgaste donde el mecanismo predominante fue el oxidativo.

Figura 10. Superficies de los cuerpos desgastados según la condición D43-P39 a) superficie del pin b) superficie del disco.

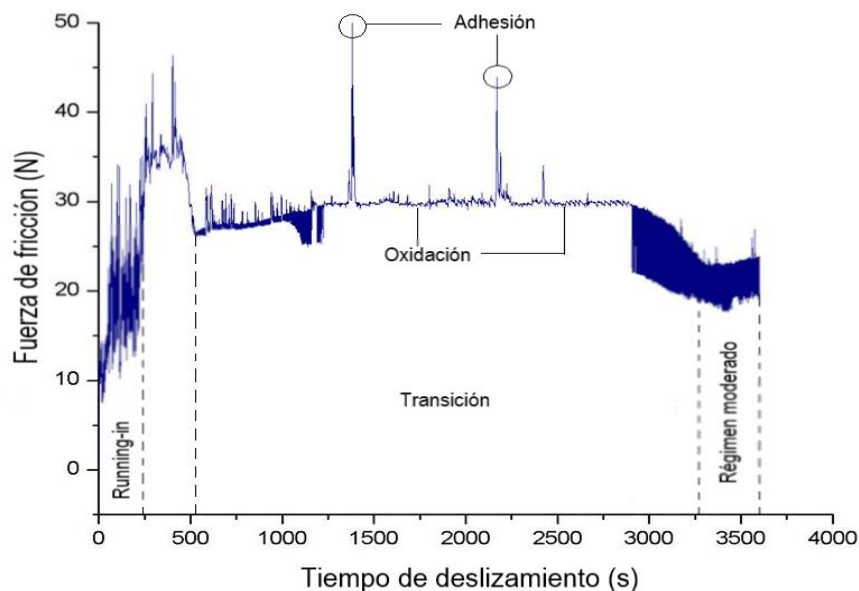


4.2 Serie b

4.2.1 Fuerza de fricción

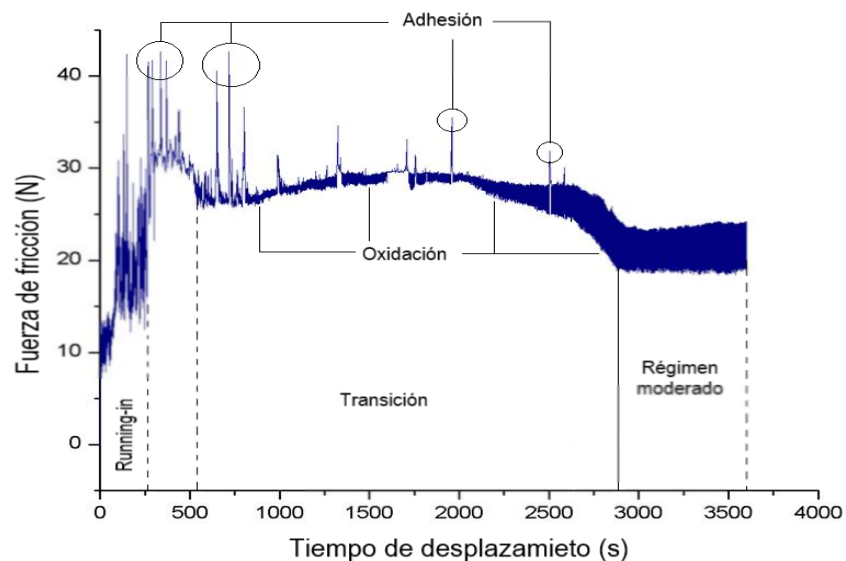
En la figura 11 se presenta la curva de fuerza de fricción para una condición de dureza más alta en el disco. Se observa un periodo de running-in y un régimen permanente de desgaste. El tiempo de duración del running-in fue de 250 s que es un tiempo corto de acomodamiento de las superficies de contacto. La transición comienza a partir de un tiempo de deslizamiento cercano a los 510 s hasta 3250 s, donde la fuerza de fricción es de 30 N aproximadamente. En esta transición se observa una mayor y menor variación de la fuerza de fricción con la presencia de picos altos y bajos que indican un nivel de interacción entre las asperezas según el mecanismo de desgaste que esté actuando. Después de la transición inicia un periodo permanente con una fuerza de fricción aproximadamente constante de 20 N, en el que se presenta una menor variación de la fuerza de fricción que puede relacionarse a un mecanismo oxidativo. Este comportamiento indica que hubo una transición severo-moderado de desgaste por deslizamiento.

