

Comportamiento ante el desgaste por deslizamiento en seco del acero inoxidable súper dúplex en un tribómetro bola sobre anillo

Dry sliding wear behavior of super duplex stainless steel in a ball on ring tribometer

Jorge E. Romero Contreras*, Sandra B. Cabello Sequera**

DOI: 10.15446/rev.colomb.biote.v22n1.60835

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza la caracterización del comportamiento ante el desgaste por deslizamiento en seco de un acero inoxidable súper dúplex. Los ensayos fueron desarrollados en un tribómetro tipo bola sobre anillo. Como material del anillo se empleó el acero inoxidable dúplex tipo SAF 2507 sin tratamiento térmico y como material para la bola se usó el acero AISI 52100. Los ensayos se realizaron sin lubricante en condiciones de ambiente (aire), temperatura y humedad estándar de laboratorio. Los parámetros seleccionados, a fin de estudiar sus efectos en el coeficiente de desgaste por deslizamiento, fueron: velocidad de deslizamiento (0,9 m/s y 2 m/s), carga normal (9 N, 19 N y 29 N) y distancias de deslizamiento (500 m, 1000 m y 2000 m). Se empleó un diseño experimental de Taguchi con nueve tratamientos y dos réplicas. En la caracterización del acero SAF 2507 se obtuvo valores del coeficiente de desgaste en el intervalo desde $0,19588 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ hasta $0,72381 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, para las condiciones evaluadas. El factor que más afecta el coeficiente de desgaste es la velocidad de deslizamiento. El mecanismo de desgaste identificado para el SAF 2507 es de adhesión y delaminación de alta velocidad.

Palabras clave: Desgaste por deslizamiento, acero dúplex, método Taguchi, tribología.

ABSTRACT

In this paper the characterization of the behavior during dry sliding wear of a super duplex stainless steel was performed. The tests were developed in a ball on ring tribometer type. As material of the ring is used the duplex stainless steel type SAF 2507 without heat treatment and as material for the ball is used the steel AISI 52100. Tests were conducted without lubrication in ambient conditions (air), temperature and humidity laboratory standard was used. The parameters selected in order to study its effects on sliding wear coefficient were: sliding speed (0.9 m/s and 2 m/s), normal load (9 N, 19 N and 29 N) and distances slip (500 m, 1000 m and 2000 m). Taguchi experimental design with nine treatments and two replicates was used. In the characterization of steel SAF 2507 wear coefficient values was obtained in the range from $0.19588 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ to $0.72381 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, for the conditions tested. The factor that most affects the wear coefficient is the sliding velocity. The wear mechanism identified for the SAF 2507 was adhesion and high speed delamination.

Key words: Sliding wear, duplex stainless steel, Taguchi method, tribology.

Recibido: agosto 16 de 2019

Aprobado: abril 22 de 2020

* Master en Ingeniería Mecánica, Centro de Investigación en Materiales (CIM), Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Naguanagua, Edo. Carabobo., Venezuela. Código postal (2005). joromer@uc.edu.ve , ORCID (0000-0002-3759-8339)

** Doctor en Ingeniería, Centro de Investigaciones en Mecánica (CIMEC), Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Naguanagua, Edo. Carabobo., Venezuela. Código postal (2005). scabello@uc.edu.ve

INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidable súper dúplex (austenítico - ferrítico), son atractivos como materiales en bioingeniería, siendo una alternativa para ser implantados, como elementos de fijación ortopédica, placas de huesos y en algunas prótesis en seres vivos, gracias a su alta resistencia a la corrosión y bajos costos, en comparación con el acero inoxidable austenítico y aleaciones de titanio, materiales preferidos en esta aplicación (Cigada, *et al.*, 1989) (Cigada, De Santis, Gatti, Roos, & Zaffe, 1993). Se han realizado muchas investigaciones acerca de los aceros inoxidable dúplex (Beloti, Rollo, Itma Filho, & Rosa, 2004) (Gómez, 2009) (Gregorutti, Grau, Sives, & Elsne, 2016), motivado a su constante desarrollo (IMOA, 2012). Pocas de estas experiencias han sido en el campo de la tribología (Straffelini, 2002) (Szyndelman, 2008) (Renedo, 2010) (Mestra, Fargas, Anglada, & Mateo, 2010) (Medina & Peralta, 2010) (Romero C., 2014) (Romero C, 2016), y por consiguiente, aún no se conoce suficientemente algunas de sus propiedades o comportamiento ante las sollicitaciones tribológicas, en particular su respuesta ante el desgaste.

El desgaste se puede considerar como la pérdida continua indeseable de material de una o ambas superficies del apareamiento de elementos tribológicos debido al movimiento relativo de las superficies. El desgaste es determinado por las variables de funcionamiento, los tipos de materiales y la superficie involucrada, así como los factores ambientales. El desgaste puede ir acompañado de transferencia de material de una superficie a la otra. Los mecanismos de desgaste más comunes incluyen la adhesión, abrasión, fatiga superficial, la corrosión (por frotamiento) y la erosión (Kadjas, Harvey, & Wilusz, 1990). El desgaste por adhesión, es el tipo más frecuente y el menos pronosticable (Hamrock, Jacobson, & Schmid, 2000).

