

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE DESGASTE DE UN TRIBOSISTEMA DE ACERO INOXIDABLE PARA APLICACIONES EN AMBIENTES MARINOS

STUDY OF THE WEAR PROPERTIES OF A STAINLESS STEEL TRIBOSYSTEM FOR MARINE ENVIRONMENT APPLICATIONS

Sandra Rojas Osorio

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
d2403015@itcelaya.edu.mx

Karla Judith Moreno Bello

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
karla.moreno@itcelaya.edu.mx

Luis Daniel Aguilera Camacho

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
daniel.aguilera@itcelaya.edu.mx

J. Santos García Miranda

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
santos.garcia@itcelaya.edu.mx

Recepción: 1/noviembre/2024

Aceptación: 15/enero/2025

Resumen

El océano es el principal ecosistema que sostiene y regula el clima en el planeta, genera el 50% del oxígeno de la Tierra y absorbe aproximadamente el 90% del calor generado por emisiones. Permitir que el aumento de la huella de carbono acabe con este medio ambiente significa renunciar a productos clave para la vida diaria como alimentos, medicinas y biocombustibles, sólo por mencionar algunas de las afectaciones que se tendrían, y para hacer eficiente el uso de los recursos naturales, es necesario aplicar los conocimientos de las ciencias experimentales tales como la tribología para disminuir la energía que se pierde en un sistema. Los tribosistemas en ambientes marinos son superficies en movimiento que están en contacto bajo condiciones de alta humedad y salinidad, así como de cambios en la temperatura, lo cual los hace más propensos a problemas de fricción y desgaste. En el presente trabajo se muestra el análisis de

desgaste realizado en un tribosistema de acero inoxidable *AISI 316* y *AISI 420* para que pueda considerarse como opción en aplicaciones marinas. La caracterización consistió en pruebas de desgaste bajo el método perno-en-disco con cuatro cargas diferentes, el análisis del mecanismo y tasa de desgaste, así como el volumen perdido. Los resultados muestran que el sistema de acero inoxidable puede ser una opción viable para utilizarse en aplicaciones que tengan un rango de carga similar a los ensayados para evitar daños severos en el material.

Palabras Clave: acero inoxidable, ambiente marino, desgaste.

Abstract

*The ocean is the main ecosystem that sustains and regulates the climate on the planet, it generates 50% of the Earth's oxygen and absorbs approximately 90% of the heat through emissions. Allowing the increase of the carbon footprint to destroy this environment means giving up key products for daily life such as food, medicines, and biofuels, to mention some possible effects. Applying knowledge of sciences such as tribology is essential to efficiently use natural resources to reduce the energy lost in a system. This work shows the wear analysis carried out on a tribosystem of *AISI 316* and *AISI 420* stainless steel so that it can be considered an option in marine applications. The characterization consisted of wear tests under the pin-on-disk method with four different loads, and the analysis of the mechanism and rate of wear, such as the volume loss. The results show that the stainless steel system can be a viable option to use in applications with loads in ranges as shown to avoid severe damage to the material.*

Keywords: *marine environments, stainless steel, wear.*

1. Introducción

Las actividades industriales deben priorizar el impacto que sus operaciones tienen en el medio ambiente. Hoy en día ya no es negociable no tener un plan de ataque para controlar y/o disminuir la huella de carbono que los diferentes procesos causan en el planeta. Por este motivo, distintas organizaciones de índole

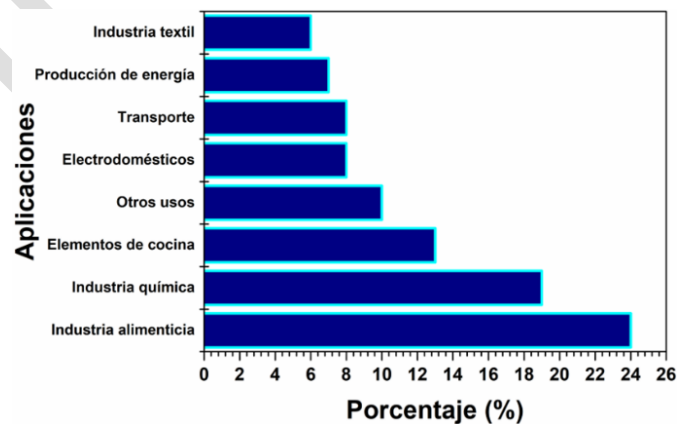
mundial han propuesto alternativas para detener, revertir y prevenir el daño ocasionado al entorno; un claro ejemplo de esto es la solución propuesta por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), que en 2015 lanzó un programa para contrarrestar los principales problemas a nivel mundial, conocido como Agenda 2030 [ONU, 2015], en donde se plantean 17 objetivos clave para el desarrollo sostenible. La tribología, conocida como la ciencia que estudia los fenómenos de fricción, desgaste y lubricación, impacta en seis de estos objetivos en diferentes rubros: objetivo 3 – salud y bienestar (uso de biolubricantes), objetivo 7 – energía asequible y no contaminable (incremento de vida útil y mejora de la eficiencia energética), objetivo 8 – trabajo decente y crecimiento económico (eficiencia en el uso de recursos y protección al desgaste), objetivo 9 – industria, innovación e infraestructura (protección al desgaste), objetivo 12 – producción y consumo responsables (uso de lubricantes y aditivos renovables y biodegradables) y objetivo 13 – acción por el clima (mejora en la eficiencia energética) [Woydt, M., 2021].

