

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Caracterización del comportamiento tribológico del acero AISI O1 bajo condiciones de contacto seco utilizando la técnica Pin-on-Disk

Diego Andrés Avila Olaya y Hernando Holguín Amado

Proyecto de Grado

Director

Francisco José Saldivia Saldivia

Máster en Mantenimiento Industrial

Codirector

Alberto David Pertuz Comas

Doctor en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico-mecánica

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Agradecimientos

Este proyecto no habría sido posible sin quienes nos acompañaron en el camino. Agradecemos especialmente a nuestro director, el Mtr. Francisco José Saldivia, por su guía, confianza en nuestras ideas y ayudar a resolver las dificultades que surgieron en este arduo camino; a la Dra. Paula Andrea Cuervo Velásquez, por el apoyo brindado en el uso de las máquinas del laboratorio de metalografía; y a la Universidad Industrial de Santander, por ofrecernos la formación y la oportunidad de estudiar la carrera que soñamos.

Por parte de Diego Andrés Avila Olaya, quiero agradecer primeramente a Dios por ser mi consolador en los momentos de aflicción. Agradezco a mis padres, Sol Katerine Olaya Correa y Bernardino Avila Romero, por cultivar desde mi niñez esas ganas de soñar en grande y ayudarme incondicionalmente a cumplir mis sueños. Agradezco a mi hermosa pareja, Kathryn Juliana Salcedo Duarte, por recordarme con tanto amor, día tras día, que buscando primeramente el reino de Dios y su justicia, Él me dará todo lo que necesite; hoy y por el resto de mi vida daré testimonio de eso. Por último, agradezco a mis compañeros que me acompañaron durante toda mi carrera; entre ellos, destaco a Andrés Díaz Pérez por ser la perfecta definición de la palabra “amigo”.

Por parte de Hernando Holguín Amado quiero agradecer profundamente a Dios por ser mi guía constante, fuente de fortaleza y claridad en los días difíciles. Extiendo mi gratitud a mi mamá, Luz Yamile Amado Rodríguez, y a mi papá, Hernando Holguín Chamorro, por su amor incondicional, por creer en mí y enseñarme con su ejemplo la importancia del esfuerzo, la perseverancia y los valores. Cada logro mío es también suyo, porque han estado presentes en cada paso animándome a seguir adelante. A mi hermana, Sara Milena Galeano Amado, y a mi hermano, Iván Darío Holguín Amado, por su alegría, compañía y palabras de ánimo que me impulsaron en los momentos de mayor cansancio. Finalmente, a toda mi familia, por su apoyo, sus palabras de aliento y su compañía, incluso a la distancia, que fueron refugio y motivación durante este proceso.

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Tabla de Contenido

| | |
|---|----|
| Introducción | 10 |
| 1. Objetivos..... | 13 |
| 1.1 Objetivo General..... | 13 |
| 1.2 Objetivos Específicos..... | 13 |
| 2. Marco Teórico | 14 |
| 2.1 Antecedentes de la investigación | 14 |
| 2.1.1 Nivel Internacional..... | 14 |
| 2.1.2 Nivel Nacional | 14 |
| 2.2 Referencias Teóricas | 15 |
| 2.2.1 Tribología..... | 15 |
| 2.2.2 Desgaste de materiales..... | 16 |
| 2.2.3 Acero AISI O1..... | 18 |
| 2.2.4 Carburo de Tungsteno YG6 | 19 |
| 2.2.5 Ensayo Pin-on-Disk | 20 |
| 3. Metodología | 21 |
| 3.1 Materiales y equipos | 21 |
| 3.1.1 Materiales..... | 21 |
| 3.1.2 Equipos | 22 |
| 3.1.2.1 Maquina de ensayos (UMT TriboLab) | 22 |
| 3.1.2.2 Balanza analítica | 22 |
| 3.1.2.3 Microscopio óptico | 23 |
| 3.2 Preparación de muestras | 24 |

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

| | |
|---|----|
| 3.3 Variables y justificación de rangos | 24 |
| 3.3.1 Duración del ensayo..... | 25 |
| 3.4 Modelos de contacto y desgaste..... | 25 |
| 3.4.1 Calculo de la presión de contacto | 26 |
| 3.4.2 Calculo de la tasa y factor de desgaste..... | 28 |
| 3.5 Análisis de superficies desgastadas..... | 32 |
| 3.6 Análisis de dureza superficial | 33 |
| 4. Análisis de Resultados | 34 |
| 4.1 Comportamiento del coeficiente de fricción en función del tiempo..... | 34 |
| 4.2 Presión de contacto y su relación con la fricción..... | 36 |
| 4.3 Tasa de desgaste y coeficiente de desgaste | 37 |
| 4.4 Caracterización Microestructural..... | 38 |
| 4.5 Evaluación de la Variación de Dureza | 43 |
| 5. Conclusiones..... | 45 |
| 6. Recomendaciones | 47 |
| 6.1 Recomendaciones metodológicas | 47 |
| 6.2 Recomendaciones para caracterización de materiales | 47 |
| 6.3 Recomendaciones prácticas para la industria | 48 |
| Referencias..... | 49 |

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Lista de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. <i>Propiedades físicas y mecánicas del acero AISI O1</i> | 18 |
| Tabla 2. <i>Composición química del acero AISI O1</i> | 19 |
| Tabla 3. <i>Propiedades físicas y mecánicas del Carburo de Tungsteno YG6</i> | 20 |
| Tabla 4. <i>Condiciones experimentales de los ensayos Pin-on-Disk.</i> | 25 |
| Tabla 5. <i>Radio de contacto y presión de contacto nominal para las diferentes configuraciones.</i> | 27 |
| Tabla 6. <i>Mediciones de pérdida de masa para los ensayos con el pin de 2 mm.</i> | 29 |
| Tabla 7. <i>Mediciones de pérdida de masa para los ensayos con el pin de 6,35 mm.</i> | 29 |
| Tabla 8. <i>Volumen de material perdido, coeficiente de desgaste y tasa de desgaste para las diferentes configuraciones</i> | 32 |
| Tabla 9. <i>Presión de contacto vs. μ_{est}</i> | 36 |
| Tabla 10. <i>Dureza superficial post-ensayo para cada configuración de carga, velocidad y diámetro de pin.</i> | 43 |

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. <i>Esquema que muestra el ensayo desgaste tipo pin-on-disk.</i> | 20 |
| Figura 2. <i>Probeta de acero AISI O1 empleada en el ensayo Pin-on-Disk.</i> | 21 |
| Figura 3. <i>Pines esféricos de carburo de tungsteno YG6 empleados en el ensayo Pin-on-Disk.</i> . | 21 |
| Figura 4. <i>Equipo UMT TriboLab empleado para la ejecución de los ensayos de desgaste.</i> | 22 |
| Figura 5. <i>Balanza analítica para medición de masa.</i> | 22 |
| Figura 6. <i>Microdurómetro innovatest Falcon 400G2</i> | 23 |
| Figura 7. <i>Presión de contacto nominal en diferentes configuraciones.</i> | 28 |
| Figura 8. <i>Huella generada por la prueba de dureza Vickers observada mediante microscopio óptico.</i> | 31 |
| Figura 9. <i>Micrografía óptica representativa de la superficie desgastada del acero AISI O1.</i> | 33 |
| Figura 10. <i>Huella representativa de la prueba de dureza Vickers en el acero AISI O1.</i> | 34 |
| Figura 11. <i>Coeficiente de fricción vs. tiempo (10–30 N, pin 2 mm, 200 rpm).</i> | 35 |
| Figura 12. <i>Coeficiente de fricción estacionario vs. presión de contacto.</i> | 36 |
| Figura 13. <i>Tasa de desgaste kv para las diferentes configuraciones.</i> | 37 |
| Figura 14. <i>Coeficiente de desgaste k para las diferentes configuraciones.</i> | 37 |
| Figura 15. <i>Imagen general del disco después del ensayo.</i> | 39 |
| Figura 16. <i>Micrografías ópticas de las huellas de desgaste obtenidas con pin de 2 mm: (A) 10 N – 200 rpm, (B) 30 N – 200 rpm, (C) 10 N – 500 rpm y (D) 30 N – 500 rpm.</i> | 39 |
| Figura 17. <i>Micrografías ópticas de las huellas de desgaste obtenidas con pin de 6,35 mm: (A) 10 N – 200 rpm, (B) 30 N – 200 rpm, (C) 10 N – 500 rpm y (D) 30 N – 500 rpm.</i> | 41 |
| Figura 18. <i>Comparación de dureza inicial vs post-ensayo por configuración.</i> | 44 |

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Figura 19. *Variación del coeficiente de desgaste en función de la dureza superficial post-ensayo.*

..... 45

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Resumen

Título: Caracterización del comportamiento tribológico del acero AISI O1 bajo condiciones de contacto seco utilizando la técnica Pin-on-Disk*

Autor (es): Diego Andrés Avila Olaya, Hernando Holguín Amado**

Palabras clave: Acero AISI O1; desgaste volumétrico; modelo de Archard; Pin-on-Disk; dureza Vickers.

Descripción: La caracterización tribológica del acero AISI O1 en contacto seco se llevó a cabo mediante ensayos Pin-on-Disk siguiendo la norma ASTM G99, evaluando el efecto de la carga (10–30 N), la velocidad de deslizamiento (200–500 rpm) y el diámetro del pin (2 mm y 6,35 mm) sobre el desgaste. Se determinó la tasa de desgaste volumétrico y el coeficiente de desgaste mediante el modelo de Archard, obteniéndose un incremento sostenido de ambos parámetros al aumentar la severidad del ensayo. El coeficiente de desgaste osciló entre $3,49 \times 10^{-3}$ y $5,05 \times 10^{-3}$, mientras que la tasa volumétrica varió desde $5,26 \times 10^{-12}$ m³/m hasta $2,29 \times 10^{-11}$ m³/m, alcanzando los valores máximos bajo la combinación de mayor carga y velocidad (30 N, 500 rpm, pin de 2 mm). El análisis microestructural de las superficies desgastadas reveló mecanismos predominantes de abrasión leve en condiciones menos severas, combinados con adhesión localizada y formación incipiente de óxidos a cargas intermedias, y un desgaste mixto abrasivo-adhesivo con fragmentación superficial en las pruebas más exigentes. Las mediciones de dureza Vickers post-ensayo indicaron un ablandamiento superficial de hasta –3,03% respecto al valor inicial, correlacionando directamente la disminución de dureza con el aumento del Desgaste. Finalmente, se concluye que la presión de contacto y la velocidad de deslizamiento son los factores críticos para maximizar la vida útil de componentes de acero AISI O1 en aplicaciones de contacto seco, proporcionando datos cuantitativos clave para el diseño de sistemas tribológicos en condiciones severas.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingeniería Físico Mecánica. Escuela de ingeniería mecánica. Ingeniería Mecánica.

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Abstract

Title: Characterization of the tribological behavior of AISI O1 steel under dry contact conditions using the Pin-on-Disk technique*

Author(s): Diego Andrés Avila Olaya, Hernando Holguín Amado**

Keywords: AISI O1 steel; volumetric wear; Archard model; Pin-on-Disk; Vickers hardness.