Figura 11. Curva de fuerza de fricción de la condición D50-P28 de la serie b.



La curva de la figura 12 representa una condición de dureza más alta en el pin. Se puede observar un periodo de running-in similar a la curva de la anterior condición con un tiempo de duración cercano a los 250 s. La transición comienza alrededor de los 500 s a una fuerza de fricción de 28 N aproximadamente. En esta transición se observa la operación de los mecanismos oxidativo y adhesivo. Después de la transición inicia un periodo permanente con una fuerza de fricción constante de 21 N y una variación menor en la fuerza de fricción que sugiere la operación de un mecanismo oxidativo, lo que indica una transición severo-moderado de desgaste por deslizamiento. La variación de la fuerza de fricción durante el régimen moderado de la condición D43-P34 se presenta en un rango de tiempo de deslizamiento mayor que lo observado en la curva de la condición D43-P28.

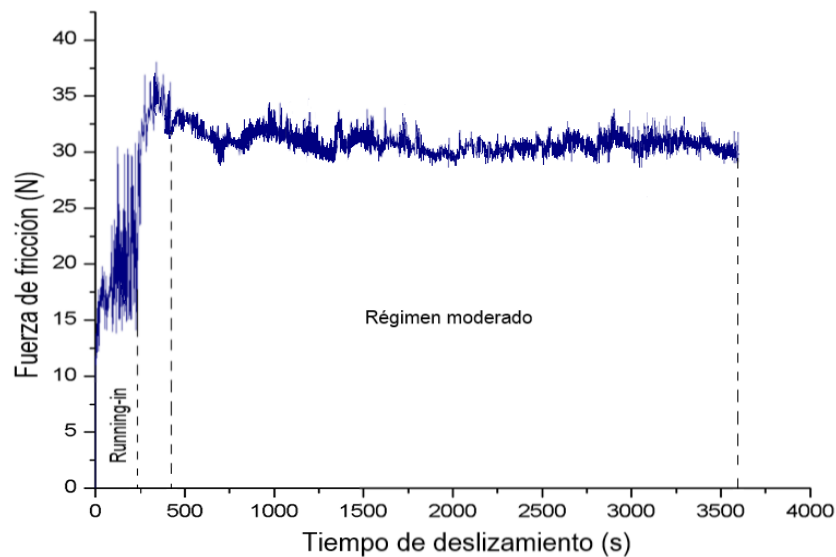
Figura 12. Curva de fuerza de fricción de la condición D50-P34 de la serie *b*.



En la figura 13 se muestran los resultados de fuerza de fricción para la condición de la serie *b* con una mayor dureza en el pin. El periodo de running-in presenta características similares a las dos condiciones anteriores, describiendo tiempos menores a 250 s. Se observa un solo régimen de desgaste permanente que inicia a partir de un tiempo de deslizamiento de 750 s y una fuerza de fricción de 30 N

aproximadamente. Este régimen presenta la aparición de picos altos que están relacionados con una mayor variación de la fuerza de fricción y una fuerte interacción entre las asperezas. Después de un tiempo de deslizamiento cercano a los 1750 s se muestra una disminución en la variación de la fuerza de fricción y con ello una baja interacción que da origen a un mecanismo dominante de desgaste oxidativo. Según este análisis del comportamiento de la curva indica que hubo la actuación de un régimen moderado.

Figura 13. Curva de fuerza de fricción de la condición D50-P39 de la serie *b*.



En la tabla 7 se hace un resumen de los resultados de fuerza de fricción para la serie *b*. Los resultados de la tabla muestran que de las tres condiciones de esta serie en la condición de mayor dureza del pin no hubo una transición severo-moderado en el régimen de desgaste. Para la condición de baja y media dureza del pin se presentó una transición en el régimen de desgaste.

Tabla 7. Resultados de fuerza de fricción para la serie *b*.

| Condición | F_{f1} [N] | F_{f2} [N] | μ_1 | μ_2 |
|-----------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| D50-P28 | $27,9 \pm 1,7$ | $20,7 \pm 1,5$ | $0,57 \pm 0,01$ | $0,44 \pm 0,02$ |
| D50-P34 | $27,9 \pm 1,3$ | $21,5 \pm 1,7$ | $0,57 \pm 0,01$ | $0,48 \pm 0,02$ |
| D50-P39 | - | $29,1 \pm 1,6$ | - | $0,59 \pm 0,01$ |

4.2.2 Pérdida de masa en los pines

En la tabla 8 se presentan los resultados de la pérdida de masa del pin para las condiciones que describen una mayor dureza en el disco. Los resultados mostraron que se presenta mayor pérdida de masa con la disminución de la dureza del pin. Esto puede explicarse con los resultados anteriormente expuestos, donde de las tres condiciones la curva de fuerza de fricción que presentó un comportamiento de desgaste moderado fue la condición de mayor dureza en el pin.