El objetivo 14 – vida submarina, tiene un profundo impacto, ya que el océano es el ecosistema más grande (en volumen) del planeta, ocupando el 99% del espacio vital. Los océanos y mares representan uno de los sectores más importantes para la industria, ya que de ellos se extraen alimentos, medicinas y hasta biocombustibles [ONU, 2015]. Sin embargo, es uno de los medios ambientes más desafiantes para la ingeniería ya que los componentes y las máquinas están expuestos a la salinidad del agua provocando fallas en los elementos debido a la corrosión. Un 30% de las fallas reportadas en buques y otros equipos utilizados en los medios marítimos son producto de la corrosión [López-Ortega, A., 2018].

Uno de los materiales más utilizados a nivel industrial es el acero inoxidable, por su alta resistencia a la corrosión y a medios ácidos y, su estabilidad térmica [Outokumpu, 2017].

El acero inoxidable es un material con alto contenido de Cr, que forma una capa protectora en la superficie del metal y que lo aísla del medio oxidativo [Singh, S., 2014]. Si esta capa llega a romperse, tiene una capacidad regenerativa; sin embargo, si el componente está trabajando en un medio marino, el nivel de acidez

del agua puede desgastar esta capa a tal grado de hacerla desaparecer. Otro factor que influye es la carga a la que está sometido el material, ya que, si es lo suficientemente alta, la capa pasiva puede sufrir daños irreparables [Wang, R., 2023]. El uso del acero inoxidable es muy notable en ciertas áreas como: productos para consumo humano, componentes para equipos industriales, piezas y equipos para procesos químicos y la industria alimenticia. En la Figura 1 se muestran las principales aplicaciones de este material, en donde el uso en el ambiente marino se incluye en las aplicaciones de transporte [Outokumpu, 2017]. El acero inoxidable se divide en cinco categorías con base en su microestructura (ya que ésta es la que determina principalmente las propiedades): ferrítico, martensítico, austenítico, dúplex y aleaciones endurecidas por precipitación. Los aceros martensíticos tienen un alto contenido de carbono para mejorar su resistencia y templabilidad; se les puede agregar níquel para mejorar la soldabilidad y fósforo para incrementar la maquinabilidad; son magnéticos y se pueden endurecer. Los aceros austeníticos tienen una excelente resistencia a la corrosión, buena soldabilidad y se pueden moldear fácilmente; tienen una buena resistencia al impacto a bajas temperaturas y no son magnéticos. Aunque el acero inoxidable es resistente a la corrosión, no es inmune a sufrir un ataque en el sustrato: la resistencia que presenta en un ambiente de trabajo determinado depende de la combinación de la composición química del material y la agresividad del entorno [Outokumpu, 2017].



Fuente: elaboración propia

Figura 1 Áreas de aplicación del acero inoxidable.

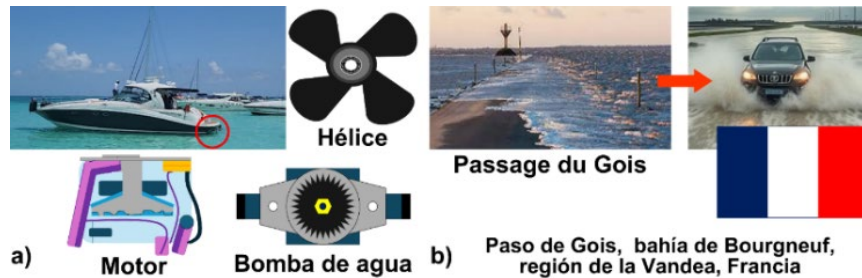
Para disminuir la huella de carbono generada por los procesos industriales en el océano, se han implementado diversas soluciones que se pueden englobar en tres grupos: el desarrollo de nuevos materiales capaces de soportar las condiciones ambientales necesarias para desempeñar el trabajo para el cual se diseñaron; la segunda categoría explora el proceso para recubrir los materiales existentes con aleaciones o productos que resistan la corrosión, considerando que estos procesos generan un alto costo de producción y una huella de carbono importante; y la tercera línea de soluciones permite probar diferentes configuraciones de materiales comunes y de bajo costo, que permitan cumplir con las condiciones de trabajo limitando su rango de operación a ciertos parámetros. Esto último evitaría el incremento de la huella de carbono por la utilización de materiales con procesos de producción más invasivos para el medio ambiente, así como la utilización de tratamientos termoquímicos posteriores.