Por lo general, el desgaste es inversamente proporcional a la dureza. La tasa de desgaste se determina comúnmente en un tribómetro por el método espiga (pin) sobre disco, haciendo deslizar un pin sobre un disco giratorio, con carga y condiciones de lubricación controladas, en una distancia de deslizamiento conocida y midiendo la pérdida de volumen o peso. Usualmente, el volumen de desgaste, es independiente de la velocidad de deslizamiento y se expresa por la ecuación Archard como $V = K_a WL/H$, donde V , volumen de desgaste [m^3]; W , fuerza normal [N]; L , distancia del deslizamiento [m]; H es la dureza de penetración [Pa] del más blando de los dos materiales, y K_a , es el coeficiente de Archard [adimensional], una medida de la probabilidad de que la interacción entre las asperezas de las dos superficies en contacto producirá una partícula de desgaste (Archard, 1953). El factor $K = K_a/H$ es

el coeficiente o tasa de desgaste [Pa^{-1}] y es una característica del sistema tribológico deslizante en función de los materiales usados, las condiciones de operación, el proceso de lubricación y el lubricante.

En el presente artículo se expone un estudio tribológico realizado a un acero austenítico- ferrítico (súper dúplex) con la finalidad de obtener mayor información para presentarlo como opción en aplicaciones donde la durabilidad es una consideración de diseño importante. Se reportan los resultados del desgaste de los ensayos en un tribómetro tipo bola sobre anillo, desarrollados en muestras de acero dúplex SAF 2507 en condiciones de deslizamiento en seco.

MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se describe brevemente el material de prueba, el diseño experimental y las técnicas utilizadas para medir las variables seleccionadas.

Preparación de las muestras

Las muestras o probetas del acero inoxidable austenítico ferrítico (dúplex) tipo SAF 2507 se obtuvieron a partir de una barra tubular de 150 mm de largo, 32 mm de diámetro externo y espesor de 2 mm, dicha barra se cortó en secciones de 10 mm de ancho, obteniéndose solo 12 probetas, que luego se ensamblaron con un ajuste a presión en cilindros de bronce a fin de instalarlas en el tribómetro. En cuanto a la preparación, se realizó una limpieza con un baño ultrasónico de alcohol y acetona, con la finalidad de eliminar en lo posible todo residuo en la superficie de las probetas.

Las bolas utilizadas fueron de acero AISI 52100 de 6 mm de diámetro, obtenidas a partir de cojinetes disponibles comercialmente. Se seleccionó dicho material como contraparte por su elevada dureza, aproximadamente cuatro veces más duro que el acero en estudio, en concordancia con lo sugerido por Rabinowicz (1965). Lo anterior, permitió no considerar el desgaste de la bola en los cálculos de volumen de desgaste, al igual que la observación directa de su mecanismo sobre el material en evaluación. Estas bolas se extrajeron de su pista mediante el uso de un desarmador, luego de lo cual fueron limpiadas con acetona y alcohol en baño ultrasónico, a fin de eliminar la capa de lubricante. Se empleó una bola diferente en cada prueba.

Ensayo de rugosidad y dureza

Se realizó una caracterización inicial del acero en estudio, al medir la rugosidad promedio, R_a , en sentido circunferencial, ya que este corresponde al sentido del movimiento, donde se utilizó un rugosímetro de punta

de diamante. Igualmente, se midió la dureza HRB en un durómetro tipo Rockwell. Ambas mediciones se realizaron en equipos disponibles en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

Ensayo de desgaste por deslizamiento

Los ensayos de desgaste por deslizamiento se llevaron a cabo en un Tribómetro tipo bola sobre anillo disponible en el Laboratorio de Predicciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo, el cual es un desarrollo propio (Turkintong, 1980) (Medina & Peralta, 2010) (Gloriet, 2012), y su configuración se muestra en las imágenes de la figura 1. Los parámetros que se pueden controlar en el tribómetro descrito son la carga normal, velocidad de deslizamiento y distancia o tiempo de duración del ensayo. En cuanto al movimiento, en esta máquina el anillo de prueba se instala sobre el eje del equipo, por lo cual este es el elemento móvil; por su parte, la bola se coloca en una porta-esfera directamente en la barra de carga, por lo que permanece estacionaria, resultando un movimiento giratorio de contacto lineal. Los datos referente a la fricción, se obtuvieron a partir del sistema automático de adquisición de datos y un programa desarrollado para este fin, el cual registra, la velocidad de giro, la carga normal, la fuerza de roce, el tiempo de ensayo y el coeficiente de fricción, entre otros parámetros, a medida que se desarrolla cada prueba.

Diseño experimental

La matriz de ensayo se planificó en función de evaluar los parámetros: carga normal, velocidad de deslizamiento y distancia, de acuerdo a condiciones de operación de una aplicación biomédica, considerando las limitaciones hardware del equipo de ensayo y optimización la cantidad de material (probetas) en estudio disponible. Se trató emular las condiciones carga, velocidad y recorrido, a las cuales se sometería los implantes y las prótesis de remplazo total de extremidades inferiores (cadera y rodilla), sometidas a condiciones al andar y de marcha moderada (trote) (Vaughan, Davis L, & O'Connor, 1999) (McGloughlin & Kavanagh, 2000) (Rodríguez, Urriolagoitia Sosa, Torres, Hernández, & Urriolagoitia Calderon, 2013). No obstante a que la aplicación biomédica en consideración es lubricada (con fluidos corporales o fluido sinovial) bajo régimen de película límite (Myant & Cann, 2014), se consideró una evaluación en seco (sin lubricante), a fin de establecer una base preliminar para futuros ensayos con lubricante y adicionalmente, permitir la comparación con otras investigaciones donde se empleó un acero inoxidable dúplex sin lubricante (Szyndelman, 2008) (Renedo, 2010) (Mestra, Fargas, Anglada, & Mateo, 2010). Las condiciones de ensayo seleccionadas son mostradas en la tabla 1.