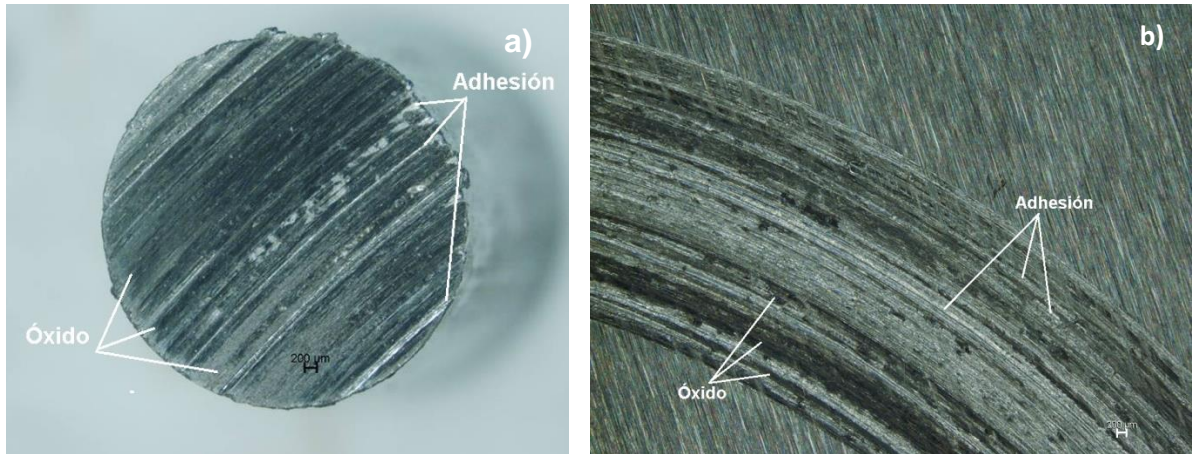
Tabla 8. Resultados de desgaste para la serie *b*.

| Condición | Pin | | |
|-----------|------------------|----------------|---------------------|
| | Masa inicial [g] | Masa final [g] | Pérdida de masa [g] |
| D50-P28 | 3,06 ± 0,01 | 2,85 ± 0,02 | 0,21 ± 0,01 |
| D50-P34 | 3,07 ± 0,11 | 2,89 ± 0,08 | 0,18 ± 0,03 |
| D50-P39 | 2,96 ± 0,03 | 2,87 ± 0,03 | 0,09 ± 0,02 |

4.2.3 Observación de las superficies de desgaste

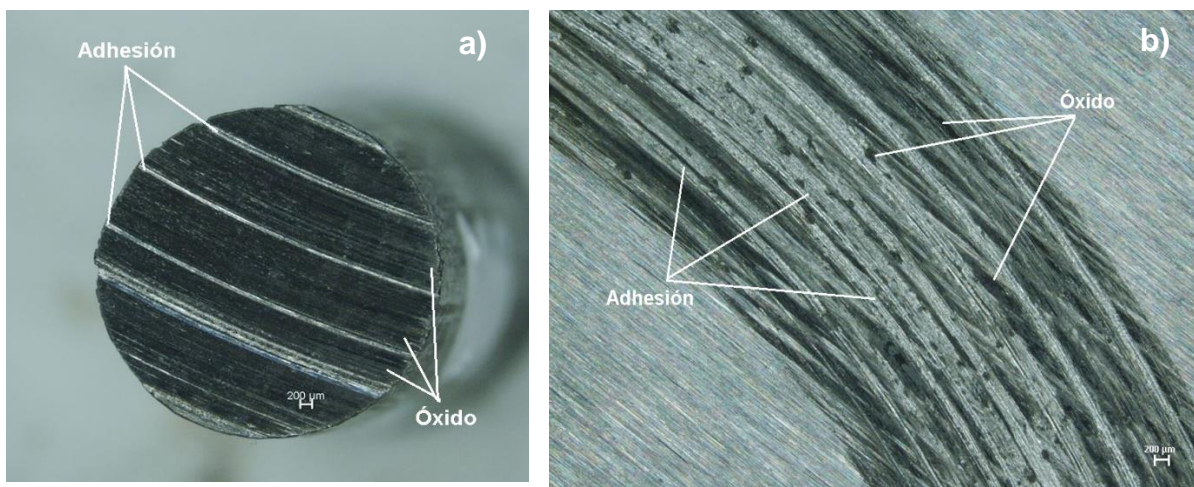
En la figura 14 se presentan las imágenes obtenidas por estereoscopia de las superficies desgastadas de pin y disco, respectivamente. En ambas superficies se observan zonas oscuras que corresponden a óxidos y zonas brillantes que indican marcas de deformación plástica. En la superficie del pin las zonas de oxidación son más predominantes, lo que indica la actuación dominante de un mecanismo oxidativo. En la superficie del disco la oxidación se presenta en menor proporción que el pin. El análisis de la curva de la fuerza de fricción para esta condición describe una transición a régimen moderado lo que confirma el dominio del mecanismo.