Description: The tribological behavior of AISI O1 steel under dry sliding was characterized using Pin-on-Disk tests according to ASTM G99. The study evaluated volumetric wear rate and wear coefficient via Archard's model for two pin diameters (2 mm and 6.35 mm), three loads (10, 20, and 30 N) and two sliding speeds (200 and 500 rpm). Both wear metrics increased consistently with higher load and speed. The wear coefficient ranged from 3.49×10^{-3} to 5.05×10^{-3} , while the volumetric wear rate varied between 5.26×10^{-12} m³/m and 2.29×10^{-11} m³/m, peaking under the most severe conditions (30 N, 500 rpm, 2 mm pin). Microstructural examination of the worn surfaces revealed predominantly mild abrasive mechanisms at lower severities, combined abrasive-adhesive wear with incipient oxide formation at intermediate conditions, and severe mixed wear with surface fragmentation under the highest load and speed. Post-test Vickers hardness measurements indicated up to a 3.03% reduction in surface hardness relative to the initial value, establishing a direct correlation between surface softening and increased wear. These findings demonstrate that contact pressure and sliding speed are the critical factors governing the wear performance of AISI O1 steel in dry sliding applications. Quantitative wear data and hardness correlations provided by this work offer essential guidelines for optimizing component life in tribological systems subjected to severe operating conditions.

* Graduate Work

** School of Physical and Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Mechanical Engineering. Director: Francisco José Saldivia Saldivia. Master's degree in industrial maintenance

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Introducción

El choque de superficies en movimiento (esa interacción microscópica que ocurre miles de veces por segundo y que rara vez se ve a simple vista) puede decidir el destino de un sistema mecánico. En esa delgada zona de contacto se define cuánta energía se pierde, la vida útil de un componente y cuanto será el costo del mantenimiento de un equipo. En entornos donde la lubricación no es posible, como en herramientas de corte, moldes de estampado o dispositivos expuestos a condiciones extremas, el comportamiento tribológico de los materiales deja de ser un detalle técnico para convertirse en un factor determinante de eficiencia, confiabilidad y sostenibilidad.

Dentro de este contexto, el acero AISI O1 se ha consolidado como un acero herramienta de trabajo en frío ampliamente empleado debido a su alta dureza, buena maquinabilidad y estabilidad dimensional. Estas propiedades lo hacen especialmente útil en procesos que demandan precisión y resistencia al desgaste, encontrando aplicaciones críticas en matrices de estampado, punzones, troqueles, cuchillas de corte y herramientas de precisión. Sin embargo, existe una brecha significativa de conocimiento en la caracterización sistemática de su comportamiento tribológico en condiciones de contacto seco, limitando su aplicación en escenarios industriales donde la lubricación no es viable. (Mahmud et al., 2019)

La fricción y el desgaste en aplicaciones industriales sin lubricación representan un desafío técnico y económico considerable. Según estudios previos, La fricción representa la resistencia al movimiento relativo entre dos cuerpos en contacto, manifestándose como una fuerza tangencial opuesta, mientras que el desgaste es el deterioro de superficies en movimiento relativo debido a la remoción de material por deslizamiento, rodadura o impacto. Cuando se trata del acero AISI O1, esta problemática se agudiza porque su desempeño tribológico no está determinado

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

exclusivamente por su dureza global, sino que está fuertemente condicionado por su microestructura. (Angsuseranee et al., 2020; Semenov et al., 2011)

La disposición de los carburos, la existencia de austenita retenida y la forma de la martensita templada —propiedades derivadas directamente de procesos térmicos como el temple y el revenido— ejercen una influencia notable en los mecanismos de desgaste y fricción. Investigaciones recientes han demostrado que bajo cargas crecientes, el acero AISI O1 incrementa su tasa de desgaste y fricción, presentando mecanismos dominantes como abrasión severa, formación de capas triboquímicas y deformación plástica. No obstante, existe una ausencia de estudios sistemáticos que relacionen estas respuestas tribológicas con variaciones microestructurales específicas del material en condiciones de contacto seco, lo que constituye una limitación crítica para optimizar su desempeño en aplicaciones industriales exigentes. (Angsuseranee et al., 2020; Semenov et al., 2011)

Esta investigación aborda una necesidad técnica y económica fundamental en la industria manufacturera. Desde una perspectiva técnica, comprender el comportamiento tribológico del acero AISI O1 en contacto seco permitirá establecer criterios científicos para la selección y diseño de componentes en entornos donde la lubricación no es viable, como en herramientas de corte para materiales abrasivos, matrices de estampado de alta precisión y dispositivos expuestos a condiciones extremas. (Bourithis et al., 2006)

Económicamente, los resultados tendrán un efecto directo en la disminución de los costos de mantenimiento, reemplazos prematuros y tiempos de inactividad de equipos industriales. La caracterización precisa de la tasa de desgaste, fricción y su relación con la microestructura proporcionará criterios fundamentados con el fin de prolongar la durabilidad de los componentes críticos y mejorar las condiciones de operación de los sistemas tribológicos.

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Desde la perspectiva del conocimiento científico, el estudio de los mecanismos de desgaste y su relación con variables operativas como la carga normal, velocidad de deslizamiento y tiempo de ensayo generará información valiosa para el desarrollo de modelos predictivos. Estos hallazgos ampliarán la comprensión fundamental del comportamiento tribológico de aceros herramienta templados, aportando un soporte científico sólido orientado al desarrollo de materiales con mayor resistencia y a la optimización de procesos de tratamiento térmico. (Semenov et al., 2011; Trevisiol et al., 2018)

Metodológicamente, la investigación empleará el modelo Pin-on-Disk regulada por la norma ASTM G99, utilizando equipos especializados como la máquina UMT TriboLab. La técnica se basa en aplicar un pin sobre la superficie de un disco que rota a velocidad constante, generando un contacto tribológico controlado que permite medir parámetros como el coeficiente de fricción y la pérdida de masa, además de identificar los mecanismos de desgaste predominantes. El enfoque experimental garantizará resultados rigurosos y replicables, permitiendo una caracterización precisa de los fenómenos tribológicos del acero AISI O1 bajo condiciones controladas. (Quispe Ordoñez et al., 2020)

Los aportes de esta investigación serán múltiples: desde la optimización de tratamientos térmicos para maximizar la resistencia al desgaste, hasta la reducción de fallos prematuros y costos de mantenimiento, pasando por un menor consumo energético y una vida útil extendida de componentes críticos. En un escenario industrial y social donde la sostenibilidad y la eficiencia son prioridades, este estudio generará conocimiento técnico aplicable que contribuirá al desarrollo de sistemas mecánicos más confiables, económicos y respetuosos con el medio ambiente.

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar el comportamiento tribológico del acero AISI O1 bajo condiciones de contacto seco, utilizando la técnica Pin-on-Disk, para proporcionar criterios que favorezcan su desempeño en entornos sin lubricación.

1.2 Objetivos Específicos

Evaluar la pérdida de material y la tasa de desgaste del acero AISI O1 bajo condiciones de contacto seco mediante el modelo de Archard, utilizando la técnica Pin-on-Disk según la norma ASTM G99, para estimar su comportamiento tribológico y vida útil.

Analizar la microestructura de las superficies desgastadas del acero AISI O1 utilizando técnicas de microscopía y caracterización de materiales, para identificar los mecanismos de desgaste predominantes en relación con las condiciones del ensayo.

Evaluar la variación de la dureza superficial del acero AISI O1, utilizando mediciones de dureza antes y después de los ensayos tribológicos, para determinar su impacto en la resistencia al desgaste.

Analizar la correlación entre las variables influyentes del ensayo y la tasa de desgaste del acero AISI O1, para identificar los factores que tienen mayor impacto en el comportamiento tribológico en condiciones de contacto seco.

2. Marco Teórico

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Nivel Internacional

En este estudio realizado por Harvinder Singh, Ramandeep Singh y Rupinder Singh (2016), se desarrolló un estudio comparativo sobre las propiedades de desgaste de los aceros AISI D3 y O1, ambos tratados térmicamente para alcanzar la misma dureza. El objetivo principal fue evaluar el comportamiento de desgaste de estos materiales en ausencia de lubricante durante el deslizamiento, similares a las que se experimentan en las operaciones de estampado de metales, donde el desgaste de los troqueles es un problema recurrente. La investigación buscó mejorar la vida útil de los troqueles, disminuir las interrupciones operativas y aumentar la rentabilidad en el sector del estampado de metales. Para llevar a cabo las pruebas de desgaste, se utilizó un monitor de desgaste y fricción TR 201.

Los hallazgos de Singh et al. (2016) proporcionan un punto de referencia crucial para comparar el comportamiento de desgaste del acero AISI O1 en condiciones de deslizamiento en seco, permitiendo validar los resultados experimentales y ajustar los parámetros de ensayo para replicar entornos de estampado de alta exigencia.

2.1.2 Nivel Nacional

En el trabajo realizado por Diego Giraldo y Juan Miguel Vélez (2002), se llevó a cabo una investigación donde es utilizado el acero O1 como material de contracara en los ensayos de desgaste por deslizamiento en ausencia de lubricación, fue seleccionado por su elevada dureza (45 HRC) y resistencia al desgaste, características importantes en pruebas tribológicas de materiales. En el estudio, se empleó en los discos de la máquina tipo "Pin-on-Disk" para evaluar el comportamiento de polímeros como el HDPE, Nylon y Teflón en ausencia de lubricación durante

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

el deslizamiento. El acero O1 permitió observar los mecanismos de desgaste adhesivo y abrasivo, así como la transferencia de material desde los pines de polímero al disco de acero. Esto confirmó que, al aumentar la rugosidad del disco, se incrementaba la adherencia y el desgaste abrasivo, evidenciando el comportamiento tribológico de los materiales en contacto.

El uso del acero O1 como contraparte en Giraldo y Vélez (2002) justifica su aplicación en los ensayos de este estudio, ya que demuestra su estabilidad y reproducibilidad como superficie de referencia para caracterizar mecanismos de desgaste en contacto seco.

2.2 Referencias Teóricas

Para entender los estudios y métodos que se aplicarán en el desarrollo de este proyecto, así como su ejecución, resulta fundamental establecer algunos conceptos relevantes que conforman la base de la investigación.

2.2.1 Tribología

Según J. Halling (1976), La tribología se define como la ciencia encargada del estudio de las superficies en contacto y su comportamiento bajo movimiento relativo. Su denominación proviene del griego tribos (“frotar” o “desgastar”) y logia (“estudio”), lo que refleja con precisión el objeto central de esta disciplina. Al ser un campo multidisciplinario, integra fundamentos de física, química, ingeniería de materiales y mecánica, permitiendo comprender y manejar los fenómenos que surgen en la interfaz de contacto entre cuerpos sólidos.

Dentro de la tribología, se reconocen tres pilares fundamentales: la fricción, el desgaste y la lubricación, los cuales no deben entenderse de manera aislada, sino como procesos interrelacionados que determinan el desempeño y vida útil de los sistemas mecánicos.

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

La *fricción* corresponde a la resistencia al movimiento que se presenta cuando dos superficies están en contacto. La fricción puede ser estática (cuando las superficies no se mueven) o dinámica (cuando hay movimiento).

El *desgaste*, por su parte, se refiere a la pérdida de material de las superficies en contacto debido a la fricción. Este fenómeno puede provocar fallos prematuros en componentes mecánicos.

Para contrarrestar estos efectos se recurre a la *lubricación*, que consiste en la aplicación de un material (generalmente un líquido) entre las superficies para reducir la fricción y el desgaste. Los lubricantes pueden ser aceites, grasas o incluso sólidos.