En la Figura 2 se muestran algunas aplicaciones marinas del acero inoxidable en elementos mecánicos:

- En la Figura 2a se pueden observar componentes de un barco que se encuentran sumergidos y que se ven atacados por la corrosión y el desgaste. Normalmente se relacionan las aplicaciones marinas con navíos o estructuras de altamar, sin embargo.
- En la figura 2b se tiene un claro ejemplo de que los barcos no son los únicos que están expuestos a estas condiciones: existen carreteras en algunos lugares del mundo que conectan islas con los continentes pero al estar situadas en el océano, quedan inundadas durante algunas horas por el crecimiento de la marea, afectando a los usuarios que transitan por estos caminos y que muchas veces quedan atrapados en sus vehículos, por lo que los automóviles (relacionados con autopistas o calles) quedan expuestos a los ambientes marinos y sufren las mismas consecuencias que cualquier otro medio de transporte o construcción en contacto con el agua.

La presente investigación expone las características más relevantes del análisis de desgaste tales como la tasa y los mecanismos en un sistema de acero

inoxidable considerando cargas de 0.5, 3.5, 6.5 y 9.5 N, con la finalidad de que sea una opción viable para utilizarse en aplicaciones marinas y/o en sistemas que estén expuestos al agua del mar.



Fuente: elaboración propia

Figura 2 Ejemplos de aplicaciones marinas de elementos mecánicos de acero inoxidable.

2. Métodos

En la Figura 3, se puede observar un esquema general de la metodología que se siguió para el desarrollo del presente trabajo, en los subtemas siguientes se describen a detalle cada una de las etapas.



Fuente: elaboración propia

Figura 3 Metodología general.

Preparación de muestras

El tribosistema seleccionado consiste en especímenes de acero inoxidable AISI 316 (AISI 316 SS) probados con bolas de acero inoxidable AISI 420 (AISI 420 SS) como contrapartes, ambos sumergidos en agua salada para simular las condiciones ambientales a las que estarían sometidos en un medio ambiente

marino. Para ello, una barra de *AISI 316 SS* adquirida con un proveedor de acero local sirvió para obtener las probetas con forma de disco para el ensayo tribológico, con dimensiones de 25 mm de diámetro y 5 mm de espesor. Las bolas de *AISI 420 SS* de 3 mm de diámetro son de uso comercial y fueron adquiridos con el proveedor Anton Paar (Graz, Austria).

Todas las probetas de acero *AISI 316 SS* pasaron por un proceso de preparación metalográfica, que consistió en desbastar la superficie de los discos con lijas de tamaño de grano 80, 120, 320, 600, 1000, 1200 y 1500, hasta alcanzar una rugosidad R_a de 0.03 μm .

La rugosidad de los discos fue validada con el promedio de cinco mediciones en distintas zonas, obtenidas con ayuda de un perfilómetro de superficie Mitutoyo SJ-400. Los discos y las bolas se limpiaron con metanol antes de realizar cada prueba, con el fin de remover cualquier tipo de contaminación de la superficie.

El agua de mar se preparó en laboratorio de acuerdo con lo establecido en la norma *ASTM D1141*. Para la solución de agua de mar sintética, las sales fueron adquiridas a través del proveedor Sigma Aldrich y el agua destilada (Número *CAS-7732-18-5*) se compró con un proveedor local. Se prepararon 30 ml de esta solución para cada prueba tribológica. La mezcla se realizó a temperatura ambiente con ayuda de una mesa termoagitadora a una velocidad de giro de 525 rpm hasta que toda la sal se disolvió en el agua. Una vez terminada la preparación, se utilizó inmediatamente para evitar una afectación en los resultados de tribología, ocasionada por la ionización de la solución.

A la mezcla de agua de mar sintética se le midió el pH antes y después de cada prueba tribológica, obteniendo un valor de 3 en todas las muestras; para obtener esta información se utilizaron tiras de papel indicador y se comparó el resultado con los colores de la escala proporcionados por el proveedor.

Ensayos tribológicos

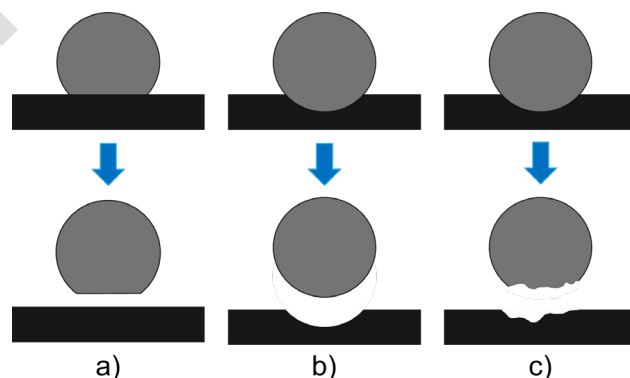
De acuerdo con la norma *ASTM G40*, el desgaste se define como “el daño ocasionado a una superficie donde por lo general se presenta pérdida de material derivado de la interacción de la superficie con otra sustancia o cuerpo”.