Figura 14. Superficies de los cuerpos desgastados según la condición D50-P28 a) superficie del pin b) superficie del disco.



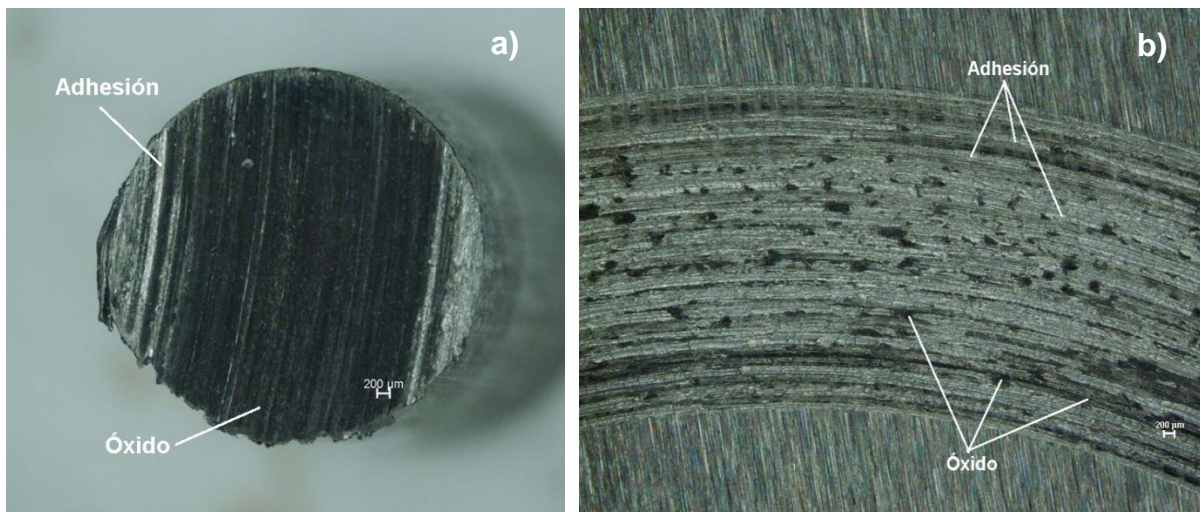
Las imágenes presentadas en la figura 15 muestran una región predominante de oxidación en la superficie del pin con algunas marcas de contacto metálico continuas en la dirección del movimiento. Por otro lado, la superficie del disco muestra una oxidación aislada (puntos o regiones pequeñas) al igual que marcas de deformación plástica. Se puede observar las marcas del rectificado inicial del disco lo que puede sugerir que el área real de contacto fue relativamente baja.

Figura 15. Superficies de los cuerpos desgastados según la condición D50-P34 a) superficie del pin b) superficie del disco.



En la figura 16 se observa que la region de oxidación es mayor en la superficie del pin lo que indica un dominio del mecanismo de desgaste oxidativo. Las marcas de deformación plástica se evidencian en una menor cantidad y a diferencia de la condición D43-P39 de la serie a estas marcas no se encuentran dispersas en las regiones oscuras. En la superficie del disco se observan zonas con presencia de óxidos. Según el análisis de las superficies el mecanismo de desgaste dominante para esta condición fue el oxidativo.

Figura 16. Superficies de los cuerpos desgastados según la condición D50-P39 a) superficie del pin b) superficie del disco.



En la figura 17 se muestran imágenes obtenidas por SEM de la superficie desgastada del disco de la condición D50-P39. Se observa pocas regiones de deformación plástica en comparación a lo observado en la condición D43-P28. Las zonas de oxidación se encuentran distribuidas en la superficie y en algunas zonas de deformación plástica la presencia de estos óxidos es más notoria.

Figura 17. Imágenes obtenidas por SEM de la superficie desgastada del disco con la condición D50-P39 de la serie b.