Se desarrolló un diseño experimental basado en la metodología de arreglos ortogonales de Taguchi (DET), lo que permitió optimizar la cantidad de probetas disponibles y el análisis del efecto de los parámetros sobre el desgaste mediante la razón señal a ruido, S/N , y así determinar la influencia en los resultados de los parámetros seleccionados sobre el volumen y coeficiente de desgaste. El procedimiento general de la aplicación de la metodología DET se encuentra en Roy (Roy, 2010). Al aplicar esta metodología tomando como base los parámetros y niveles de ensayo se obtuvo la matriz L_9 la cual se presenta en la tabla 2. Motivado a la poca cantidad de material de estudio disponible (probetas), razón principal por la cual se decidió por un DTE, cada experimento solo se pudo realizar con una repetición (dos replicas), así considerar la variabilidad de la respuesta (ASTM, 2004), con una confianza razonable (80%).

Análisis estadístico de los datos

Una vez ejecutada la experimentación prevista en el diseño experimental y obtenidos los resultados para cada ensayo realizado, estos fueron utilizados para determinar el efecto de los parámetros y niveles en dichos resultados. Las observaciones experimentales se transformaron en una proporción de señal a ruido (S/N). En el DET (Roy, 2010), la relación S/N combina tanto el nivel medio (señal) del carácter y su variación en torno a esta media (ruido). Tres funciones de pérdida de la relación S/N están disponibles dependiendo del tipo de característica, es decir, más pequeño es mejor, nominal es mejor y más grande es mejor. De estas funciones, "más pequeño es mejor característica" es la más adecuada para describir el volumen y coeficiente desgaste mínimo y por lo tanto seleccionado para identificar el parámetro más influyente en el desgaste por deslizamiento en seco del SAF 2507.

La relación S/N como más pequeño es mejor característica puede ser calculado como la transformación logarítmica de la función de pérdida que se describe con la ecuación:

$$S/N = -10 \log \frac{\sum y_i}{n}$$

Donde n es el número de observaciones y y_i son los datos observados (Roy, 2010), es decir, el volumen o el coeficiente de desgaste por deslizamiento en seco.

Una vez calculados el número S/N para cada parámetro y nivel, se calcula el valor de la diferencia, $\Delta (S/N_{mayor} - S/N_{menor})$ del S/N de cada parámetro. A medida que este Δ sea mayor, mayor será la influencia del parámetro en el desempeño en evaluación (Roy, 2010).

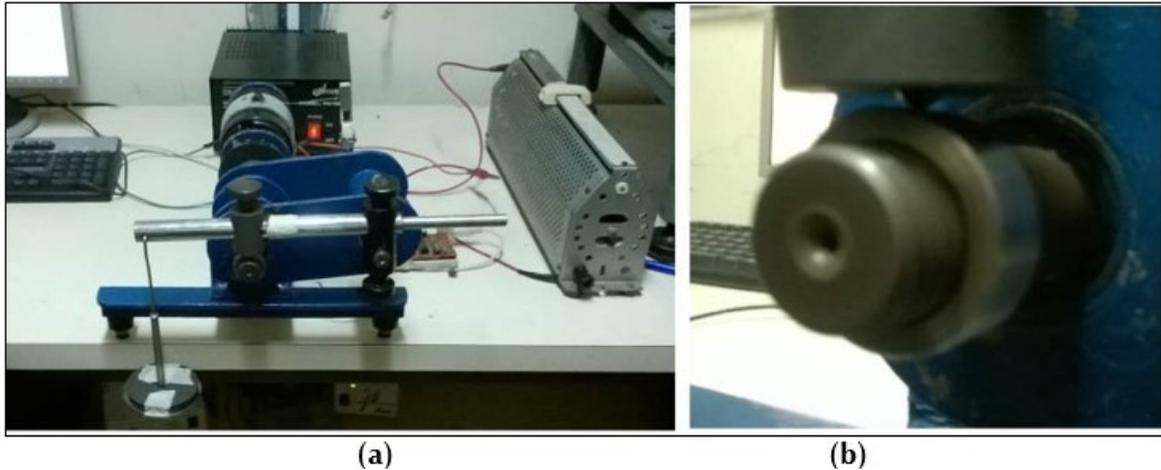


Figura 1. Tribómetro tipo bola sobre anillo (a) arreglo general del dispositivo (b) detalle de la geometría del contacto.

Tabla 1. Condiciones del ensayo de desgaste por deslizamiento.

TIPO DE ENSAYO: Bola sobre anillo							
TIPO DE MOVIMIENTO: Deslizamiento lineal							
VARIABLES OPERATIVAS							
CARGA (N)			VELOCIDAD (m/s)		DISTANCIA (m)		
9	19	29	0,9	2	500	1000	2000
ESTRUCTURA DE LOS TRIBO-SISTEMAS							
CARACTERISTICAS	TRIBOELEMENTO 1		TRIBOELEMENTO 2		ATMOSFERA		
Tipo de material/ elemento	AISI 52 100/ Bola		SAF 2507/ Anillo		AIRE		
Geometría y dimensiones	Esférico D=6mm		Cilíndrico D=32mm		Sin Lubricante		
Composición (% peso)	1,35 - 1,65 Cr 0,9 - 1,10 C 0,15 - 0,35 Si 0,25 - 0,45 Mn ⁽¹⁾		25 Cr; 7 Ni; 4 Mo; 0,25 N ⁽²⁾		NO APLICA		
Dureza promedio	838 HV ⁽¹⁾		95,94 HRb		NO APLICA		
Rugosidad promedio	0,01 µm ⁽¹⁾		0,1625 µm		NO APLICA		
(1) Valores típicos extraídos de ASTM G 99-04. (2) Valores típicos tomados de IMO A (2012).							