La tribología tiene un impacto significativo en varios sectores industriales, y su importancia llega a puntos como la eficiencia energética, en donde, un adecuado control del comportamiento tribológico puede resultar en ahorros significativos de energía. “Se estima que optimizar estos sistemas podría ahorrar hasta el 1.5% del Producto Interno Bruto (PIB) de un país industrializado” (Peña, 2011). Al minimizar el desgaste y mejorar la lubricación, se minimizan los costos vinculados al mantenimiento y a la reposición de partes, también disminuye el impacto ambiental al reducir las emisiones contaminantes generadas por el desgaste y el uso ineficiente de combustibles. La investigación en tribología de igual manera impulsa el desarrollo de nuevos materiales y recubrimientos que mejoran el rendimiento mecánico. Por ejemplo, se han estudiado recubrimientos electro-metalizados que ofrecen propiedades tribológicas superiores, favoreciendo una prolongación de la vida útil de las piezas. (Granizo, 2010)

2.2.2 Desgaste de materiales

Los mecanismos de desgaste son procesos por los cuales las superficies en contacto sufren daño o pérdida de material debido a movimientos relativos entre ellas, como deslizamiento,

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

rodamiento o impacto. Estos procesos involucran la interacción de asperezas en las superficies y dependen de diversas condiciones operativas.

Se reconocen varios tipos de desgaste, siendo más habituales el desgaste adhesivo, abrasivo, por fatiga y corrosivo. En el desgaste adhesivo, las asperezas se adhieren y se separan, causando transferencia de material entre las superficies en contacto. Por otro lado, el desgaste abrasivo tiene lugar cuando partículas duras o una superficie de mayor dureza actúan sobre una más blanda, generando surcos o fracturas. Esta forma de desgaste puede ocurrir en dos modalidades: abrasión de dos cuerpos (superficies desiguales) o de tres cuerpos (partículas intermedias).

Además, el desgaste por fatiga implica la formación de grietas debido a la repetición de cargas en las superficies, lo que eventualmente conduce a la pérdida de grandes fragmentos de material. Finalmente, el desgaste corrosivo ocurre cuando las reacciones químicas entre las superficies y el entorno son aceleradas por la fricción, lo que produce una pérdida de material a través de procesos como la oxidación o la disolución química. (Halling, 1976)

Los factores que influyen en el desgaste incluyen la rugosidad de las superficies, la dureza relativa entre los materiales, la presencia de lubricantes, las condiciones ambientales y las velocidades de deslizamiento o rodamiento.

A lo largo de la historia, varios investigadores han propuesto modelos para describir el comportamiento tribológico de los materiales. Amontons, en el siglo XVII, estableció los principios básicos de la fricción, resaltando su independencia del área aparente de contacto y su proporcionalidad con la carga aplicada. Posteriormente, Bowden y Tabor aportaron una visión más detallada al considerar que la fricción y el desgaste dependen de las interacciones reales en las microasperezas de las superficies en contacto, destacando el papel de la adhesión y la

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

deformación plástica local. Por su parte, Archard propuso un modelo que relaciona directamente el volumen de material desgastado con parámetros como la carga normal, la dureza del material y la distancia de deslizamiento, lo que permitió establecer una base cuantitativa para evaluar la resistencia al desgaste de distintos materiales. (Bowden & Tabor, 2001; Mahmud et al., 2019)

Estos modelos no solo representan avances conceptuales en la tribología, sino que también ofrecen un marco de referencia fundamental para la evaluación de aceros de herramienta. Dado que estos materiales son empleados en condiciones de contacto severo y repetitivo (como corte, estampado o conformado en frío), comprender cómo se manifiestan la fricción y el desgaste en sus superficies resulta esencial para optimizar su desempeño.

2.2.3 Acero AISI O1

El acero AISI O1 es un acero de herramientas para trabajo en frío que destaca por su combinación equilibrada de dureza y tenacidad. Este “es un acero para herramientas de trabajo en frío de baja aleación que debe templarse con aceite durante el tratamiento térmico”; se utiliza en una amplia variedad de herramientas y aplicaciones, entre las que se incluyen “matrices de troquelado, conformado y recorte, calibres, cortadores de corte, punzones, matrices de refuerzo, pasadores de extracción, matrices de laminación de roscas, matrices de doblado, matrices de moldes de plástico, calzas, levas, guías de máquinas, sellos, piezas de máquinas, plantillas, plantillas de corte, matrices de estampación”, entre otros (Otaí Special Steel, 2015). Se detallan a continuación las propiedades físicas y mecánicas en la Tabla 1, así como la composición química en la Tabla 2.

Tabla 1.

Propiedades físicas y mecánicas del acero AISI O1

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

| Módulo de Elasticidad | | Densidad | | Temperatura de temple ⁽¹⁾ | | Dureza ⁽²⁾ | Dureza ⁽³⁾ | Resistencia Impacto ⁽⁴⁾ | | Coefficiente Poisson ⁽⁵⁾ |
|-----------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------------------------|------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|----|-------------------------------------|
| GPa | psi | kg/m ³ | lb/in ³ | °C | °F | BHN | HRC | ft-lb | J | |
| 207 | 30x10 ⁶ | 7850 | 0.283 | 800 | 1475 | 187-221 | Hasta 65 | 30 | 41 | 0.28 |

(1) Tratamiento Térmico: Templado según se indica con revenido a la dureza.

(2) Dureza en estado recocido.

(3) Dureza tras temple y revenido.

(4) Prueba de impacto Entalla Charpy C.

(5) Valores relativos.

Nota. Información tomada de *Servicio Industrial S.A. de C.V.* (2012)

Tabla 2.

Composición química del acero AISI O1

| C | Mn | Si | Cr | W |
|------|------|------|------|------|
| 0.95 | 1.25 | 0.30 | 0.50 | 0.50 |

Nota. Información tomada de *Servicio Industrial S.A. de C.V.* (2012)

2.2.4 Carburo de Tungsteno YG6

El carburo de tungsteno YG6 es un material compuesto de carburo cementado que pertenece a la familia de aleaciones tungsteno-cobalto (WC-Co), caracterizado por su excepcional combinación de alta dureza, resistencia al desgaste y tenacidad. Este material se fabrica mediante procesos pulvimetalúrgicos a partir de carburo de tungsteno (WC) y cobalto (Co) como aglutinante metálico, con una composición típica de aproximadamente 94% WC y 6% Co. Es ampliamente empleado en la industria para aplicaciones que demandan elevada resistencia al desgaste y capacidad de corte en materiales duros, incluyendo herramientas de corte, matrices de conformado, brocas de perforación, componentes de minería, insertos para herramientas de torneado y fresado, matrices de estampación en frío, machos y terrajas, componentes resistentes al desgaste", entre

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

otras aplicaciones especializadas. Sus propiedades físicas y mecánicas se detallan en la Tabla 3.

(Wolfram Carbide, 2025)

Tabla 3.

Propiedades físicas y mecánicas del Carburo de Tungsteno YG6

| Módulo de Elasticidad | | Densidad | | Dureza ⁽¹⁾ | Resistencia Impacto ⁽²⁾ | | Coefficiente Poisson ⁽³⁾ |
|-----------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------------|-----|-------------------------------------|
| GPa | psi | g/cm ³ | lb/in ³ | HRA | ft-lb | J | |
| 530 - 700 | 76.9 - 101.5×10 ⁶ | 14.6 -15 | 0.527- 0.542 | 89.5 - 92.0 | 1.9 | 2.6 | 0.24 – 0.31 |

(1) Dureza medida a temperatura ambiente según normas ISO 3738 y GB/T 7997-2014.

(2) Resistencia al impacto según norma ASTM E23.

(3) Valores reportados en diferentes fuentes técnicas.

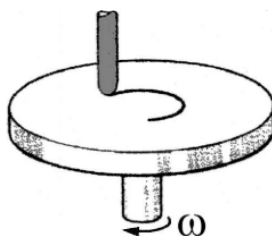
Nota. Información tomada de *Wolfram Carbide (2025)*

2.2.5 Ensayo Pin-on-Disk

Una máquina Pin-on-Disk es un equipo destinado a estudiar el desgaste y la fricción entre materiales en contacto mecánico. El ensayo consiste en ejercer una carga determinada sobre un perno fijo, que se presiona contra la superficie de un disco en rotación. A medida que el disco gira, el contacto continuo entre el perno y el disco genera fricción, lo que resulta en la pérdida gradual de material en ambas superficies, permitiendo así la medición de la tasa de desgaste y el comportamiento tribológico del sistema. (Giraldo & Vélez, 2002)

Figura 1.

Esquema que muestra el ensayo desgaste tipo pin-on-disk.



Nota. Tomado de *Estudio del desgaste por deslizamiento en seco en un equipo “Pin-on-disk”,* por C. Pérez, (1999).

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

3. Metodología

El diseño experimental se estructuró con el propósito de evaluar la influencia de la carga normal aplicada y la velocidad de rotación del disco sobre el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste del acero AISI O1 bajo condiciones de contacto seco. La selección de los rangos de ensayo se fundamentó tanto en las limitaciones operativas de la máquina de ensayos como en la literatura previa que reporta estudios tribológicos en aceros para herramientas endurecidos.

3.1 Materiales y equipos

3.1.1 Materiales

Se emplearon discos de acero AISI O1 con un diámetro de 71,3 mm y un espesor de 7 mm. Para el contacto deslizante se utilizaron pines esféricos de carburo de tungsteno (YG6) con diferentes diámetros. Estos materiales se seleccionaron por su disponibilidad y propiedades mecánicas adecuadas.

Figura 2.

Probeta de acero AISI O1 empleada en el ensayo Pin-on-Disk.

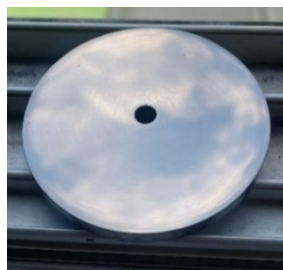


Figura 3.

Pines esféricos de carburo de tungsteno YG6 empleados en el ensayo Pin-on-Disk.



CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

3.1.2 Equipos

3.1.2.1 Maquina de ensayos (UMT TriboLab)

La UMT TriboLab es un equipo diseñado para realizar pruebas de desgaste y fricción bajo diferentes configuraciones de contacto. En este estudio se empleó en modo Pin-on-Disk, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM G99, lo que permitió simular condiciones controladas de deslizamiento en seco. El sistema cuenta con control preciso de la carga aplicada, la velocidad de rotación y el registro continuo del coeficiente de fricción, garantizando mediciones confiables y repetibles (García Muñoz, 2017; González & Meneses, 2018).

Figura 4.

Equipo UMT TriboLab empleado para la ejecución de los ensayos de desgaste.



3.1.2.2 Balanza analítica

La balanza analítica es un instrumento de alta precisión que permite medir la masa de un objeto con resolución de miligramos. En este trabajo se empleó para registrar la masa de las probetas antes y después de los ensayos, con el objetivo de calcular la pérdida de material y la tasa de desgaste. Su uso es clave para obtener datos precisos y reducir errores en los cálculos. (García Muñoz, 2017; González & Meneses, 2018).

Figura 5.

Balanza analítica para medición de masa.