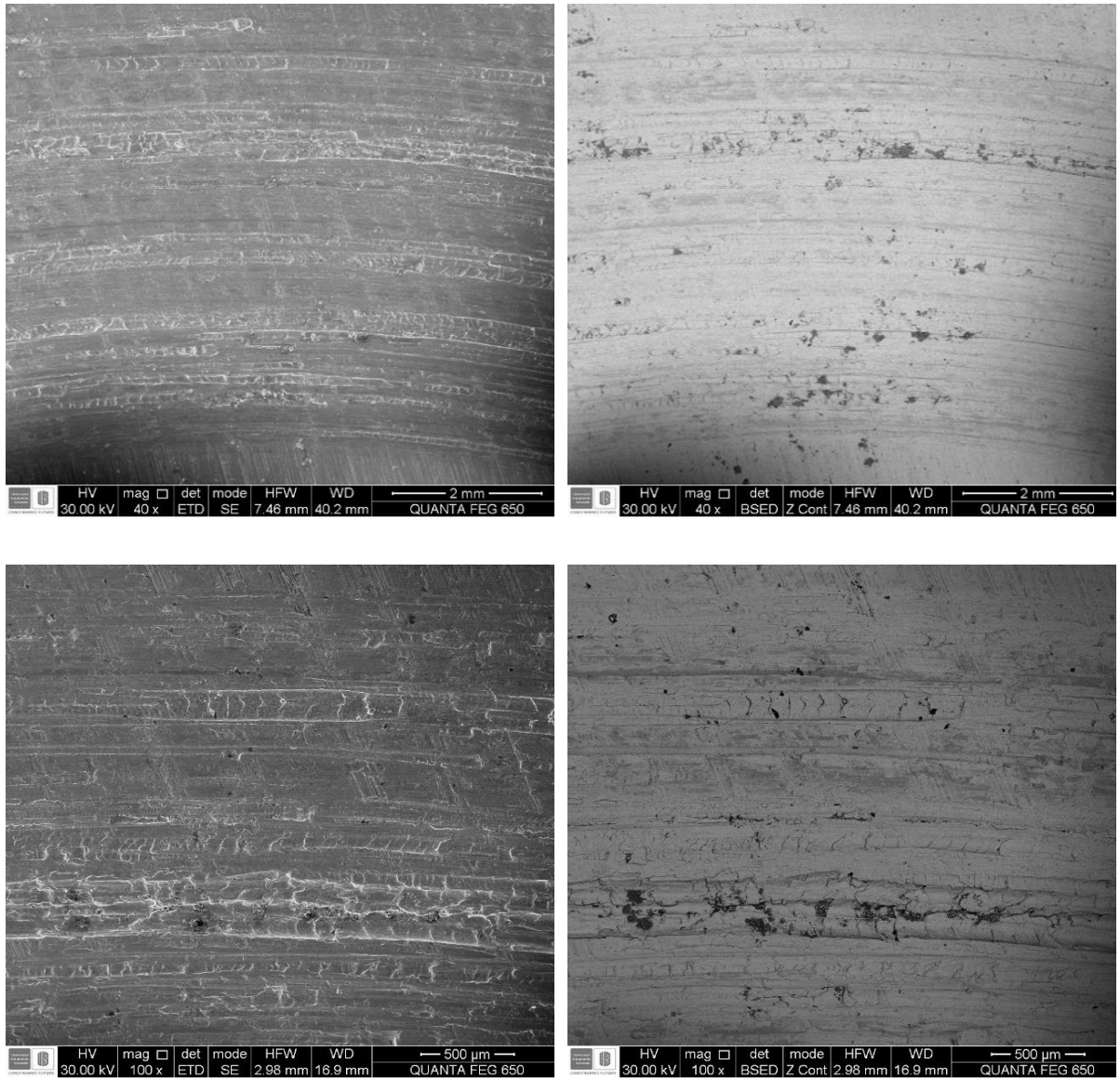
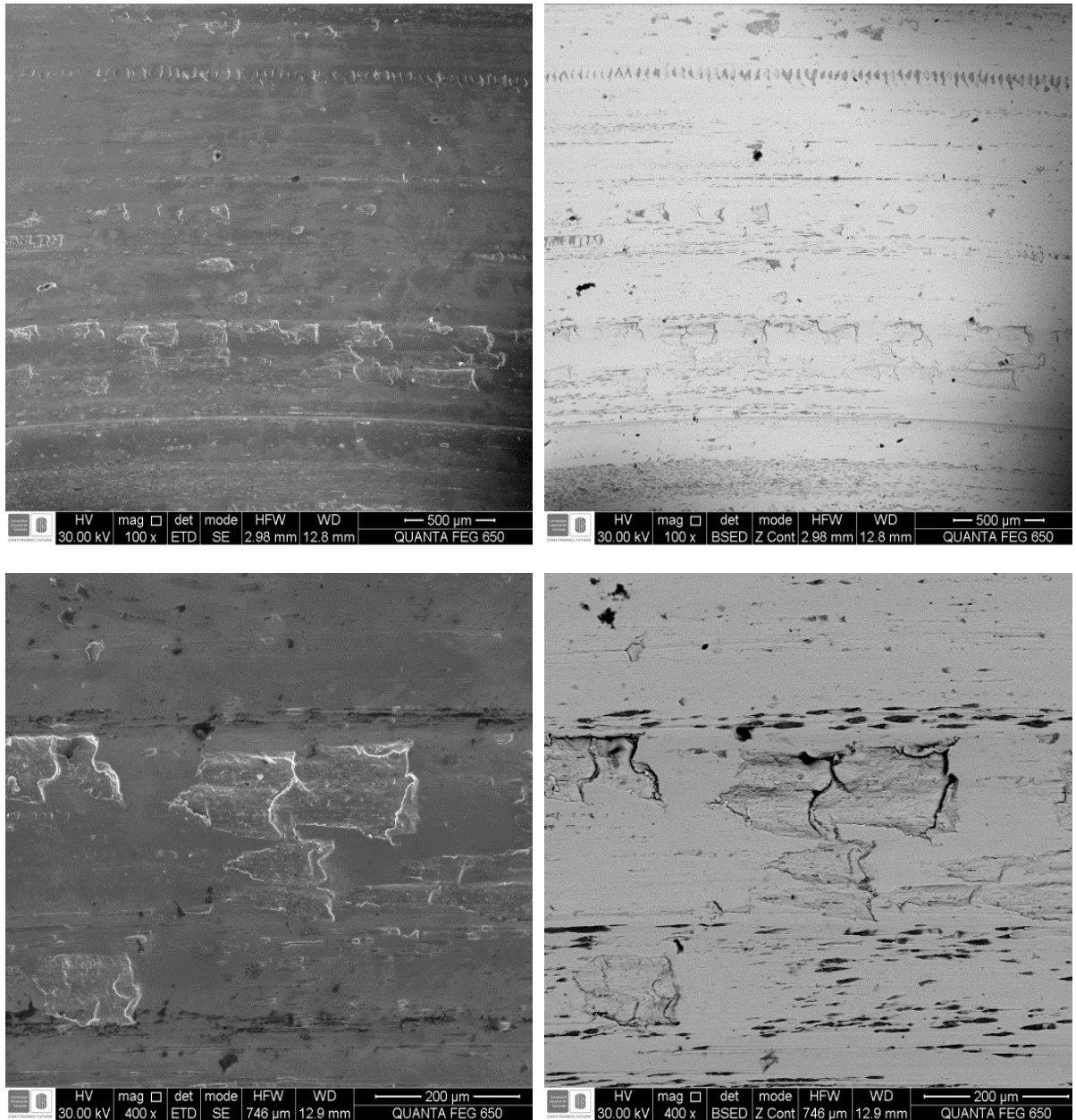