Tabla 2. Diseño de ensayos mediante metodología Taguchi.

Experimento	Carga (N)	Velocidad (m/s)	Distancia (m)
1	9	0,9	500
2	9	2	1000
3	9	2	2000
4	19	0,9	1000
5	19	2	2000
6	19	0,9	500
7	29	0,9	2000
8	29	2	500
9	29	2	1000

Adicionalmente, se realizó una interpretación de los resultados experimentales por análisis de la varianza (Anova). El análisis Anova generalmente se realiza sobre resultados experimentales con el fin de identificar los parámetros de control que son estadísticamente significativos (DeCoursey, 2003).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presenta los resultados logrados y el análisis e interpretación de los mismos al evaluar el comportamiento ante el desgaste del acero súper dúplex. La evaluación de la respuesta ante la fricción del acero en estudio puede encontrarse en (Romero C, 2016).

Caracterización superficial del material estudiado

Una de las propiedades de superficie evaluadas del material en estudio fue la rugosidad, la cual se conoce que afecta el comportamiento ante la fricción y el desgaste. Los resultados de los ensayos de rugosidad reportaron un valor promedio, luego de cinco repeticiones, de $R_a = 0,1625 \mu\text{m}$ con desviación estándar de 0,01280. La norma ASTM G77-98 (ASTM, 2004), tomada como referencia para esta evaluación, específica para anillo una rugosidad entre $0,152 \mu\text{m}$ y $0,305 \mu\text{m}$ en la dirección del movimiento. Como se puede notar, la rugosidad promedio obtenida cumple con las especificaciones que indica la norma referida.

La otra propiedad de superficie evaluada fue la dureza del material en estudio, la cual es requerida para obtener el volumen y el coeficiente de desgaste por los modelos comúnmente utilizados. El resultado del ensayo realizado en escala Rockwell B con una carga de 100 kg

y cinco repeticiones, correspondió a un valor promedio de 95,94 con desviación estándar de 1,5143. Se puede apreciar que la dureza medida es mayor (9% más duro) que la obtenida para el acero inoxidable austenítico (Gregorutti, 2016), lo que suponen prever una mejor resistencia del acero dúplex SAF 2507 al desgaste que estos aceros inoxidables.

Respuesta del material evaluado ante el desgaste por deslizamiento

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del coeficiente de desgaste, a partir del ensayo tribológico, siguiendo la norma ASTM G-77 modificada (Medina & Peralta, 2010), donde se sustituyó el bloque por una esfera o bola, dando como resultado que el espécimen de prueba corresponde al anillo y la contraparte de fricción corresponde a la bola. Se ejecutó la matriz de experimentos en el acero inoxidable dúplex SAF 2507 con la metodología descrita en la sección anterior.

Análisis fenomenológico del volumen y coeficiente de desgaste

En la tabla 3 se listan los resultados experimentales de la evaluación del comportamiento de desgaste por adhesión del acero dúplex SAF 2507 para las condiciones de operación propuestas en las pruebas diseñadas, reportando los datos para el volumen de desgaste y el coeficiente de desgaste. Todos los experimentos se muestran con dos repeticiones, señalados con los subíndices a y b. La tabla 3 se muestra los valores para el volumen de desgaste para cada experimento, los cuales resultaron en un intervalo $1,50080$ a $45,70682 \text{ mm}^3$ para las condiciones evaluadas. En las gráficas de la figura 2, se muestra el comportamiento del volumen de desgaste como

Tabla 3. Resumen de resultados experimentales del comportamiento de desgaste por deslizamiento para el acero inoxidable dúplex SAF 2507 para condiciones de evaluación que se especifican.

Experimento	Carga [N]	Velocidad [m/s]	Distancia [m]	Volumen Desgaste [mm ³]	Coefficiente Desgaste x10 ⁻¹² [m ² /N]
1a	9	0,9	500	1,59922	0,35538
1b	9	0,9	500	1,50080	0,33351
2a	9	2	1000	2,70288	0,30032
2b	9	2	1000	3,96945	0,44105
3a	9	2	2000	4,57219	0,25401
3b	9	2	2000	3,83490	0,21305
4a	19	0,9	1000	8,03054	0,42266
4b	19	0,9	1000	11,40330	0,60017
5a	19	0,9	2000	12,65760	0,33309
5b	19	0,9	2000	14,02400	0,36905
6a	19	2	500	9,51522	1,00160
6b	19	2	500	2,41830	0,25456
7a	29	0,9	2000	38,25569	0,65958
7b	29	0,9	2000	45,70682	0,78805
8a	29	2	500	4,61487	0,31827
8b	29	2	500	5,54934	0,38271
9a	29	2	1000	2,89906	0,09997
9b	29	2	1000	8,46182	0,29179

una función de la carga normal, la velocidad de deslizamiento y la distancia de deslizamiento, donde se puede observar la relación entre estos parámetros.