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO



Nota. Tomado de VETO (s.f.) [Imagen]

3.1.2.3 Microscopio óptico

El microscopio óptico es una herramienta que permite ampliar la imagen de una superficie mediante el uso de lentes, facilitando la observación de detalles que no son visibles a simple vista. En esta investigación se empleó para examinar las superficies desgastadas de las probetas, identificar patrones de deterioro y clasificar los mecanismos de desgaste presentes, tales como abrasión, adhesión u oxidación. Esta observación complementa los datos cuantitativos obtenidos durante los ensayos (García Muñoz, 2017; González & Meneses, 2018). Adicionalmente, en este mismo equipo se realizaron las mediciones de dureza Vickers (HV), ya que el microscopio contaba con un durómetro integrado que permitió llevar a cabo dichas pruebas de manera precisa y en las mismas condiciones de observación de las superficies.

Figura 6.

Microdurómetro innovatest Falcon 400G2



CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

3.2 Preparación de muestras

Para preparar las probetas, primero se realizó un rectificado en una rectificadora, con el fin de eliminar cualquier deformación o irregularidad en la cara que estaría en contacto con la máquina de ensayo. Esto es importante porque la planitud de la superficie es un requisito experimental para evitar sesgos en los resultados. Después, se verificó y corrigió el paralelismo de cada probeta para asegurar que sus dos caras estuvieran en el mismo plano.

Una vez asegurada la geometría, se procedió a acondicionar la superficie de contacto. Dado que una rugosidad excesiva puede modificar el comportamiento de fricción y desgaste, se llevó a cabo un lijado progresivo con papel abrasivo de carburo de silicio, comenzando en grano 120 y aumentando de manera gradual hasta alcanzar un grano 1200, asegurando que la rugosidad inicial no afecte de forma significativa los resultados

3.3 Variables y justificación de rangos

La máquina UMT TriboLab utilizada en los ensayos tiene una capacidad máxima de 50 N, aunque en el laboratorio estaba limitada a 45 N, lo que determinó el rango superior de cargas empleadas (Bruker Corporation, n.d.). En consecuencia, se definieron tres niveles de carga: 10 N, 20 N y 30 N, valores que permiten simular condiciones de contacto moderadas a severas sobre superficies metálicas.

En cuanto a la velocidad de rotación, se estableció un rango entre 200 y 500 rpm, siguiendo tanto la capacidad de la máquina como la práctica experimental reportada en estudios tribológicos previos con aceros AISI O1 y D3, donde se utilizaron rangos equivalentes (Singh et al., 2016). Este intervalo permite observar el efecto de la velocidad en el coeficiente de fricción y en la transición entre regímenes de desgaste leve y severo.

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

La elección de diferentes diámetros de pin (2 mm y 6,35 mm) atiende a la necesidad de modificar el área de contacto y, por ende, la presión de contacto según Hertz. Estudios previos han demostrado que el diámetro del pin es un factor crítico en la distribución de esfuerzos y en los mecanismos de desgaste observados (Fischer-Cripps, 1999). Las condiciones experimentales de los ensayos se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4.

Condiciones experimentales de los ensayos Pin-on-Disk.

| Diámetro del pin (mm) | Carga (N) | Velocidades (rpm) |
|------------------------------|------------------|--------------------------|
| 2,0 | 10, 20, 30 | 200, 500 |
| 6,35 | 10, 20, 30 | 200, 500 |

Nota. Cada configuración experimental fue realizada bajo condiciones de contacto seco sin lubricación. Los ensayos siguieron la metodología establecida en la norma *ASTM G99* para ensayos de desgaste Pin-on-Disk.

3.3.1 Duración del ensayo

Cada prueba se realizó con una duración fija de 10 minutos, manteniendo constante la combinación de parámetros seleccionada en cada caso. Esta decisión se tomó para garantizar que la distancia de deslizamiento fuera suficiente para obtener resultados representativos del comportamiento tribológico.

Cabe señalar que, aunque se siguió el procedimiento definido por la norma *ASTM G99*, los parámetros de carga, velocidad y tiempo aplicados en este estudio difieren de los valores estándar, por lo cual los resultados deben considerarse como obtenidos *siguiendo el procedimiento de la norma ASTM G99* y no como equivalentes a un ensayo estandarizado *ASTM G99* (*ASTM G99-17*, 2017).

3.4 Modelos de contacto y desgaste

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

3.4.1 *Calculo de la presión de contacto*

Para el análisis del contacto entre superficies se empleó la teoría de Hertz, la cual permite estimar la presión de contacto generada cuando un cuerpo esférico se encuentra en contacto con una superficie plana.

La Ecuación (1) permite calcular el radio de contacto a :

$$a = \left(\frac{3WR}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

donde:

a = radio de contacto (m),

W = carga aplicada (N),

R = radio de la bola (m),

E^* = módulo de Young efectivo (Pa).

El módulo de Young efectivo se determina según:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (2)$$

- E_1, E_2 = módulos de Young del disco y la bola respectivamente (Pa),
- ν_1, ν_2 = coeficientes de Poisson del disco y la bola respectivamente.

La presión de contacto nominal P_m puede obtenerse como:

$$P_m = \frac{W}{\pi a^2} \quad (3)$$

Este modelo resulta esencial, ya que permite relacionar la carga normal aplicada y la geometría de los cuerpos en contacto con la presión efectiva que experimenta la superficie (Mahmud et al., 2019).

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Con las expresiones presentadas, es posible estimar la presión de contacto en la configuración experimental de este estudio. A partir de los parámetros geométricos del pin y del disco, así como de las propiedades mecánicas del acero AISI O1 y de la carga aplicada en los ensayos, se procede a calcular el radio de contacto, el módulo de Young efectivo y, finalmente, la presión de contacto nominal.

Se calcula el módulo de Young efectivo con la ecuación (2) tomando el promedio del Coeficiente Poisson y el módulo de Young del carburo de tungsteno mencionado en la tabla 3.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} = \frac{1-0,28^2}{207 \times 10^{11}} + \frac{1-0,28^2}{615 \times 10^{11}}$$

$$E^* = 1,68047 \times 10^{13} \text{ (pa)}$$

Con el módulo de Young efectivo se calcula el radio de contacto a usando la ecuación 1.

$$a = \left(\frac{3WR}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{3(10)(0.002)}{4(1,68047 \times 10^{13})} \right)^{\frac{1}{3}} = 9,62838 \times 10^{-6} \text{ (m)}$$

Habiendo calculado el radio de contacto, se puede calcular la presión de contacto nominal P_m usando la ecuación 3.

$$P_m = \frac{W}{\pi a^2} = \frac{10}{\pi(9,62838 \times 10^{-6})^2} = 34335502395 = 34,3355 \text{ (Gpa)}$$

Los resultados correspondientes a las demás configuraciones de carga y radio de bola analizadas en el estudio se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5.

Radio de contacto y presión de contacto nominal para las diferentes configuraciones.

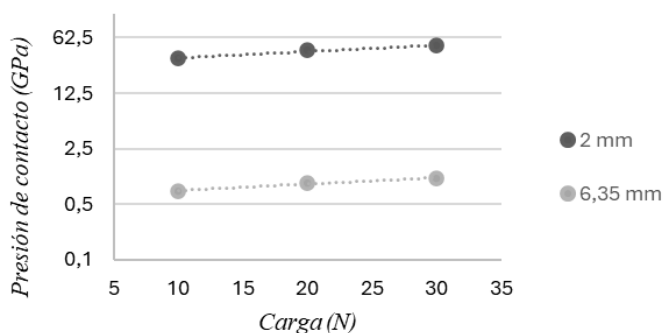
| <i>Diámetros (m)</i> | <i>carga aplicada (N)</i> | <i>Radio de contacto a (m)</i> | <i>presión de Contacto Pm (Gpa)</i> |
|--------------------------|-------------------------------|------------------------------------|---|
| 0,002 | 10 | 9,628E-06 | 34,34 |
| | 20 | 1,213E-05 | 43,26 |
| | 30 | 1,389E-05 | 49,52 |
| 0,635 | 10 | 6,569E-05 | 0,74 |
| | 20 | 8,276E-05 | 0,93 |
| | 30 | 9,473E-05 | 1,06 |

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Nota. Cálculos realizados aplicando las ecuaciones de contacto hertziano para geometría esfera-plano, utilizando módulo de Young y coeficiente de Poisson de ambos materiales.

Figura 7.

Presión de contacto nominal en diferentes configuraciones.



3.4.2 Cálculo de la tasa y factor de desgaste

En cuanto al cálculo del factor de desgaste, el modelo más utilizado es la ley de Archard, que relaciona el volumen de material perdido con la carga aplicada, la dureza del material y la distancia de deslizamiento. La expresión general se presenta en la Ecuación (4):

$$V_{loss} = k * \left(\frac{W L}{H} \right) \quad (4)$$

donde:

- V_{loss} = volumen de material perdido (mm^3),
- K = factor de desgaste adimensional / Tasa de desgaste específica,
- W = carga normal aplicada (N),
- L = distancia de deslizamiento (m),
- H = dureza del material (Pa).

Este modelo establece que el desgaste es proporcional a la carga y a la distancia recorrida, e inversamente proporcional a la dureza del material. (Mahmud et al., 2019)

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Para ello, la pérdida de masa de las probetas (m_{loss}) fue determinada a partir de mediciones con la balanza analítica antes y después de los ensayos. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 6 para el pin de 2 mm.

Tabla 6.

Mediciones de pérdida de masa para los ensayos con el pin de 2 mm.

| 2 mm | 200 RPM | | | 500 RPM | | |
|------|------------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|
| | Peso Inicial (g) | Peso Final (g) | Diferencia (g) | Peso Inicial (g) | Peso Final (g) | Diferencia (g) |
| 10N | 196,0719 | 196,0625 | 0,0094 | 195,9841 | 195,9405 | 0,0436 |
| 20N | 196,0586 | 196,0359 | 0,0227 | 195,7653 | 195,7262 | 0,1064 |
| 30N | 196,0334 | 195,9848 | 0,0486 | 195,6982 | 195,6365 | 0,1794 |

Nota. Mediciones realizadas con balanza analítica antes y después de completar la distancia de deslizamiento establecida en cada ensayo.

Los resultados obtenidos de pérdida de masa para el pin de 6,35mm se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7.

Mediciones de pérdida de masa para los ensayos con el pin de 6,35 mm.

| 6,35 mm | 200 RPM | | | 500 RPM | | |
|---------|------------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|
| | Peso Inicial (g) | Peso Final (g) | Diferencia (g) | Peso Inicial (g) | Peso Final (g) | Diferencia (g) |
| 10N | 203,5665 | 203,5584 | 0,0076 | 203,5576 | 203,5229 | 0,0347 |
| 20N | 203,5349 | 203,516 | 0,0189 | 203,5188 | 203,4361 | 0,0827 |
| 30N | 201,8974 | 201,8707 | 0,0395 | 201,8707 | 201,7268 | 0,1439 |

Nota. Mediciones realizadas con balanza analítica antes y después de completar la distancia de deslizamiento establecida en cada ensayo

Posteriormente, dicha pérdida se transformó en volumen de material perdido (V_{loss}) mediante la relación:

$$V_{loss} = \frac{m_{loss}}{\rho} \quad (5)$$

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

donde:

- m_{loss} = pérdida de masa (Kg),
- ρ = densidad del material (Kg/m³),

Tomando los valores de masa iniciales y finales para la configuración de 200 rpm a 10N con el pin de 2 mm y el valor de densidad del acero O1 presentado en la tabla 1, Se obtiene lo siguiente.

$$V_{loss} = \frac{(196,0719 - 196,0625)}{7850 * 1000} = 1,1975 \times 10^{-9} m^3$$

Por otra parte, la distancia de deslizamiento L se determinó relacionando el radio desde el eje del disco hasta el punto de contacto del pin con el número de revoluciones del pin.

$$L = 2\pi * r * RPM * t \quad (6)$$

donde:

- r = radio desde el eje del disco hasta el punto de contacto del pin (m),
- t = Tiempo de duración del ensayo (min),

Tomando el radio desde el eje del disco hasta el punto de contacto del pin para la configuración de 200 rpm a 10N con el pin de 2 mm se tiene:

$$L = 2\pi * r * RPM * t = 2\pi * (0,01464) * (200) * (10) = 183,97 (m)$$

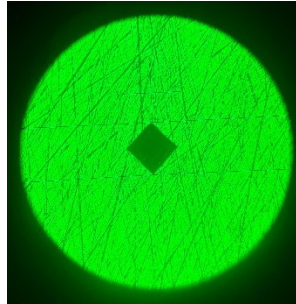
Adicional, previo al inicio de los ensayos tribológicos, se efectuó una prueba de dureza Vickers al material con el fin de determinar su dureza experimental bajo las condiciones reales de estudio. Este procedimiento permitió establecer una referencia inicial y contrastar los valores obtenidos con la dureza teórica reportada en la literatura para el acero AISI O1, garantizando así la verificación de sus propiedades mecánicas antes de someterlo a las pruebas de desgaste.