La tasa de desgaste se define como “el cambio dimensional debido a la pérdida de material por unidad de parámetro de exposición (masa, volumen, espesor) en unidad de distancia de deslizamiento o unidad de tiempo” [ASTM, 2002].

Los equipos utilizados para realizar pruebas de fricción y desgaste son conocidos como tribómetros; su clasificación se basa en el tipo de movimiento que realizan al simular las condiciones que se han observado en los sistemas de trabajo, tales como: pin-on-disk (análisis entre el movimiento de un perno (pin) y un disco rotatorio), bola sobre disco (análisis entre el movimiento de una bola sobre un disco rotatorio), y bloque sobre anillo (análisis de movimiento lineal).

Para este trabajo, se utilizó un tribómetro de movimiento rotativo de CSM Instruments Company (Needham, MA, USA), el cual permite una configuración de bola sobre disco o perno en disco (pin-on-disk), por lo que se realizaron los análisis considerando la norma *ASTM G99 – 23* [ASTM, 2023].

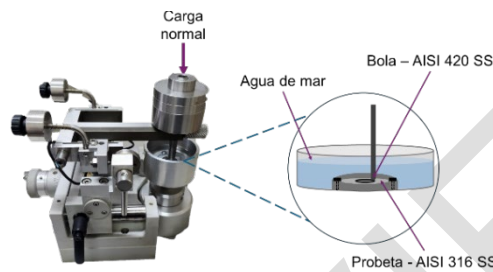
En la Figura 4 se muestra un esquema de acuerdo con la norma *ASTM G133* [ASTM, 2002], de las diferentes geometrías de desgaste que se pueden presentar en una prueba con configuración bola sobre disco. En la Figura 4a se presenta el caso en el que el disco no sufre ningún tipo de desgaste (o se considera insignificante, ya que su geometría y peso no sufren variaciones) y la bola es la que presenta la evidencia de desgaste. En la Figura 4b se muestra el caso en el que la bola no sufre ninguna consecuencia de desgaste y todo se concentra en el disco, que modifica su geometría y hasta su peso. En la Figura 4c se observa el caso menos extremo, en donde ambos cuerpos sufren daños por desgaste.



Fuente: elaboración propia

Figura 4 Posibles geometrías de desgaste (disco y bola) después del ensayo tribológico.

Los ensayos se realizaron bajo la acción de cuatro cargas diferentes (0.5, 3.5, 6.5 y 9.5 N) a temperatura ambiente con una velocidad de giro de 0.05 m/s y una distancia total de 1000 m. Para cada carga se realizaron tres mediciones, con la finalidad de obtener un promedio de los datos y evitar sesgos en la información. Un esquema representativo del tribómetro y la configuración de las pruebas se puede observar en la Figura 5.



Fuente: elaboración propia

Figura 5 Configuración del tribómetro tipo pin-on-disk utilizado.

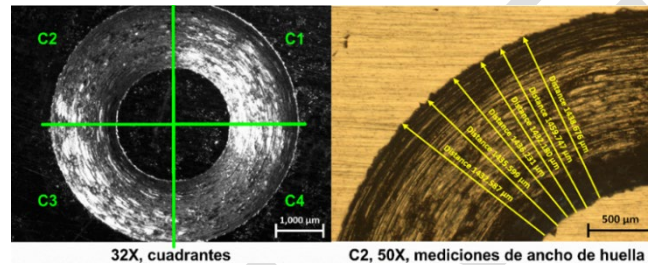
Como resultado de los ensayos tribológicos, se obtiene de manera directa el coeficiente de fricción a través del software del equipo (Tribox 4.5X) y la respuesta de desgaste de los materiales. En este trabajo, solamente se presentan y analizan los resultados de desgaste.

Análisis de desgaste

Una vez terminada la prueba tribológica, se procedió a realizar el análisis de desgaste. En esta investigación, el desgaste se analizó desde la perspectiva del volumen perdido (mm^3) y la tasa de desgaste (mm^3/Nm). Se utilizaron dos métodos para determinar el volumen perdido y el factor de desgaste de las muestras: por microscopía óptica y por perfilometría de contacto. Para el método de microscopía óptica, fue necesario realizar la medición del ancho de huella de las muestras, con la finalidad de obtener un valor promedio que pudiera utilizarse en la ecuación 1, sugerida por la norma ASTM G99 (despreciando el desgaste de la bola), donde R corresponde al radio de la huella de desgaste en milímetros, d es el ancho de huella en milímetros, r es el radio de la bola en milímetros y V es el volumen perdido en milímetros cúbicos.

$$V = \frac{\pi R d^3}{6r} \quad (1)$$

Para obtener el ancho de huella, se utilizó un microscopio metalográfico Zeiss Axio A1m Imager para tomar micrografías a una magnificación de 50X de la huella fraccionada en cuatro partes $C1$, $C2$, $C3$ y $C4$, respectivamente (cuadrante uno, dos, tres y cuatro). En cada cuadrante se realizaron 25 mediciones del ancho de huella para contar con un total de 100 mediciones por muestra. La Figura 6 muestra ejemplo de cómo se tomaron las mediciones en cada cuadrante de la huella.