Del análisis de los datos en la tabla 3 y de la figura 2, se infiere la respuesta del volumen de desgaste, como una función de la velocidad de deslizamiento. Se aprecia que para un valor bajo de carga, el volumen de desgaste se incrementa ligeramente para los cambios de velocidad, sin embargo, para un valor alto de carga, el volumen de desgaste decrece con el incremento de la velocidad de deslizamiento. Este comportamiento no corresponde con el modelo de Archard, el cual considera que el desgaste es independiente de la velocidad. Este efecto de la velocidad puede ser explicado en términos del concepto del tercer cuerpo (Stachowiak, 2005). Una vez formada las partículas de desgaste (desechos), estas son atrapadas y su velocidad de expulsión, tiende a disminuir por la alta velocidad del desplazamiento y la mayor presión de contacto.

Por otro lado, se deduce el efecto de la carga sobre el volumen de desgaste donde, en general, se aprecia que el volumen de desgaste incrementa con el incremento de la carga normal en las condiciones de operación evaluadas, esta proporcionalidad valida la ecuación de Archard. Este comportamiento supone la generación de más desechos de desgaste en el área de contacto por la mayor presión hertziana presente. Finalmente, se interpreta el efecto de la distancia o duración del deslizamiento sobre el volumen de desgaste. Se observa que el volumen de desgaste, en general, incrementa con el incremento de la distancia de deslizamiento, esta proporcionalidad es la descrita por la ecuación de Archard. Además, en la curva se puede notar distintos cambios de pendiente, lo que es indicativo de zonas de transición, ya reportado por en otras investigaciones (Mestra, Fargas, Anglada, & Mateo, 2010).

Los efectos discutidos del comportamiento proporcional del volumen respecto a la variación de la carga normal y

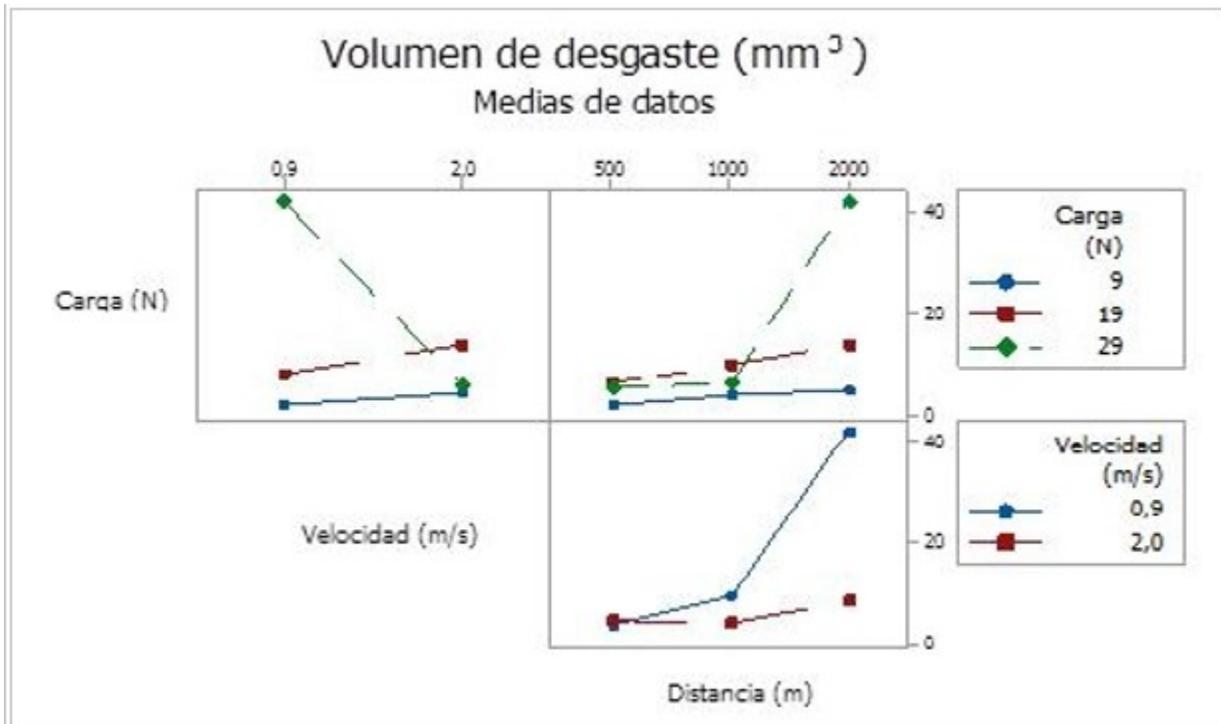


Figura 2. Respuesta de volumen de desgaste promedio vs carga normal, velocidad de deslizamiento y distancia recorrida del acero inoxidable dúplex SAF2507.

distancia de deslizamiento, ratifican la validez de la utilización de la ecuación Archard, para determinar el coeficiente de desgaste por deslizamiento, si se obvia el efecto de la velocidad. Los valores obtenidos del coeficiente de desgaste o tasa de desgaste para las condiciones evaluadas de cada experimento, están disponibles en la tabla 3. Estos valores del coeficiente de desgaste se encuentran en un intervalo de $0,09997 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ a $1,00160 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, para el acero dúplex SAF 2507 evaluado, siendo este rango típico del desgaste moderado a severo (Bayer, 2004) (Wang, Lei, & Liu, 1999). También concuerdan con mecanismo típicos correspondiente al desgaste por delaminación o adhesión (Suh N., 1973) (Suh N. P., 1986). Adicionalmente, los valores logrados son menores que al obtenido en el trabajo de Renedo para el acero austenítico (Renedo, 2010).