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Para esta determinación se emplearon tres discos, sobre los cuales se realizó una medición por muestra, obteniéndose valores de 676.6 HV, 674.4 HV y 675.5 HV. A partir de estos resultados se calculó una dureza promedio de 675.5 HV.

Figura 8.

Huella generada por la prueba de dureza Vickers observada mediante microscopio óptico.



Nota. La micrografía muestra la huella Vickers obtenida a 2,5 kg de carga, observada con microscopio óptico a 10× de aumento.

La dureza Vickers, expresada originalmente en kgf/mm², puede convertirse a unidades del Sistema Internacional mediante la relación:

$$\sigma(MPa) \approx HV \times 9.807 \quad (7)$$

De esta manera, el promedio de 675.5 HV equivale a 6,625 Gpa, valor que se adoptó como referencia inicial de la dureza del material antes de los ensayos tribológicos. (Struers, n.d.)

Finalmente, la tasa de desgaste específica (k) se obtuvo de la ecuación 4:

$$k = \frac{V_{loss} * H}{(W \cdot L)} = \frac{1,1975 \times 10^{-9} * 6,62 \times 10^6}{(10 \cdot 183,97)} = 4,3119 \times 10^{-3}$$

Este modelo permite cuantificar la resistencia al desgaste del acero AISI O1 bajo condiciones de deslizamiento en seco, correlacionando la pérdida volumétrica de material con la carga aplicada y la distancia de recorrido. (Mahmud et al., 2019)

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

De igual manera, se pudo obtener la tasa de desgaste volumétrico por unidad de distancia, relacionando el volumen de material perdido (V_{loss}) con la distancia recorrida (L), resultando en:

$$k_v = \frac{V_{loss}}{L} \quad (8)$$

Tomando los valores de volumen de material perdido (V_{loss}) y distancia recorrida (L) para la configuración de 200 rpm a 10N con el pin de 2 mm se tiene:

$$k_v = \frac{V_{loss}}{L} = \frac{1,1975 \times 10^{-9}}{183,97} = 6,5089 \times 10^{-12} \left(\frac{m^3}{m} \right)$$

Seguidamente, en la Tabla 8, se presentan los resultados correspondientes a las demás configuraciones de carga, radio de bola y velocidad de rotación evaluadas en el estudio.

Tabla 8.

Volumen de material perdido, coeficiente de desgaste y tasa de desgaste para las diferentes configuraciones

| <i>2 mm</i> | 10N - 200Rpm | 20N - 200Rpm | 30N - 200Rpm | 10N - 500Rpm | 20N - 500Rpm | 30N - 500Rpm |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $V_{loss} (m^3)$ | 1,20E-09 | 2,89E-09 | 6,19E-09 | 5,55E-09 | 1,36E-08 | 2,29E-08 |
| k | 4,31E-03 | 4,41E-03 | 4,71E-03 | 4,63E-03 | 4,93E-03 | 5,05E-03 |
| $k_v \left(\frac{m^3}{m} \right)$ | 6,51E-12 | 1,33E-11 | 2,13E-11 | 6,99E-12 | 1,49E-11 | 2,29E-11 |
| <i>6,35 mm</i> | 10N - 200Rpm | 20N - 200Rpm | 30N - 200Rpm | 10N - 500Rpm | 20N - 500Rpm | 30N - 500Rpm |
| $V_{loss} (m^3)$ | 9,68E-10 | 2,41E-09 | 5,03E-09 | 4,42E-09 | 1,05E-08 | 1,83E-08 |
| k | 3,49E-03 | 3,67E-03 | 3,83E-03 | 3,68E-03 | 3,83E-03 | 4,05E-03 |
| $k_v \left(\frac{m^3}{m} \right)$ | 5,26E-12 | 1,11E-11 | 1,73E-11 | 5,56E-12 | 1,16E-11 | 1,83E-11 |

Nota. Los valores de pérdida volumétrica V_{loss} , coeficiente de desgaste k y tasa de desgaste volumétrico k_v fueron calculados a partir de la pérdida de masa medida con balanza analítica y la densidad del acero AISI O1, siguiendo el modelo de Archard.

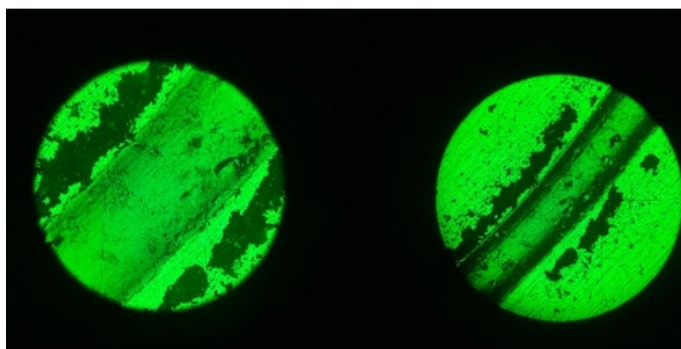
3.5 Análisis de superficies desgastadas

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Finalizados los ensayos tribológicos, las superficies de contacto de los discos fueron examinadas utilizando un microscopio óptico con el fin de caracterizar la morfología del desgaste. Este análisis permitió identificar mecanismos predominantes como abrasión, adhesión, formación de capas triboquímicas o deformación plástica, y correlacionarlos con las condiciones de carga y velocidad aplicadas durante los ensayos. La observación detallada de las huellas facilitó la comprensión de los cambios microestructurales inducidos por el deslizamiento en seco y permitió establecer relaciones entre la morfología superficial y la tasa de desgaste cuantificada.

Figura 9.

Micrografía óptica representativa de la superficie desgastada del acero AISI O1.



Nota. Micrografía óptica representativa de la superficie desgastada del disco de acero AISI O1 tras los ensayos tribológicos, utilizada para ilustrar los mecanismos de desgaste observados.

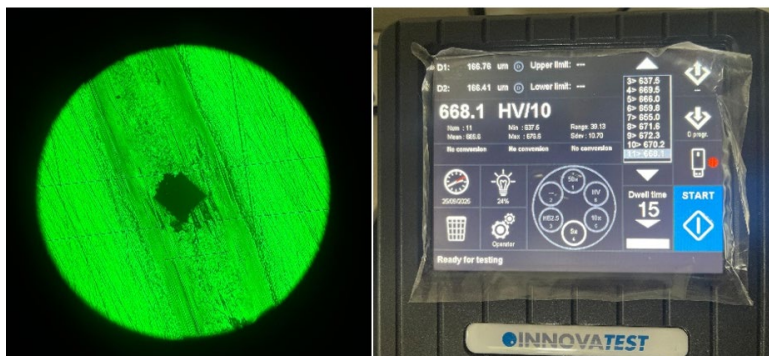
3.6 Análisis de dureza superficial

Con el fin de evaluar la variación en las propiedades mecánicas del acero AISI O1 después de los ensayos tribológicos, se realizaron mediciones de dureza Vickers sobre las superficies desgastadas y no desgastadas de las probetas. Estas mediciones fueron comparadas con la dureza inicial determinada antes de los ensayos, lo que permitió establecer el efecto del contacto en seco sobre la resistencia superficial del material.

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Figura 10.

Huella representativa de la prueba de dureza Vickers en el acero AISI O1.



Nota. Imagen representativa de la prueba de dureza Vickers realizada sobre la huella de desgaste del acero AISI O1; a la izquierda se observa la indentación con iluminación verde y a la derecha la pantalla del durómetro indicando el valor medido.

4. Análisis de Resultados

En esta sección se exponen y analizan los resultados de los ensayos tribológicos con acero AISI O1 bajo condiciones de contacto seco. El análisis se estructura en cinco apartados, que abarcan desde la evolución del coeficiente de fricción a lo largo del tiempo hasta la caracterización micrográfica de los mecanismos de desgaste y análisis de lo cambio de la dureza del material.

4.1 Comportamiento del coeficiente de fricción en función del tiempo

Para evaluar la evolución de la fricción durante el ensayo, se obtuvieron las curvas de coeficiente de fricción (μ) frente al tiempo para cada combinación de microestructura, carga y tamaño de abrasivo. En estas gráficas se distinguen dos fases principales:

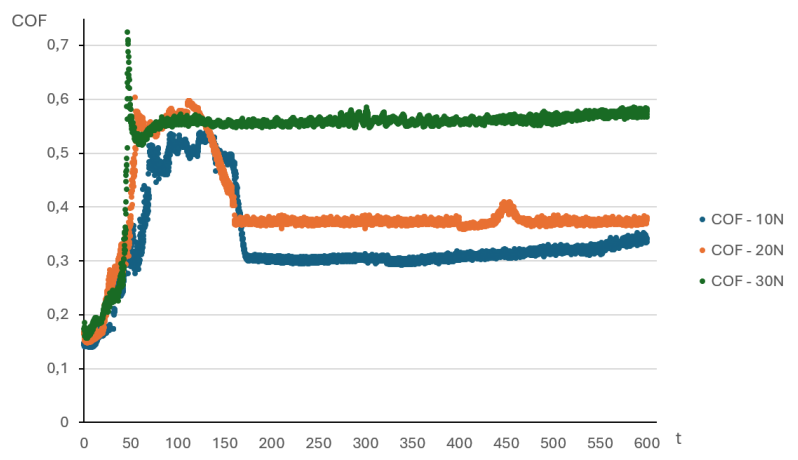
- *Fase de rodaje:* incremento inicial de μ hasta alcanzar una meseta, asociado a la adaptación superficial entre pin y disco.
- *Estado estacionario:* valores promedio de μ una vez estabilizado el contacto, donde se mantiene la influencia constante de las variables operativas.

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

La Figura 11 presenta cómo varía el coeficiente de fricción (μ) con el tiempo en ensayos realizados con un pin de 2 mm de diámetro a 200 rpm, aplicando cargas de 10 N, 20 N y 30 N. De este modo se analiza el efecto de la presión de contacto sin modificar la geometría del pin ni la velocidad de deslizamiento. Se observa claramente la fase de rodaje en los primeros minutos, en la que μ aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor estable, seguido del estado estacionario donde las fluctuaciones son mínimas.

Figura 11.