Fuente: elaboración propia

Figura 6 Mediciones de huella de desgaste, carga de 6.5 N 50X en filtro claro.

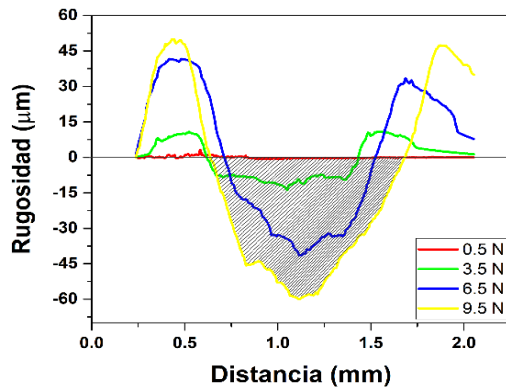
La Ecuación 2 se utilizó para calcular el volumen perdido a partir del área transversal de la huella de desgaste, obtenida a partir del perfil de rugosidad de la huella de desgaste y considerando la longitud total [ASTM, 2020; ASTM, 2002].

$$V = AL \quad (2)$$

En la Ecuación 2, A es el área transversal de la huella de desgaste (en milímetros cuadrados) que se calculó integrando la curva generada por el perfil de rugosidad de la huella mostrado en la Figura 7 (área rayada) utilizando el software OriginPro 8, L corresponde a la longitud de la huella, que en este caso es $2\pi R$ (donde R es el radio de la huella de desgaste en milímetros) y V indica el volumen perdido. El perfil de la huella se obtuvo con ayuda de un perfilómetro Mitutoyo SJ 400.

Para el cálculo de la tasa de desgaste con ambos métodos, se utilizó la Ecuación 3, donde K es la tasa de desgaste (mm^3/Nm), V es el volumen perdido (mm^3), F es la fuerza normal (N) y S es la distancia total de deslizamiento (m).

$$K = \frac{V}{FS} \quad (3)$$



Fuente: elaboración propia

Figura 7 Perfil de rugosidad de la huella de desgaste, AISI 316 SS vs AISI 420 SS.

Para cada carga, se analizaron los mecanismos de desgaste que presentaba el material en relación con la norma ASTM G40 [ASTM, 2002] y la referencia [Kenneth G., 2015].

Para complementar el análisis del mecanismo de desgaste, se tomaron imágenes en 2.5D con ayuda del software ZEN 2012 (desarrollado por Zeiss) para mostrar la topografía de la huella de desgaste y confirmar las observaciones de las micrografías.

3. Resultados

Desgaste – Volumen perdido

El volumen perdido de un cuerpo sometido a cargas constantes que está en contacto con otros cuerpos proporciona una medida de la resistencia que tiene antes de llegar a su límite de fractura. Con base en esta idea, se evaluó la tasa de desgaste en función del volumen perdido, así como la influencia de la carga en este parámetro. Como se mencionó en la metodología, se calculó el volumen perdido de dos formas diferentes: la primera de ellas fue a través de microscopía óptica y tomando como base la medición del ancho de la huella de desgaste; el segundo método requirió utilizar la herramienta matemática de integración para determinar el área transversal del perfil de rugosidad de la huella de desgaste y proyectarla a través de la longitud total. El ancho de huella está directamente

relacionado con la tasa de desgaste, es decir, se puede entender que a mayor ancho de huella la tasa tenderá a crecer, sin embargo, para el caso de este estudio no ocurrió de esta forma: la carga más grande que es la que presenta el ancho de huella mayor es la que obtuvo la tasa de desgaste más baja y, por el contrario, con la carga más baja se presenta el menor ancho de huella y se tiene la tasa de desgaste más alta. En la Tabla 1 se muestran los valores tomados como base para realizar el cálculo del volumen perdido por los dos métodos descritos anteriormente: en la segunda columna se puede apreciar el ancho de huella (método por microscopía óptica) y en la tercera columna se encuentra el área de la huella de desgaste calculada con integración (método por perfilometría). Los resultados de desgaste obtenidos con cada método se presentan en Tabla 2.

Tabla 1 Ancho y área de la huella de desgaste.