Figura 18. Imágenes obtenidas por SEM de la superficie desgastada del pin con la condición D50-P39 de la serie b.



En la figura 18 se observan pocas zonas de deformación plástica y regiones de oxidación mas concentradas. Lo que confirma la actuación de un régimen de desgaste moderado, teniendo en cuenta que la perdida de masa del pin fue menor en esta condición.

5 CONCLUSIONES

En los ensayos de desgaste por deslizamiento realizados se confirmó que la variación de la dureza de los materiales es un factor fundamental en la actuación de los regímenes de desgaste. A continuación, se presentan las principales conclusiones de los ensayos de desgaste por deslizamiento de pines de acero AISI 4140 contra disco de acero AISI H13.

1. En la condición de menor dureza en el pin (D43-P28) se observó la actuación simultáneamente de dos mecanismos de desgaste. Con el aumento de la dureza del pin (D43-P39) se promovió una transición de severo a moderado.
2. En las condiciones de mayor dureza en el disco se observó un régimen severo con una dureza baja en el pin, pero luego se convirtió en una transición a moderado. Esta tendencia se confirmó con la mayor dureza del pin (D50-P39) donde únicamente se presentó el régimen moderado.
3. En las condiciones de menor dureza en el disco (serie a) se evidenció la operación simultánea de dos mecanismos de desgaste totalmente diferente, en cual es un fenómeno poco observado en la literatura.
4. Los resultados obtenidos son coherentes con lo observado en la literatura y complementan las investigaciones ya realizadas para seguir avanzando en el entendimiento del fenómeno de la transición del régimen de desgaste por deslizamiento.