Coeficiente de fricción vs. tiempo (10–30 N, pin 2 mm, 200 rpm).



Los resultados indican que aumentar la carga normal de 10 N a 30 N genera un aumento más pronunciado del coeficiente de fricción en la fase de rodaje, evidenciado por una mayor pendiente en la rampa inicial. Asimismo, se observa un incremento en el valor máximo alcanzado por μ , con 0,5438 a 10 N ($t = 131,5$ s), 0,6034 a 20 N ($t = 54,9$ s) y 0,7253 a 30 N ($t = 46,4$ s).

También se observa que a mayores cargas, la fase parabólica inversa resulta más breve, de modo que a 30 N la curva alcanza su máximo y decae hacia el estado estacionario alrededor de 86 s, mientras que a 20 N ocurre a ≈ 160 s y a 10 N a ≈ 180 s.

En el estado estacionario, se aprecia que el coeficiente de fricción es menor a bajas cargas ($\mu \approx 0,30$ a 10 N) y mayor a cargas elevadas ($\mu \approx 0,57$ a 30 N), acompañado de una ligera tendencia

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

ascendente conforme avanza el ensayo, esto sugiere un aumento progresivo de la rugosidad superficial o la acumulación de restos de desgaste. En conjunto, estos comportamientos indican que, aun con geometría de contacto y velocidad constantes, la presión de contacto modula tanto la tasa de incremento inicial de μ como su valor en equilibrio, reflejando fenómenos asociados al endurecimiento por trabajo y a la evolución del par de fricción en el tiempo.

4.2 Presión de contacto y su relación con la fricción

En este apartado se correlacionan los valores de presión de contacto calculada para cada configuración experimental con el coeficiente de fricción estacionario (μ_{est}) obtenido en la fase estable del ensayo. El objetivo es determinar si existe una dependencia sistemática de μ_{est} respecto a la presión de contacto. Esta relación se muestra a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9.

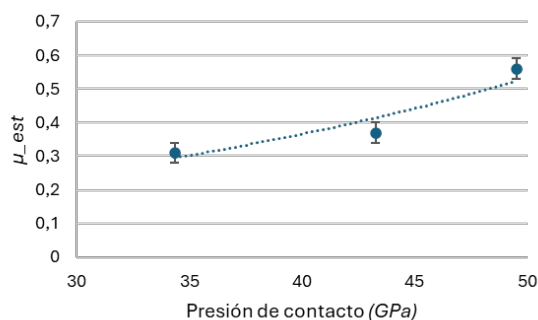
Presión de contacto vs. μ_{est}

| Configuración | Carga (N) | presión de contacto (Gpa) | μ estacionario |
|------------------|-----------|---------------------------|--------------------|
| Pin 2 mm 200 rpm | 10 | 34,34 | 0,31 \pm 0,02 |
| Pin 2 mm 200 rpm | 20 | 43,26 | 0,37 \pm 0,02 |
| Pin 2 mm 200 rpm | 30 | 49,52 | 0,56 \pm 0,02 |

Nota. El coeficiente de fricción estacionario (μ_{est}) corresponde al valor promedio de la fase estable de cada ensayo, con su desviación estándar indicada.

Figura 12.

Coefficiente de fricción estacionario vs. presión de contacto.



CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

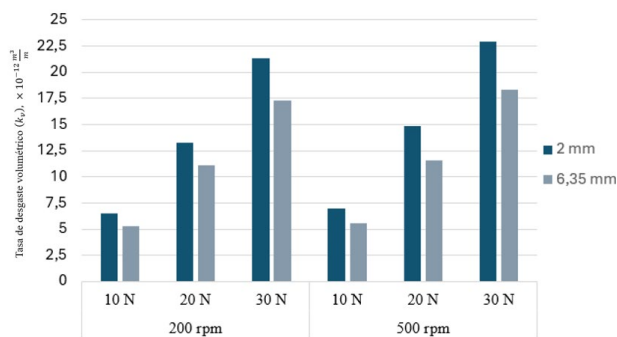
Los valores de μ estacionario muestran un incremento notable con la presión de contacto: a 34,34 GPa (10 N) $\mu = 0,31 \pm 0,02$, a 43,26 GPa (20 N) $\mu = 0,37 \pm 0,02$ y a 49,52 GPa (30 N) $\mu = 0,56 \pm 0,02$. Esta tendencia indica que, al aumentar la presión de contacto, el coeficiente de fricción estacionario se eleva de forma casi lineal, reflejando un mayor acoplamiento superficial y posible intensificación de los procesos de deformación plástica en la interfase pin–disco.

4.3 Tasa de desgaste y coeficiente de desgaste

En este apartado se evalúa el material removido durante los ensayos y se cuantifica el desgaste del disco mediante la tasa de desgaste volumétrica y el coeficiente de desgaste, con el fin de comparar el rendimiento de las distintas configuraciones de carga y velocidad. La Figura 13 presenta la tasa de desgaste, mientras que la Figura 14 muestra el coeficiente de desgaste.

Figura 13.

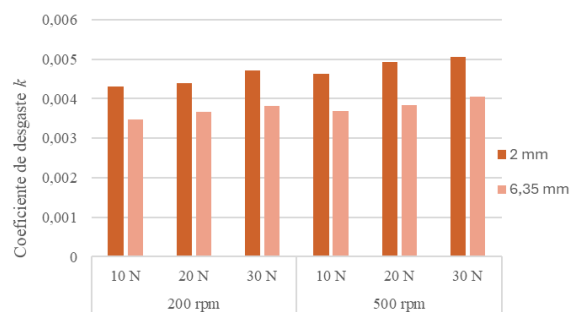
Tasa de desgaste k_v para las diferentes configuraciones.



Nota. Barras que representan la tasa de desgaste volumétrico k_v ($\times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{m}$) para pines de 2 mm y 6,35 mm bajo distintas combinaciones de carga y velocidad.

Figura 14.

Coefficiente de desgaste k para las diferentes configuraciones.



Nota. Barras que muestran el coeficiente de desgaste k para pines de 2 mm y 6,35 mm bajo distintas combinaciones de carga y velocidad.

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

El análisis del coeficiente de desgaste (k) evidencia que el diámetro del pin ejerce una influencia directa en el comportamiento tribológico. En todas las configuraciones evaluadas, el pin de 2 mm registró valores de k superiores a los del pin de 6,35 mm, lo que confirma el efecto de la mayor presión de contacto asociada a un menor radio. Asimismo, el incremento de la carga de 10 N a 30 N produjo un aumento progresivo del coeficiente, más notorio en el pin pequeño, mientras que la variación de la velocidad de 200 a 500 rpm generó un crecimiento adicional cercano al 7–8 %, independientemente del diámetro del pin.

De manera coherente, la tasa de desgaste volumétrico k_v presentó una tendencia semejante. El pin de menor diámetro alcanzó siempre mayores valores de k_v , confirmando que la presión de contacto es un factor crítico en la pérdida de material. Al aumentar la carga de 10 a 30 N, se observó un incremento significativo de la tasa, mientras que la variación de velocidad de 200 a 500 rpm provocó prácticamente una duplicación de los valores en todas las condiciones. Esto evidencia que los efectos combinados de carga y velocidad intensifican los mecanismos de desgaste.

En conjunto, los resultados muestran que el diámetro del pin y la velocidad de deslizamiento son variables determinantes en el comportamiento tribológico del acero AISI O1. El pin de 2 mm, al generar una presión de contacto más elevada, presentó coeficientes y tasas de desgaste aproximadamente un 20–30 % superiores. Por su parte, el aumento de la velocidad acentuó el desgaste en un rango similar, lo que pone de manifiesto la relevancia tanto de los efectos mecánicos como térmicos en condiciones de mayor exigencia.

4.4 Caracterización Microestructural

La caracterización microestructural de las superficies desgastadas permite identificar los mecanismos de desgaste que actuaron durante los ensayos Pin-on-Disk. Mediante micrografías ópticas y electrónicas se presentan las evidencias más representativas, describiendo las principales

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

transformaciones en la superficie y relacionándolas con los resultados de fricción y tasa de desgaste.

Figura 15.

Imagen general del disco después del ensayo.

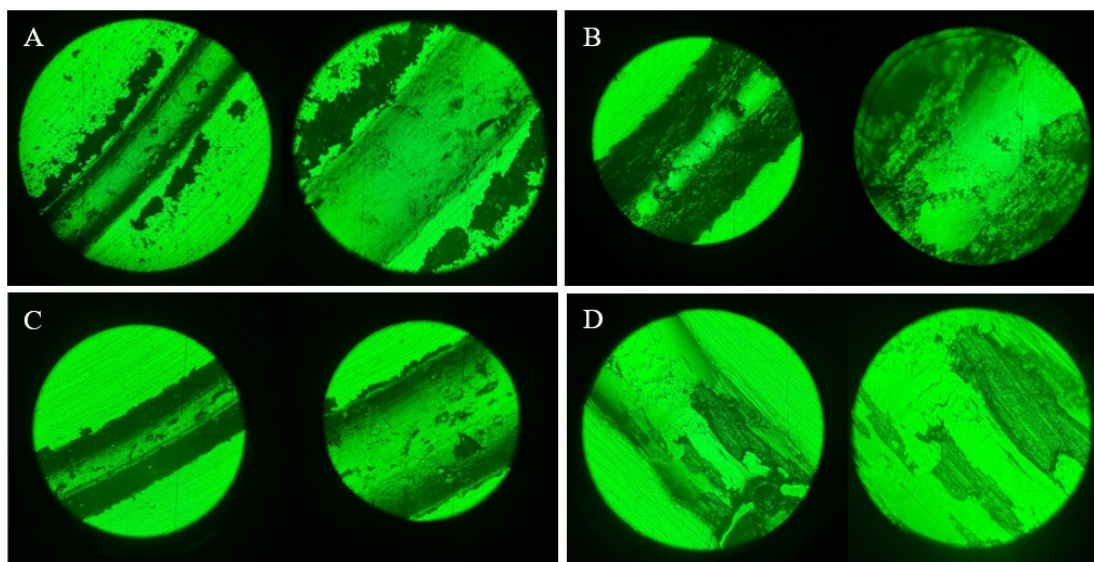


Nota. Imagen del disco de acero AISI O1 tras completar los ensayos tribológicos en seco, donde se observan las pistas de desgaste correspondientes a las pasadas del pin.

En la Figura 16 se presentan las huellas de desgaste obtenidas para el pin de 2 mm bajo distintas condiciones de carga y velocidad.

Figura 16.

Micrografías ópticas de las huellas de desgaste obtenidas con pin de 2 mm: (A) 10 N – 200 rpm, (B) 30 N – 200 rpm, (C) 10 N – 500 rpm y (D) 30 N – 500 rpm.



CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Nota. Huellas de desgaste obtenidas con pin de 2 mm tras ensayos en seco; las imágenes A–D corresponden a las combinaciones de carga y velocidad indicadas, mostrando la evolución de los mecanismos de desgaste.

A continuación, se describen los cambios en la morfología de las huellas de desgaste del disco de acero AISI O1 bajo las distintas condiciones de carga y velocidad aplicadas en los ensayos Pin-on-Disk:

A baja carga y velocidad (Fig. 16A), la pista de desgaste mantiene un trazo relativamente uniforme, con surcos paralelos al sentido de deslizamiento y algunas acumulaciones de material en los bordes, lo que indica un predominio de la abrasión leve con adhesión localizada.