En la figura 3, se muestra el comportamiento del coeficiente de desgaste promedio como una función de los parámetros ensayados y donde se observa la relación de esta variable para la velocidad deslizamiento, la carga normal y la distancia de deslizamiento ensayada. De la figura 3, se observa que el coeficiente de desgaste decrece con el incremento de la distancia de deslizamiento, para el valor bajo y medio de carga normal. Por ejemplo, para las condiciones de carga de 19 N y la velocidad de deslizamiento de 0,9 m/s, en el intervalo de 1000 a 2000 m el coeficiente de desgaste disminuye desde

$0,51142 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ a $0,35107 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, es decir una caída de 31,35%. Para el valor alto de carga, el coeficiente de desgaste muestra un comportamiento muy irregular, decrece en el recorrido de 500 a 1000 m y luego aumenta de 1000 a 2000 m, lo cual puede considerarse como una transición de desgaste moderado a severo. Respecto al efecto de la carga normal, en general el coeficiente de desgaste aumenta con el aumento de la carga, siendo este comportamiento más relevante a baja que a alta velocidad de deslizamiento. Por último, se nota el efecto de la baja velocidad de deslizamiento de aumentar el coeficiente de desgaste en comparación con el valor alto de velocidad, incrementándose este efecto con la distancia de deslizamiento. Para las condiciones evaluadas, los valores del coeficiente de desgaste promedio se sitúan en valores desde $0,19588 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ hasta $0,72381 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, para el acero dúplex SAF 2507 en estudio.

Análisis de la relación señal a ruido - S/N

Como se expuso en la sección anterior, el DET permite el análisis de la dispersión de los datos recolectados mediante la determinación de la relación señal a ruido, o número S/N, y así determinar cuál de los parámetros variados ejerce su mayor influencia. Esto se ha hecho mediante el programa Minitab®, específicamente utilizado para aplicaciones de diseño experimental. En la tabla 4 se resume la matriz de ensayos con los valores del

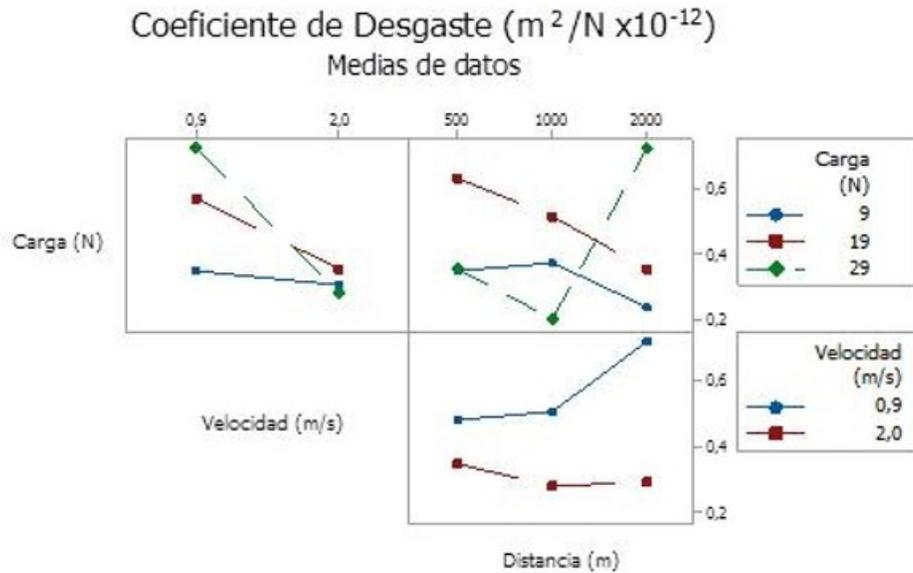


Figura 3. Respuesta del coeficiente de desgaste promedio en función de la carga normal, la velocidad de deslizamiento y la distancia recorrida del acero inoxidable dúplex SAF2507.

Tabla 4. Respuesta de la relación S/N del coeficiente de desgaste por deslizamiento para del acero inoxidable dúplex SAF2507 calculado para cada experimento.

Experimento	Carga (N)	Velocidad (m/s)	Distancia (m)	S/N
1	9	0,9	500	9,2532
2	9	2	1000	8,4662
3	9	2	2000	12,5999
4	19	0,9	1000	5,6956
5	19	2	2000	9,0807
6	19	0,9	500	2,7246
7	29	0,9	2000	2,7734
8	29	2	500	9,0699
9	29	2	1000	13,2270

Tabla 5. Análisis de la relación señal a ruido, S/N para coeficiente de desgaste del acero inoxidable dúplex SAF 2507.