6 RECOMENDACIONES

Para la ejecución de pruebas pin-on-disk se recomienda garantizar un contacto uniforme entre la superficie del pin y disco antes de iniciar los ensayos. Esto con el fin de evitar errores en los resultados que puedan afectar el estudio.

Se recomienda verificar las durezas de los materiales a ensayar y la realización de un rectificado para garantizar un contacto homogéneo de las superficies.

Se recomienda mantener las superficies de los materiales ensayados en una atmósfera controlada, con el fin de que no se produzca óxidos en la superficie los cuales pueden interferir con la caracterización de las muestras.

REFERENCIA

- [1] C.C Viáfara, Transição no regime de desgaste por deslizamento dos aços: uma abordagem termodinâmica, 2010.
- [2] K.H. Zum-Gahr, Microstructure and Wear of Materials, Elsevier, 1987.
- [3] I.M. Hutchings, Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Edward Arnold, 1992.
- [4] ASTM NORMA G99-17, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. ASTM Copyright. United States of America.
- [5] MANUAL PIN- DISCO. Laboratorio de Tribología y Superficie. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellin.
- [6] C.C. Viáfara, A. Sinatora, The Effect of Hardness of Sliding Bodies on the Wear Regime Transition of Steels, in: First International Brazilian Conference on Tribology, 2010.
- [7] C.C. Viáfara, M.I. Castro, J.M. Vélez, A. Toro, Unlubricated Sliding Wear of Pearlitic and Bainitic Steels, Elsevier, 2005.
- [8] C.C. Viáfara, A. Sinatora, Unlubricated Sliding Friction and Wear of Steels: An evaluation of the mechanism responsible for the T1 wear regime transition, submitted to the 18th International Conference on Wear of Materials, 2011.

BIBLIOGRAFÍA

ARCHARD, J.F.; HIRST, W. The wear of metals under unlubricated conditions, Proceedings of the Royal Society of London, 1956.

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

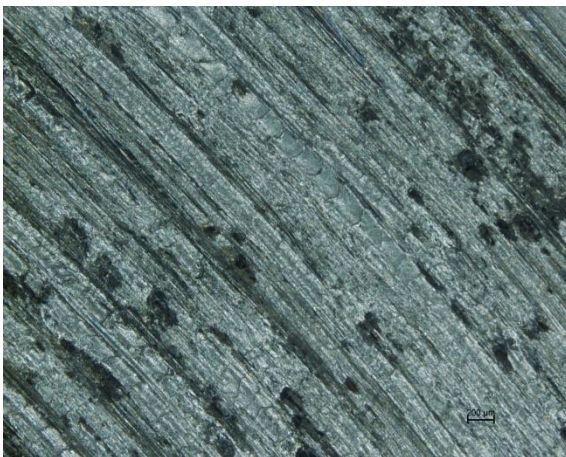
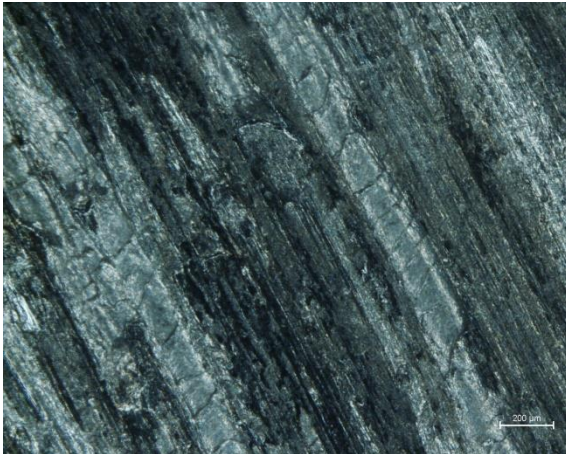
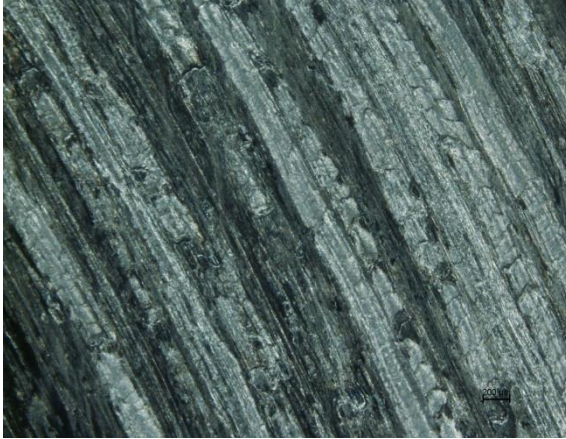
C.C. Viáfara, Propuesta de Investigación capital semilla: Análisis de problemas de desgaste de herramientas en la Industria manufacturera, Universidad Industrial de Santander, 2016.