Al incrementar la carga a 30 N (Fig. 16B), la pista se observa más ancha y heterogénea, con acumulaciones de material y zonas rugosas asociadas al desprendimiento de partículas, reflejando acción combinada de abrasión y adhesión, junto con oxidación superficial incipiente por mayor deformación plástica.

Con aumento de la velocidad a 500 rpm y 10 N (Fig. 16C), la pista conserva un trazo definido, pero con surcos más marcados y abundante presencia de partículas desprendidas, señal de desgaste abrasivo intensificado por el deslizamiento rápido.

En la condición más exigente (30 N – 500 rpm, Fig. 16D), la pista aparece ampliamente deteriorada, con irregularidades, acumulaciones de material y fragmentación superficial.

Además, se distinguen regiones con distinta tonalidad que sugieren la formación y desprendimiento intermitente de capas triboquímicas oxidadas. El mecanismo predominante en esta condición es un desgaste mixto abrasivo–adhesivo–oxidativo, que concuerda con los valores más altos de coeficiente de fricción y coeficiente de desgaste medidos experimentalmente.

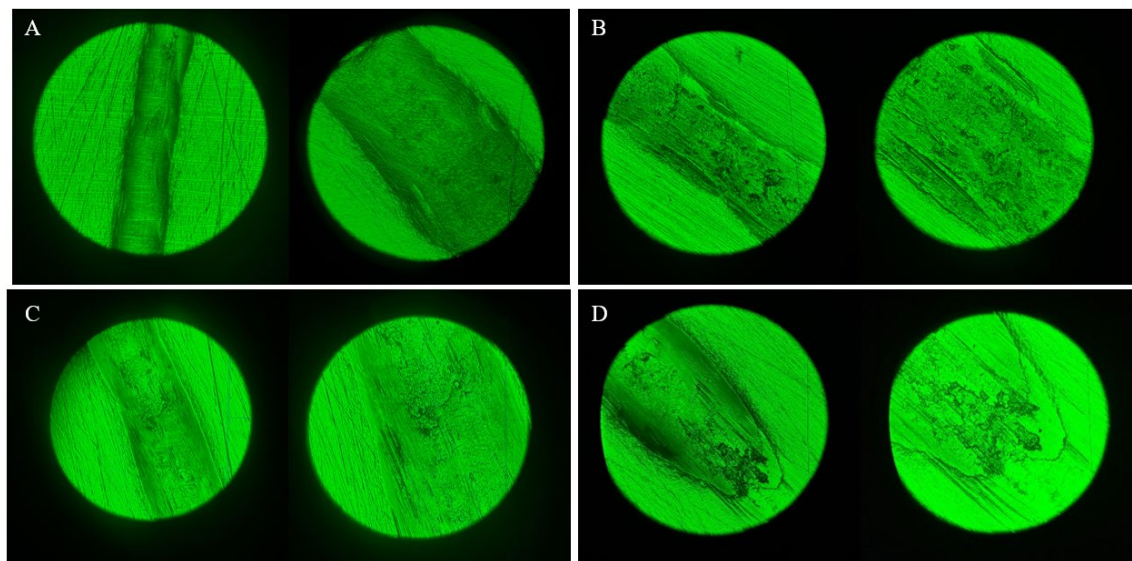
CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

En conjunto, estas observaciones evidencian una clara evolución del mecanismo de desgaste con el incremento de la carga y la velocidad: desde una abrasión leve en condiciones suaves hasta un desgaste mixto abrasivo–adhesivo–oxidativo en las condiciones más severas. Dichos cambios son consistentes con los mayores valores de coeficiente de fricción y coeficiente de desgaste registrados para este diámetro de pin.

En la Figura 17 se presentan las huellas de desgaste obtenidas para el pin de 6,35 mm bajo distintas condiciones de carga y velocidad.

Figura 17.

Micrografías ópticas de las huellas de desgaste obtenidas con pin de 6,35 mm: (A) 10 N – 200 rpm, (B) 30 N – 200 rpm, (C) 10 N – 500 rpm y (D) 30 N – 500 rpm.



Nota. Huellas de desgaste obtenidas con pin de 6,35 mm tras ensayos en seco; las imágenes A–D corresponden a las combinaciones de carga y velocidad indicadas, mostrando la evolución de los mecanismos de desgaste.

En la Fig. 17(A) la pista muestra un trazo bien definido y relativamente estrecho con surcos paralelos al sentido de deslizamiento; aparecen algunas pequeñas acumulaciones de material en

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

los bordes, pero sin zonas muy fracturadas. Estas características son indicativas de un desgaste abrasivo moderado, con limitada adhesión.

En la Fig. 17(B) la huella es más heterogénea: se observan áreas rugosas y placas adheridas/aglutinadas en el interior de la pista. Esto sugiere una combinación de abrasión y adhesión, con mayor desprendimiento de partículas que en A; la mayor carga facilita deformación plástica localizada y acumulación de detritos.

En la Fig. 17(C) la pista mantiene continuidad, pero aparecen surcos más pronunciados y una textura con más partículas sueltas que en la condición A. El aumento de velocidad intensifica el efecto cortante de las asperezas y favorece arrastre de partículas, por lo que el mecanismo sigue siendo predominantemente abrasivo, pero en una versión más severa que a 200 rpm.

En la Fig. 17(D) se aprecia la pista con mayor irregularidad: zonas de material fuertemente adherido alternan con áreas donde parece haberse producido fragmentación superficial. También son visibles diferencias de tonalidad que podrían corresponder a acumulaciones de óxido. El mecanismo aquí es mixto (abrasivo–adhesivo) con contribución oxidativa, aunque en general la severidad parece menor o más distribuida que la observada en el pin de 2 mm bajo las mismas condiciones de carga/velocidad.

En términos generales, el análisis microestructural de las superficies desgastadas evidencia que tanto la carga como la velocidad influyen de manera directa en la severidad y el tipo de mecanismos de desgaste presentes en el acero AISI O1. Con el pin de 2 mm, la mayor presión de contacto favoreció un desgaste más localizado y severo, caracterizado por surcos profundos, fragmentación y formación intermitente de capas oxidadas. En contraste, con el pin de 6,35 mm el desgaste se distribuyó de manera más homogénea, mostrando acumulaciones de material y adhesión, pero con menor concentración de daño en puntos específicos. Esta diferencia explica

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

por qué las configuraciones con el pin más pequeño presentaron mayores valores de coeficiente de fricción y de tasa de desgaste. En general, la evolución observada confirma una transición desde un régimen de abrasión leve en condiciones suaves, hasta un desgaste mixto abrasivo–adhesivo–oxidativo en las condiciones más severas de carga y velocidad.

4.5 Evaluación de la Variación de Dureza

La dureza inicial promedio del acero AISI O1 fue de 675.5 HV, obtenida a partir de tres mediciones sobre la superficie no ensayada. Tras los ensayos Pin-on-Disk, se registró una disminución en la dureza superficial en todas las configuraciones, con valores que oscilaron entre 655.0 HV (condición más severa: pin 2 mm – 30 N – 500 rpm) y 672.3 HV (condición más suave: pin 6.35 mm – 10 N – 200 rpm). En promedio, la reducción de dureza fue de 9.2 HV (–1.36 %), lo cual refleja la pérdida de resistencia superficial inducida por la fricción y la deformación plástica local. Los resultados detallados de cada condición se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10.

Dureza superficial post-ensayo para cada configuración de carga, velocidad y diámetro de pin.

| Configuración | Dureza post-ensayo (HV) | Δ respecto a inicial (HV) | Δ % respecto a inicial |
|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 2mm – 10 N – 200 rpm | 669,5 | -6 | -0,89% |
| 2mm – 20 N – 200 rpm | 666,7 | -8,8 | -1,30% |
| 2mm – 30 N – 200 rpm | 659,8 | -15,7 | -2,32% |
| 2mm – 10 N – 500 rpm | 668,1 | -7,4 | -1,10% |
| 2mm – 20 N – 500 rpm | 666 | -9,5 | -1,41% |
| 2mm – 30 N – 500 rpm | 655 | -20,5 | -3,03% |
| 6,35mm – 10 N – 200 rpm | 672,3 | -3,2 | -0,47% |
| 6,35mm – 20 N – 200 rpm | 670,2 | -5,3 | -0,78% |
| 6,35mm – 30 N – 200 rpm | 665,3 | -10,2 | -1,51% |
| 6,35mm – 10 N – 500 rpm | 671,6 | -3,9 | -0,58% |
| 6,35mm – 20 N – 500 rpm | 667,4 | -8,1 | -1,20% |
| 6,35mm – 30 N – 500 rpm | 664 | -11,5 | -1,70% |

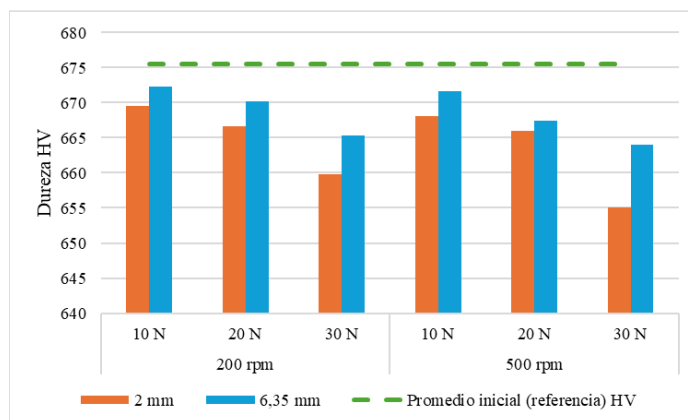
Nota. La dureza superficial post-ensayo (HV) se midió con microdurómetro Vickers tras cada prueba. Δ (HV) indica la variación absoluta respecto al valor inicial (referencia) y Δ % refleja el cambio porcentual.

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

A partir de los resultados de la Tabla 10, en la Figura 18 se presenta la comparación entre la dureza inicial y la dureza post-ensayo para cada configuración evaluada.

Figura 18.

Comparación de dureza inicial vs post-ensayo por configuración.



Nota. Comparación de la dureza Vickers inicial (línea discontinua) versus post-ensayo para pines de 2 mm y 6,35 mm en diferentes combinaciones de carga y velocidad.

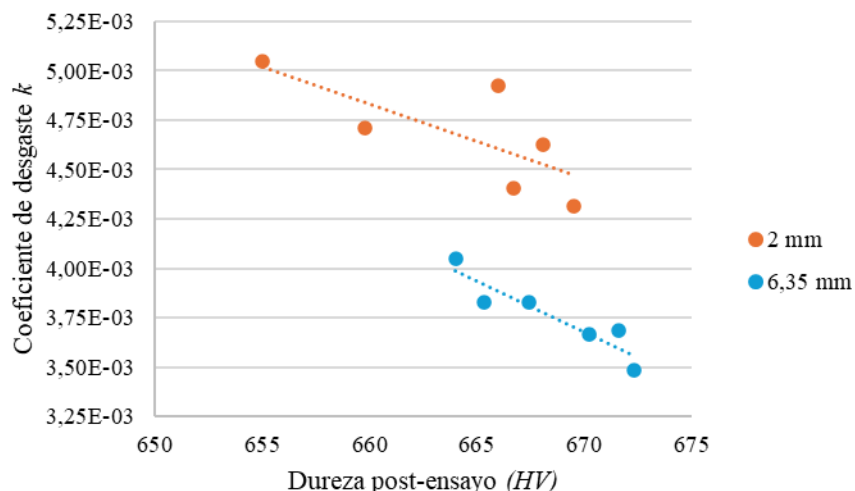
La Tabla 10 y la Figura 18 muestran la comparación entre el valor inicial y los valores obtenidos después de cada ensayo. Se observa que las configuraciones con el pin de 2 mm presentan reducciones más marcadas de dureza, atribuibles a la mayor presión de contacto generada por el menor diámetro. La tendencia también indica que las condiciones de mayor carga y velocidad acentúan la pérdida de dureza, siendo la condición 2 mm – 30 N – 500 rpm la que evidenció el descenso más significativo (-20.5 HV, -3.0 %). Por el contrario, las configuraciones con el pin de 6.35 mm conservaron valores más próximos a la dureza inicial, mostrando reducciones menores al 2 %.