Nivel	Carga (N)	Velocidad (m/s)	Distancia (m)
1	10,106	5,112	7,016
2	5,834	10,489	9,130
3	8,357		8,151
□	4,273	5,377	2,114
Posición	2	1	3

Tabla 6. Análisis Anova para el coeficiente de desgaste del acero inoxidable dúplex SAF 2507.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Carga (N)	2	0,04119	0,02059	0,52	0,610
Velocidad (m/s)	1	0,22336	0,22336	5,59	0,036
Distancia (m)	2	0,02347	0,01173	0,29	0,751
Error	12	0,47983	0,03999		
Total	17	0,82740			

número S/N del coeficiente de desgaste para cada experimento del caso estudiado. En la tabla 5 se muestra la respuesta para relaciones S/N (considerando el más pequeño es mejor) para el coeficiente de desgaste, resultando de la interpretación de la posición calculada para cada factor, que la velocidad de deslizamiento es el parámetro con el mayor efecto sobre el coeficiente de desgaste (es la mayor diferencia en las relaciones de S/N), seguido por la carga normal y por último, la distancia de deslizamiento, el parámetro que tiene el menor efecto en el coeficiente de desgaste, por presentar la menor diferencia de las relaciones S/N . Adicionalmente, de la tabla 5 se desprende que los niveles óptimos de los parámetros evaluados (los valores más altos de S/N), que orientan obtener un mínimo coeficiente de desgaste con la menor varianza, corresponde a la combinación factores: la carga normal de 9 N, la velocidad de deslizamiento de 2 m/s y la distancia de deslizamiento de 1000 m.

Análisis de varianza

Al interpretar la información derivada del Anova, mostrado en la tabla 5, resulta que en los experimentos realizados solo el parámetro de velocidad de deslizamiento es estadísticamente significativo al reportar el valor de la probabilidad, p , menor que 0,05 (nivel de significancia de 95%). Por lo tanto, se corrobora que la velocidad de deslizamiento afecta la respuesta del coeficiente de desgaste del material, como se indicó anteriormente.

Análisis tribológico mediante microscopía

En esta sección se presentan los resultados y la evaluación de la huella de desgaste realizada en el microscopio óptico (MO) y así proceder a identificar el régimen y el mecanismo de desgaste por deslizamiento.

En la tabla 7 y 8 se muestran las imágenes o micrografías de las huellas de desgaste obtenidas en cada prueba, en una imagen general realizadas mediante MO a una magnificación de 200x. Las micrografías fueron tomadas iniciando en un punto marcado como referencia y luego, girando en sentido del movimiento a cuatro posicio-

nes a 90° una de la otra, de manera de tener una visión de la marca de desgaste en la circunferencia del anillo.

Las imágenes de las tablas 7 y 8, en general muestran una marca (huella) de deslizamiento con mucho daño superficial, indicando condiciones de desgaste de moderado a severo para las condiciones evaluadas. Este desempeño se corrobora con los valores obtenidos del coeficiente de desgaste, los cuales son mayores a $20 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$, que de acuerdo a Wang (Wang, Lei, & Liu, 1999) indica la transición para el desgaste de moderado a severo en aceros. Adicionalmente, el mecanismo de desgaste es de adhesión y de delaminación, puesto que el proceso dominante se destaca por la transferencia de material, deformación plástica, la formación de grietas y la generación de capa tribológicas y su desprendimiento durante el desplazamiento (Suh N. P., 1986), como lo evidencia, por ejemplo, las micrografías correspondientes a los experimentos 3, 4, 5, 7, 9. En particular, en la micrografía de la posición 2 del experimento 3a y 5a (ver tabla 7), se puede apreciar agrietamiento y deformación plástica severa, estimándose un mecanismo de desgaste por delaminación a alta velocidad, que con el valor de coeficiente de desgaste de 0,254 a $0,333 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ esta en concordancia con lo mostrado en los mapas de desgaste desarrollados por Ashby y Lim (Ashby & Lim, 1990).

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos durante esta investigación se concluye lo siguiente:

- El acero SAF 2507 alcanzó valores para el coeficiente de desgaste promedio en el intervalo de $0,19588 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ hasta $0,72381 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, en condiciones de deslizamiento en seco en un tribómetro tipo bola sobre anillo.
- La velocidad de deslizamiento es el parámetro que tiene el mayor efecto sobre el coeficiente de desgaste y la distancia de deslizamiento el parámetro que tiene el menor efecto en el coeficiente de desgaste.

Tabla 7. Micrografías por Microscopía óptica a 200X de la huella de desgaste de deslizamiento del SAF 2507 en tribómetro bola sobre anillo.

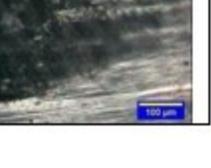
Exp.	Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4
1a				
1b				
2a				
2b				
3a				
3b				
4a				
4b				
5a				

Tabla 8. Micrograffías por Microscopía óptica a 200X de la huella de desgaste de deslizamiento del SAF 2507 en tribómetro bola sobre anillo (cont...).

Exp.	Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4
5b				
6a				
6b				
7a				
7b				
8a				
8b				
9a				
9b				