Carga (N)	Ancho de huella (μm)		Área transversal de la huella (mm^2)
0.5	661	± 60	6.92×10^{-4}
3.5	1160	± 16	4.07×10^{-3}
6.5	1411	± 38	5.46×10^{-3}
9.5	1584	± 17	7.19×10^{-3}

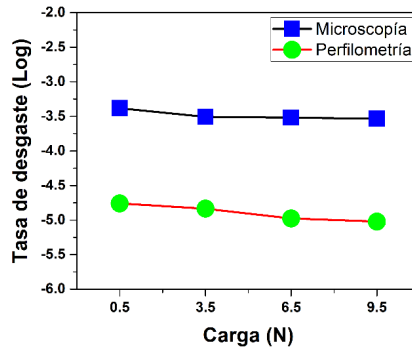
Fuente: elaboración propia

Tabla 2 Comparación de métodos para determinar volumen perdido y tasa de desgaste.

Carga (N)	Por microscopía óptica		Por perfilómetro de superficie	
	Volumen perdido (mm^3)	Tasa de desgaste (mm^3/Nm)	Volumen perdido (mm^3)	Tasa de desgaste (mm^3/Nm)
0.5	0.21	4.14×10^{-4}	8.70×10^{-3}	1.74×10^{-5}
3.5	1.09	3.12×10^{-4}	5.11×10^{-2}	1.46×10^{-5}
6.5	1.97	3.03×10^{-4}	6.86×10^{-2}	1.06×10^{-5}
9.5	2.77	2.92×10^{-4}	9.04×10^{-2}	9.51×10^{-6}

Fuente: elaboración propia

Para apreciar la variación de la tasa de desgaste, en la Figura 8 se muestra el comportamiento (en escala logarítmica) de cada una de las pruebas para ambos métodos. Los resultados de volumen perdido y tasa de desgaste, utilizando los dos métodos de cálculo se muestran en la Tabla 2, donde se puede observar que hay una diferencia entre los valores, dejando ver que el método de perfilometría es el que reporta los datos más pequeños en cuanto a tasa de desgaste.

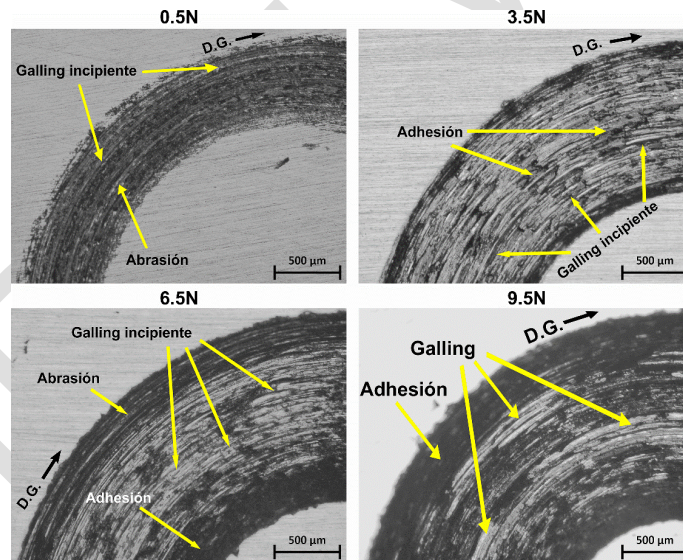


Fuente: elaboración propia

Figura 8 Tasa de desgaste para sistema de acero inoxidable.

Mecanismo de desgaste

Los mecanismos de desgaste pueden observarse a detalle en la Figura 9. La “abrasión” se puede identificar en las imágenes como surcos bien definidos, delgados y de color oscuro en su mayoría, que se presentan a lo largo de la huella sin interrupciones.



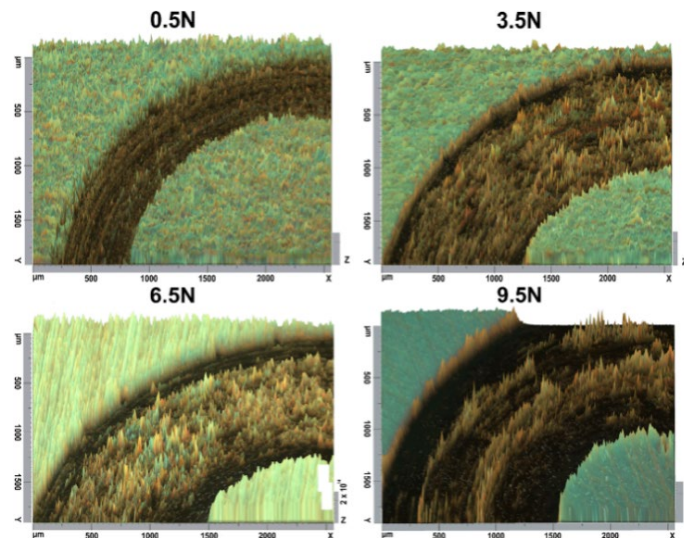
Fuente: elaboración propia

Figura 9 Mecanismos de desgaste por carga en tribosistema

AISI 316 SS vs AISI 420 SS, filtro claro 50X.