Con el fin de analizar la relación entre la pérdida de dureza y el comportamiento tribológico del material, en la Figura 19 se presenta la variación del coeficiente de desgaste en función de la dureza superficial post-ensayo.

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Figura 19.

Variación del coeficiente de desgaste en función de la dureza superficial post-ensayo.



Nota. Cada punto representa el coeficiente de desgaste k promedio para una configuración experimental frente a la dureza superficial post-ensayo (HV); las líneas punteadas muestran la tendencia lineal de los datos para cada diámetro de pin.

La relación entre dureza post-ensayo y el coeficiente de desgaste (Figura 19) muestra una tendencia inversa: a menor dureza superficial, mayor tasa de desgaste. Esto confirma que la pérdida de dureza contribuye a la disminución de la resistencia al desgaste del acero AISI O1 en condiciones de contacto seco. El efecto es más notable en el pin de 2 mm, donde la reducción de dureza coincide con los valores más altos de coeficiente de desgaste. En cambio, con el pin de 6.35 mm, aunque también se observa disminución, la correlación es menos pronunciada debido a la menor presión de contacto.

5. Conclusiones

Los resultados experimentales validan el modelo de Archard para el acero AISI O1 en contacto seco con técnica Pin-on-Disk según ASTM G99. En detalle:

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

- Para pin de 2 mm a 200 rpm, la tasa de desgaste volumétrico k_v aumenta de $6,51 \times 10^{-12}$ m³/m (10 N) a $2,13 \times 10^{-11}$ m³/m (30 N); el coeficiente de desgaste k varía de $4,31 \times 10^{-3}$ a $4,71 \times 10^{-3}$.
- Para pin de 2 mm a 500 rpm, k_v crece de $6,99 \times 10^{-12}$ m³/m (10 N) a $2,29 \times 10^{-11}$ m³/m (30N), y k oscila entre $4,63 \times 10^{-3}$ y $5,05 \times 10^{-3}$.
- Para pin de 6,35 mm a 200 rpm, k_v pasa de $5,26 \times 10^{-12}$ m³/m (10 N) a $1,73 \times 10^{-11}$ m³/m (30N), con k entre $3,49 \times 10^{-3}$ y $3,83 \times 10^{-3}$.
- Para pin de 6,35 mm a 500 rpm, k_v aumenta de $5,56 \times 10^{-12}$ m³/m (10 N) a $1,83 \times 10^{-11}$ m³/m (30 N), mientras que k se sitúa entre $3,68 \times 3$ y $4,05 \times 10^{-3}$.

Estos rangos evidencian una aceleración del desgaste bajo condiciones más severas, lo que implica periodos de vida útiles más cortos bajo altas cargas y velocidades.

El estudio por microscopía óptica reveló que en condiciones de mayor carga y velocidad predominan los mecanismos de desgaste abrasivo y adhesivo, evidenciado por surcos profundos, partículas desprendidas y microfisuras. En condiciones de menor carga y velocidades reducidas, la superficie presenta huellas menos agresivas, con zonas pulidas y menor presencia de detritos, lo que corrobora la relación directa entre severidad de las condiciones de ensayo y la morfología del desgaste.

La dureza Vickers disminuyó tras los ensayos en todos los casos, evidenciando ablandamiento de la superficie. El pin de 2 mm produjo reducciones de hasta $-3,03\%$, mientras que el de 6,35 mm alcanzó $-1,70\%$, reflejo de la mayor presión de contacto del diámetro menor. Este ablandamiento sugiere deformación plástica y calentamiento local, comprometiendo la resistencia al desgaste en las condiciones más exigentes.

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

El análisis multivariable muestra que la presión de contacto (función de carga y diámetro de pin) y la velocidad de deslizamiento son los factores que más influyen en el desgaste. Existe una correlación directa entre la variación porcentual de dureza y los valores de k y k_v , confirmando que el ablandamiento superficial facilita la remoción de material. Por lo tanto, optimizar dichas variables es clave para mejorar la vida útil tribológica del acero AISI O1 en aplicaciones de contacto seco.

6. Recomendaciones

Durante el desarrollo de la investigación tribológica del acero AISI O1, se identificaron aspectos que pueden mejorarse en estudios posteriores para obtener resultados más completos y aplicables. A continuación, se presentan las recomendaciones organizadas por categorías específicas.

6.1 Recomendaciones metodológicas

Para el sistema de medición de desgaste, se recomienda incorporar técnicas de perfilometría 3D que permitan una cuantificación más precisa del volumen desgastado, reduciendo la dependencia de las mediciones gravimétricas que pueden verse afectadas por la presencia de detritos adheridos. Asimismo, se sugiere implementar monitoreo en tiempo real de la temperatura en la zona de contacto durante los ensayos, ya que este parámetro influye significativamente en los mecanismos de desgaste observados.

Se recomienda ampliar el rango de velocidades de ensayo hasta 1000 rpm para caracterizar completamente el comportamiento del material en condiciones de alta velocidad. Adicionalmente, incluir ensayos con lubricación límite permitiría establecer comparaciones directas con el comportamiento en seco y determinar los beneficios de diferentes estrategias de lubricación.

6.2 Recomendaciones para caracterización de materiales

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

En cuanto al análisis microestructural, se sugiere emplear microscopía electrónica de transmisión (TEM) para identificar cambios microestructurales subsuperficiales que no son detectables con las técnicas convencionales utilizadas. Esta caracterización permitiría comprender mejor los mecanismos de endurecimiento o ablandamiento observados en las mediciones de dureza.

Para futuras investigaciones, se recomienda realizar análisis de composición química de los productos de desgaste mediante espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS), lo cual proporcionaría información valiosa sobre los procesos de oxidación y transferencia de material durante el desgaste.

6.3 Recomendaciones prácticas para la industria

Se sugiere a las empresas del sector metalmecánico desarrollar protocolos de mantenimiento predictivo basados en los coeficientes de desgaste determinados en este estudio, especialmente para herramientas de corte y componentes mecánicos que operen bajo condiciones similares. La implementación de estos protocolos podría reducir significativamente los costos de mantenimiento no programado.

Como sugerencia para trabajos futuros, se propone investigar tratamientos de endurecimiento superficial tales como nitruración o temple superficial por inducción, con el fin de mejorar la resistencia al desgaste del acero AISI O1 bajo condiciones de contacto seco y optimizar su vida útil en aplicaciones industriales.

Referencias

- Angsuseranee, N., Watcharasresomroeng, B., Bunyawanichkul, P., & Chartniyom, S. (2020). Tribological Behavior of Tool Steel Substrate and Solid Films against 304 BA Austenitic Stainless Steel under Dry Sliding. *Advances in Tribology*, 2020, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2020/8845548>
- ASTM International. (2017). *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus (ASTM G99-17)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/G0099-17>
- Bourithis, L., Papadimitriou, G. D., & Sideris, J. (2006). Comparison of wear properties of tool steels AISI D2 and O1 with the same hardness. *Tribology International*, 39(6), 479–489. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.03.005>
- Bowden, F. Philip., & Tabor, David. (2001). *The friction and lubrication of solids* (Vol. 1). Clarendon Press ; Oxford University Press.
- Bruker Corporation. (n.d.). *UMT TriboLab Mechanical Tester and Tribometer*. Retrieved August 25, 2025, from www.bruker.com/TriboLab
- Fischer-Cripps, A. C. (1999). The Hertzian contact surface. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE*, 34, 129–137. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1004490230078>
- Giraldo, D., & Vélez, J. M. (2002, August). ESTUDIO DEL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO EN SECO DE ALGUNOS PLÁSTICOS. *Revista Dyna*, Vol. 136, 11–20. <https://www.researchgate.net/publication/267839376>
- Granizo, J. (2010). La Tribología y sus aplicaciones en la industria. *Revista Ciencia Unemi*, Vol. 3, No 4, 64–71. <https://www.redalyc.org/pdf/5826/582663869009.pdf>
- Halling, J. (1976). *Introduction to Tribology* (F. R. S. Nevill Mott & G. R. Noakes, Eds.; 1ra ed.). Wykeham Publications (London) Ltd.

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Mahmud, D. N. F., Abdollah, M. F. Bin, Masripan, N. A. Bin, Tamaldin, N., & Amiruddin, H.

(2019). Influence of contact pressure and sliding speed dependence on the tribological characteristics of an activated carbon-epoxy composite derived from palm kernel under dry sliding conditions. *Friction*, 7(3), 227–236. <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0205-y>

Otai Special Steel. (2015, September 1). *O1 Tool Steel*. <https://www.astmsteel.com/product/astm-o1-tool-steel/>

Peña, D. (2011). La influencia de la naturaleza de las superficies en la tribología. *Rev. ION*, Vol. 17. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/1301>

Pérez, C. (1999). Estudio del desgaste por deslizamiento en seco en un equipo “Pin-on-disk.” *Trabajo Dirigido de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.*

Quispe Ordoñez, D. L., Coque Toapanta, A. J., Morales Tamayo, Y., & Trujillo Ronquillo, D. F. (2020). Máquina de ensayo abrasivo PIN-ON-Disk por la norma ASTM G99. *DATEH*, Vol. 2, N°. 2, 39–46.

Semenov, V. I., Shuster, L. S., Huang, S. J., & Lin, P. C. (2011). Influence of microstructure, produced by heat treatment and sever plastic deformation, on tribological properties of low-carbon steel. *Tribology in Industry*, 33(2), 63–71. <https://core.ac.uk/download/pdf/25951476.pdf>

Servicio Industrial S.A. de C.V. (2012). *Acero SISA O1 Acero para trabajo en frío*. <https://sisa1.com.mx/wp-content/uploads/Acero-SISA-O1.pdf>

Singh, H., Singh, R., & Singh, R. (2016). Comparison of Wear Properties of AISI D3 and O1 Steel with the Same Hardness. *Asian Review of Mechanical Engineering*, Vol. 5 No. 2, 14–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.51983/arme-2016.5.2.2414>

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI O1 EN CONTACTO SECO

Struers. (n.d.). *Vickers - Ensayo de dureza*. Retrieved September 27, 2025, from <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Hardness-testing/Vickers>

Trevisiol, C., Jourani, A., & Bouvier, S. (2018). Effect of microstructures with the same chemical composition and similar hardness levels on tribological behavior of a low alloy steel. *Tribology International*, 127, 389–403. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.06.019>

VETO. (n.d.). *Balanza analítica*. Retrieved September 28, 2025, from <https://www.veto.cl/balanza-analitica-a6709120/p>

Wolfram Carbide. (2025, September 24). *Carburo YG6: Productos y fabricantes de carburo cementado*. <https://www.wolframcarbide.com/es/carburo-yg6/>