- El régimen de desgaste se desarrolló de moderado a severo para las condiciones de ensayo estudiadas. El mecanismo de desgaste identificado para el SAF 2507 es de adhesión y delaminación de alta velocidad para las condiciones evaluadas.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su especial agradecimiento a docentes, técnicos y auxiliares de investigación del Laboratorio de Materiales y del Laboratorio de Predicciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica, UC, por su valiosa colaboración en la realización de las pruebas. Al Centro de Investigación de Materiales de la Facultad de Ingeniería, UC, por el financiamiento parcial de este proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Archard, J. (1953). Contact and Rubbing of Flat Surface. *Journal of Applied Physics*, 24(8), 981 - 988.
- Ashby, M. F., & Lim, S. C. (1990). Wear-Mechanism Maps. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 24, 805-810.
- ASTM. (2004). ASTM Wear and Erosion; Metal Corrosion: ASTM G77-98 Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test (Vol. 03.02). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Bayer, R. (2004). *Mechanical Wear Fundamentals and Testing*. New York: Marcel Dekker.
- Beloti, M., Rollo, J., Itma Filho, A., & Rosa, A. (2004). In vitro biocompatibility of duplex stainless steel with and without 0.2% niobium. *Journal of Applied Biomaterials & Biomechanics*, 2, 162-168.
- Cigada, A., Rondelli, G., Vicentini, B., Giacomazzi, M., Cremascoli, G., & Roos, A. (1989). Duplex stainless steels for osseosynthesis devices. *Journal of Biomedical Materials Research*, 23, 1087-1095.
- Cigada, A., De Santis, G., Gatti, A., Roos, A., & Zaffe, D. (1993). In Vivo Behavior of a High Performance Duplex Stainless Steel. *Journal of Applied Biomaterials*, 4, 39-46.
- DeCoursey, W. (2003). *Statistics and Probability for Engineering Applications With Microsoft® Excel*. Newnes.
- Gloriet, C. (2012). Desarrollo del sistema de medición y control de un tribómetro tipo bloque en anillo. Universidad de Carabobo. Valencia: Universidad de Carabobo.
- Gómez, L. (2009). Estudio de biocompatibilidad del acero dúplex SAF 2205. Departamento de Diseño Mecánico. Naguanagua: Universidad de Carabobo.
- Gregorutti, R. W., Grau, J. E., Sives, F., & Elsne, C. I. (2016). Mechanical, electrochemical and magnetic behaviour of duplex stainless steel for biomedical applications. *Materials Science and Technology*, 31(15), 1818-1824.
- Hamrock, B., Jacobson, B., & Schmid, S. (2000). *Elementos de Máquinas*. Mexico: McGraw-Hill.
- IMOA. (2012). *Directrices Prácticas para la fabricación de los Aceros Dúplex*. Londres: International Molybdenum Association (IMOA).
- Kadjas, C., Harvey, S., & Wilusz, E. (1990). *Encyclopedia of Tribology*. New York: Elsevier Science Publishers B.V.
- McGloughlin, T., & Kavanagh, A. (2000). Wear of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) in total knee prostheses: a review of key influences. *Proc Instn Mech Engrs Vol 214 Part H: J. Engineering in Medicine*, 214, 349-359.
- Medina, L., & Peralta, G. (2010). Evaluación de las propiedades tribológicas del Acero Dúplex. Universidad de Carabobo, Escuela de Ingeniería Mecánica. Naguanagua: Universidad de Carabobo.
- Mestra, A., Fargas, G., Anglada, M., & Mateo, A. (2010). Sliding wear behavior of a duplex stainless steel. *Key Engineering Materials*, 423, 125-130.
- Myant, C., & Cann, P. (2014). On the matter of synovial fluid lubrication: Implications for Metal-on-Metal hip tribology. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 34, 338-348.
- Rabinowicz, E. (1965). *Friction and Wear of Materials*. New York: John Wiley & Sons.
- Renedo, J. (2010). Comportamiento al desgaste por deslizamiento en aceros inoxidables: ferrítico, austenítico, dúplex y martensítico. Catalunya: Treballs academics UPC.
- Rodríguez, R., Urriolagoitia Sosa, G., Torres, C., Hernandez, L., & Urriolagoitia Calderon, G. (2013). Análisis numérico sobre esfuerzos y áreas de contacto en una PTR Scorpio II. Base para el diseño de PTR personalizada al fenotipo mexicano. *Rev. Colomb. Biotecnol.*, 15 (1), 28-41.
- Romero C, J. E. (2016, Abril). Influence of the test parameters of sliding friction of a austenitic - ferritic stainless steel using methodologies Taguchi and Anova. *Revista Ingeniería UC*, 23(1), 41 - 48.
- Romero C., J. E. (2014, Agosto). Determinación Del Comportamiento Ante El Desgaste Por Frotamiento Del Acero Dúplex SAF 2507 Usando Un Diseño Experimental Taguchi. *Revista Ingeniería UC*, 21(2), 16-26.
- Roy, R. K. (2010). *A primer on the Taguchi method* (2th ed.). Dearborn: Society of Manufacturing Engineers.
- Stachowiak, G. (2005). *Wear - materials, mechanisms and practice*. England: Wiley.
- Straffelini, G. (2002). Sliding Wear of Austenitic and Austenitic-Ferritic Stainless Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33A, 613-624.
- Suh, N. (1973). The De lamination Theory of Wear. *Wear*, 25, 111-124.
- Suh, N. P. (1986). *Tribophysics*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Szyndelman, G. (2008, Febrero). Comportamiento tribológico del acero inoxidable dúplex 2205. Catalunya: Treballs academics UPC. Retrieved Noviembre 18, 2009, from Treballs academics UPC: <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/4792>
- Turkintong, K. (1980). Diseño y fabricación de una maquina de ensayo de roce. Universidad de Carabobo. Valencia: Universidad de Carabobo.
- Vaughan, C. L., Davis L, B., & O'Connor, J. C. (1999). *Dynamics of Human Gait* (2nd ed.). Cape Town, South Africa: Kiboho Publishers.
- Wang, Y., Lei, T., & Liu, J. (1999). Tribo-metallographic behavior of high carbon steels in dry sliding: I. Wear mechanisms and their transition. *Wear*, 231, 1-11.