Otro mecanismo que se presentó es la “adhesión” que se localiza en las zonas más oscuras de la huella, ya que es material que se ha desprendido del disco y se ha depositado en otro lugar y que por consecuencia del paso continuo de la bola

bajo la acción de la carga normal se comprime en la superficie, llegando incluso a soldarse nuevamente por el incremento de temperatura en la zona de contacto debido a la fricción. El tercer mecanismo detectado es el “galling”, este se presenta en forma de protuberancias que sobresalen de la huella de desgaste sin llegar a notarse en forma macroscópica; para evidenciar este fenómeno, se pueden observar las imágenes en 2.5D de la Figura 10.



Fuente: elaboración propia

Figura 10 Topografía de la huella de desgaste. Imágenes en 2.5D con microscopio metalográfico, filtro polarizado 50X.

La presencia de este mecanismo se hace evidente al notar todos los picos en la topografía de la huella; incluso se pueden observar también las zonas con adhesión (las más oscuras y con puntos blancos). El galling puede entenderse como una forma severa de abrasión, donde el material removido se acumula en el interior de la huella, alzándose de la superficie. Es importante mencionar que los mecanismos de desgaste presentes en el material son independientes de la carga aplicada y están directamente relacionados con las propiedades mecánicas del tribosistema. Se observaron tres mecanismos principales de desgaste: abrasión, adhesión y galling. También se observó una relación entre la carga y el ancho de huella: a mayor carga, mayor es el ancho, lo que es un indicativo de que la deformación plástica es severa durante la prueba de desgaste.

4. Discusión

Obtener una huella de desgaste grande y una tasa de desgaste pequeña se puede explicar de manera sencilla y está relacionado con la deformación plástica del material: al incrementar la fuerza normal en los ensayos, el material se somete a deformaciones plásticas más grandes, lo que genera mayor desprendimiento de partículas del disco (considerando que es mucho menos resistente que el acero de la bola) que se quedan como rebabas en la superficie y cambian por completo la forma en la que interactúan los dos cuerpos al incrementar el área de contacto y la dureza dentro de la huella, siendo muy similar a lo reportado por [Prasad, A., 2023] al realizar una prueba con distancias de deslizamiento de 250, 500 y 1000 *m* en un acero inoxidable 316LN nitrurado en baño salino.

La diferencia entre los dos métodos de medición para obtener el volumen perdido se debe a la exactitud con la que se realizan los cálculos: por ejemplo, para el método por microscopía, el único dato que se relaciona con la huella de desgaste es el ancho de esta; para el método por perfilometría, la norma sugiere que se hagan los cálculos utilizando relaciones geométricas, y esto considera el perfil completo de la profundidad de la huella, lo que genera datos más precisos.

Sin embargo, la diferencia de las tasas de desgaste con la carga en ambos métodos es mínima ya que no supera ni el orden de magnitud entre cada carga.

Los valores obtenidos a través de la perfilometría son muy pequeños, pero se asemejan en el orden a los reportados por [Aguilera-Camacho, L. D., 2021] al estudiar las propiedades tribológicas (fricción y desgaste) de un acero 4140 ensayado con diferentes contrapartes cerámicas en condiciones de trabajo en seco y con lubricación.

Utilizar esta técnica para cuantificar el desgaste es prometedora, siempre y cuando se tenga una huella de desgaste uniforme, ya que variaciones en el perfil de rugosidad ocasionadas por imperfecciones en la superficie o transformaciones de material como resultado de la prueba tribológica, pueden generar errores de medición y deberían agregarse al modelo matemático con el que se esté trabajando, como lo comenta AjitBastola [Bastola, A., 2024] al comparar un método de cálculo manual con los resultados mostrados por simulación al estudiar

el comportamiento de desgaste de una aleación bajo diferentes ambientes de prueba.

Los mecanismos de desgaste reportados en este estudio coinciden en su mayoría con lo encontrado por AshishYadav et. al, al ensayar un acero inoxidable austenítico contra carburo de tungsteno [Yadav, A., 2024], así como con los resultados reportados por KittichatWiratkapun et. al de un acero inoxidable 316L y una contraparte de alúmina [Wiratkapun, K., 2024].

El desprendimiento de material está relacionado con el desgaste por deformación, esto mismo como lo observaron en sus resultados SabriAlkan y MustafaSabriGök [Alkan, S., 2021] al ensayar una muestra de acero inoxidable 316 desgastado en agua de mar por una hora con una contraparte de alúmina.

En el presente estudio, presentar una cantidad considerable de material desprendido fue una característica de todas las muestras al terminar la prueba de tribología. El incremento de la huella de desgaste en relación con el incremento de carga coincide con lo reportado en otros experimentos, donde se ha probado un acero inoxidable austenítico fabricado a través de la manufactura aditiva sometido a cargas de 20, 25 y 30N [Yadav, A., 2024].