C.D. Rey, G.J. Villar UIS, Diseño y construcción de una máquina pin sobre disco (pin-on-disk), para realizar ensayos de desgaste. Trabajo de grado Escuela de Ingeniería Mecánica UIS, 2009.

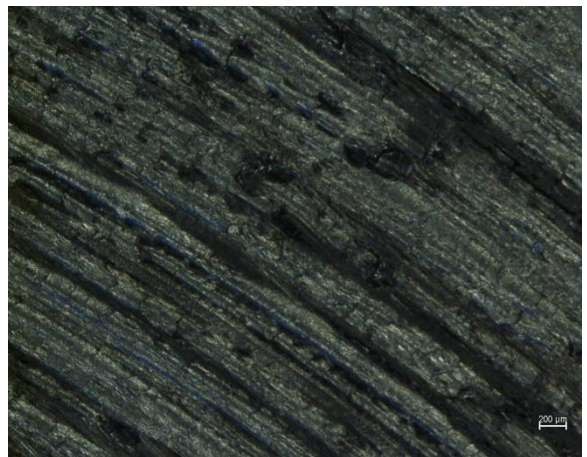
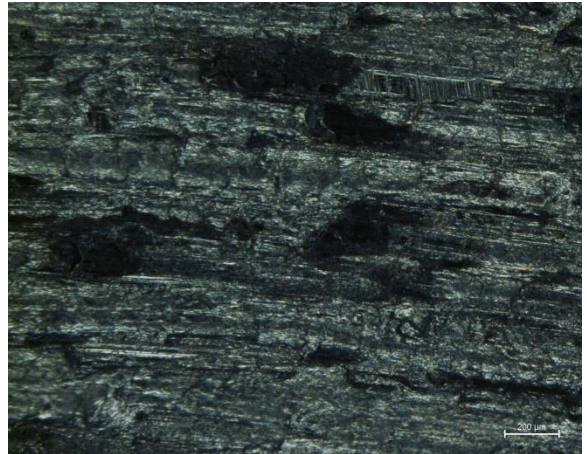
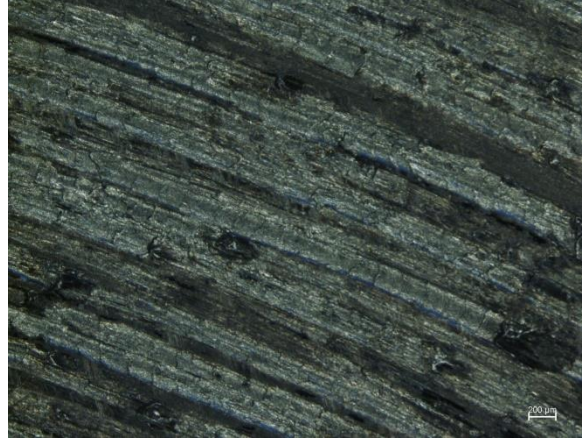
ANEXOS

Anexo 1. Imágenes tomadas por estereoscopia de las superficies desgastadas de los discos para las condiciones de las series a y b.

Serie a

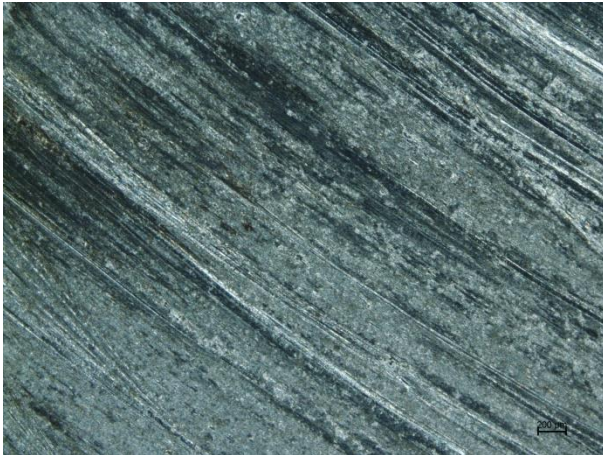


Serie b



Anexo 2. Imágenes obtenidas por estereoscopia de las superficies desgastadas de los pines para las condiciones de las series a y b.

Serie a



Serie b