5. Conclusiones

La técnica por perfilometría de superficie para calcular el volumen perdido y la tasa de desgaste ofrece un acercamiento más certero a los valores reales, ya que considera el perfil transversal de la huella de desgaste para realizar los cálculos. Incluso, para futuros trabajos, se puede mejorar esta técnica al restar al área bajo la curva del área comprendida por las zonas de pile up, ya que teóricamente ese no es volumen perdido, solamente material desplazado. Se identificaron tres mecanismos de desgaste principales: abrasión, adhesión y galling.

El tribosistema de acero inoxidable podría ser funcional en aplicaciones marinas de corto tiempo donde las cargas de trabajo se encuentren en el rango del estudio planteado. Para futuros estudios, se puede evaluar el acero AISI 316 SS bajo las mismas condiciones de trabajo, pero con contrapartes de otros materiales tales como cerámicos o incluso algunos polímeros para extender su aplicación.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al TecNM por el financiamiento del presente trabajo mediante el proyecto 19653.24P. S. Rojas-Osorio agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por la beca otorgada para llevar a cabo sus estudios de doctorado.

7. Bibliografía y Referencias

- [1] A. International, ASTM G40 - Standard Terminology Relating to Wear and Erosion, West Conshohocken: ASTM International, 2002.
- [2] A. International, ASTM G99-17 - Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-disk Apparatus, West Conshohocken: ASTM International, 2020.
- [3] Aguilera-Camacho L. D., Hernández-Sierra M. T., García-Miranda J. S. y Moreno-Bello Karla J., «On the Influence of Tribological Properties of AISI 4140 Annealed Steel against Ceramic Counterparts under Dry and Lubricated Conditions and Their Effect on Steel Microstructure,» *Metals*, vol. 11, 2021.
- [4] Arun Prasad Murali, Mathew Alphonse, Dharmalingam Ganesan, Sachin Salunkhe y Hussein Mohammed Abdel Moneam Hussein, «Sliding wear behaviour of salt bath nitrided 316LN austenitic stainless steel,» *Applied Surface Science Advances*, vol. 15, 2023.
- [5] Ashish Yadav, Manu Srivastava, Prashant K. Jain y Sandeep Rathee, «Microstructure transformations and improving wear resistance of austenitic stainless steel additively fabricated by arc-based DED process,» *Defence Technology*, 2024.
- [6] Bastola Ajit, Ruby McCarron R., Philip Shipway P., Stewart D. y Dini D., «Experimental and numerical investigations of sliding wear behaviour of an Fe-based alloy for PWR wear resistance applications,» *Wear*, Vols. %1 de %2540 - 541, 2024.
- [7] International, ASTM G133-02 - Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear, West Conshohocken: ASTM International, 2002.

- [8] Kenneth G. Budinski y Steven T. Budinski, «Interpretation of galling tests,» *Wear*, Vols. %1 de %2332 - 333, pp. 1185 - 1192, 2015.
- [9] Kittichat Wiratkapun, ChanunSuwanpreecha, SiwatLinjee, Sukrit Songkuea, TuksadonWutikhun, VisittapongYordsri y Anchalee Manonukul, «Surface modification and enhanced wear performance through severe shot peening treatment in 316L stainless steel manufactured by metal injection moulding, » *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 29, pp. 4072 - 4085, 2024.
- [10] López-Ortega, R. Bayón y J.L. Arana, «Evaluation of protective coatings for offshore applications. Corrosion and tribocorrosion behavior in synthetic seawater,» *Surface and Coatings Technology*, vol. 349, pp. 1083-1097, 2018.
- [11] M. Woydt, «The importance of tribology for reducing CO2 emissions and for sustainability,» *Wear*, Vols. %1 de %2474 - 475, 2021.
- [12] O. d. I. N. Unidas, «Objetivos de Desarrollo Sostenible,» 25 septiembre 2015. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/#>.
- [13] O. d. I. N. Unidas, «Objetivo 14: Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos,» Organización de las Naciones. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/oceans/>.
- [14] Outokumpu, *Handbook of Stainless Steel*, Helsinki, Finland: Outokumpu Oyj, 2017.
- [15] Rongguang Wang, Yuto Ohgata, Yunhui Li, Tian Xiao y Masaharu Honda, «TribocorrosionBehaviour of SUS430 Stainless Steel in Aqueous Solutions with Different pH,» *Coatings*, vol. 13, 2023.
- [16] Sabri Alkan y Mustafa Sabri Gök, «Effect of sliding wear and electrochemical potential on tribocorrosionbehaviour of AISI 316 stainless steel in seawater, » *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 24, pp. 524 - 532, 2021.
- [17] Sandeep Singh y Utpal Borah, «Some Results of Pin on Disc Tribological Evaluation of 316LN Stainless Steel,» *Aspects of Mechanical Engineering and Technology for Industry*, vol. 2, 2014.