



Revista INGENIERÍA UC

ISSN: 1316-6832

revistaing@uc.edu.ve

Universidad de Carabobo

Venezuela

Romero C., J. E.

Influencia de los parámetros del ensayo de fricción por deslizamiento de un acero inoxidable austenítico-ferrítico usando las metodologías de Taguchi y Anova.

Revista INGENIERÍA UC, vol. 23, núm. 1, enero-abril, 2016, pp. 41-48

Universidad de Carabobo

Carabobo, Venezuela

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70745478006>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Influence of the test parameters of sliding friction of a austenitic - ferritic stainless steel using methodologies Taguchi and Anova.

J. E. Romero C.*

Centro de Investigación en Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

Abstract.-

In this article, the influence of independent control parameters of a tribometer such as normal load, sliding velocity and sliding time or distance in the sliding friction tests of a austenitic-ferritic stainless steel at ambient conditions using statistical analysis tools, are shown. The steel in study was characterized in surface properties such as roughness and hardness. Dry friction tests were performed on tribometer ball on ring type with an experimental design based on an orthogonal array of Taguchi. The friction coefficient resulted in average values from 0,213 to 0,891 for the evaluated conditions. With the techniques of statistical analysis as the ratio S/N and Anova, the significance of the control parameters friction test was determined on dry lubrication and optimum combination to minimize sliding friction was obtained. All parameters were statistically significant in the experiments, as well as their interactions. Of the three parameters assessed sliding distance proved to be the most influential parameter for dry sliding friction of the austenitic - ferritic stainless steel studied.

Keywords: sliding friction; duplex stainless steel; Taguchi method; tribology.

Influencia de los parámetros del ensayo de fricción por deslizamiento de un acero inoxidable austenítico-ferrítico usando las metodologías de Taguchi y Anova.

Resumen.-

El presente artículo se muestra la influencia de los parámetros de control independientes de un tribómetro, tales como carga normal, velocidad de deslizamiento y duración o distancia de deslizamiento, de ensayos de la fricción por deslizamiento de un acero inoxidable austenítico ferrítico en condiciones ambiente, usando herramientas de análisis estadístico. Se caracterizó el acero en estudio en cuanto a las propiedades de superficie como rugosidad y dureza. Se realizaron ensayos de fricción seca en tribómetro tipo bola sobre anillo con un diseño experimental basado en un arreglo ortogonal de Taguchi. El coeficiente de fricción resultó en valores promedio entre 0,213 a 0,891 para las condiciones evaluadas. Con las técnicas de análisis estadístico como la razón S/N y Anova, se determinó la significancia de los parámetros de control del ensayo de fricción en lubricación seca y se obtuvo la combinación óptima para minimizar la fricción por deslizamiento. Todos los parámetros resultaron estadísticamente significativos en los experimentos, al igual que sus interacciones. De los tres parámetros evaluados, la distancia de deslizamiento resultó ser el parámetro más influyente para la fricción por deslizamiento en seco del acero inoxidable austenítico - ferrítico estudiado.

Palabras clave: fricción por deslizamiento; acero dúplex; método Taguchi; tribología.

Recibido: Diciembre 2015

Aceptado: Abril 2016

*Autor para correspondencia

Correo-e: joromer@uc.edu.ve (J. E. Romero C.)

1. Introducción

Los aceros inoxidables 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, entre otros, gracias a su alta resistencia a la corrosión y bajos costos, en comparación con el acero inoxidable 316L y aleaciones de titanio, materiales preferidos en esta aplicación [1, 2]. Se han realizado muchas investigaciones acerca de los aceros inoxidables dúplex motivado a su constante desarrollo, alcanzando en la actualidad la cuarta generación [3]. Pocas de estas experiencias han sido en el campo de la tribología [4, 5, 6, 7, 8, 9], y por consiguiente, aún no se conoce suficientemente algunas de sus propiedades o comportamiento ante las sollicitaciones tribológicas, en particular su respuesta a la fricción.

El comportamiento friccional es afectado por una amplia lista de factores [10], como por ejemplo, la cinemática de las superficies en contacto y la aplicación externa de carga o desplazamiento, lo que indica que el coeficiente de fricción (COF) no es una propiedad del material. Para la comprensión del comportamiento friccional de los materiales se han planteado distintas teorías: el modelo de adhesión, el modelo de energía de superficie, modelo de deformación plástica, el modelo de rugosidad, el modelo combinado adhesión-surcado-rugosidad y el modelo deformación-surcado-adhesión [10]. Este último, demuestra una mejor correlación entre el COF teórico y el experimental [11].

El diseño experimental de Taguchi (DET) es una herramienta de análisis potente para modelar y analizar la influencia de diversos parámetros o factores de control en el comportamiento de la variable dependiente estudiada. Proporciona un enfoque sencillo, eficiente y sistemático para optimizar los factores de control del desempeño, la calidad y el costo. Este diseño experimental incluye tres etapas: la fase de planificación, la fase ejecución y la fase de interpretación. En la fase de planificación, se debe dar una importancia máxima a la identificación de los diversos factores de control. Después de la ejecución de los experi-

mentos, los datos son recogidos y analizados para determinar el efecto de varios factores de control en la respuesta del desempeño evaluado. Para reducir al mínimo el número, el costo y tiempo de los experimentos, este método generalmente usa un enfoque factorial fraccional y puede ser logrado con la ayuda de matrices ortogonales [12].

En el presente artículo se expone un estudio tribológico realizado a un acero auténtico-ferrítico (dúplex) para determinar el efecto o influencia de los parámetros de un ensayo de fricción por deslizamiento mediante el empleo de metodología de Taguchi y el análisis estadístico de datos. Se reportan los resultados de los ensayos desarrollados en especímenes de acero dúplex SAF 2507 sin tratamiento térmico en aire, sin lubricación y a temperatura, presión y humedad normal de un laboratorio.

2. Metodología Experimental

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

2.1. Preparación de los especímenes

Las probetas o especímenes del acero inoxidable auténtico ferrítico (dúplex) tipo SAF 2507 se obtuvieron a partir de una barra tubular de 32 mm de diámetro externo, dicha barra se cortó en sección de 10 mm de ancho, luego se ensamblaron con un ajuste a presión en cilindros de bronce a fin de lograr instalarlas en el tribómetro disponible. En cuanto a la preparación, a los especímenes se le realizaron una limpieza con un baño ultrasónico, con la finalidad de eliminar en lo posible todo residuo en la superficie.

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. 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 para cada espécimen.

2.2. Ensayo de rugosidad y dureza

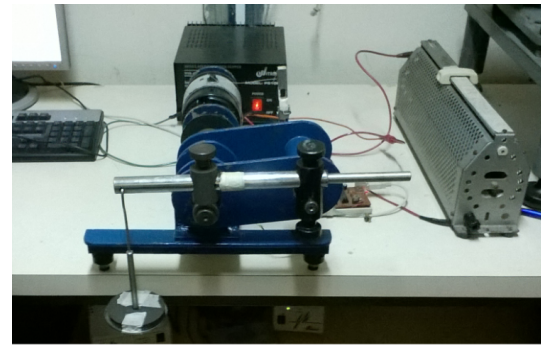
Se realizó una caracterización inicial del acero en estudio, al medir la rugosidad promedio, R_a , en sentido circunferencial, ya que este corresponde al sentido del movimiento, se utilizó un rugosímetro de punta de diamante. Igualmente, se midió la dureza en Rockwell B, en equipos disponibles en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

2.3. Ensayo de fricción por deslizamiento

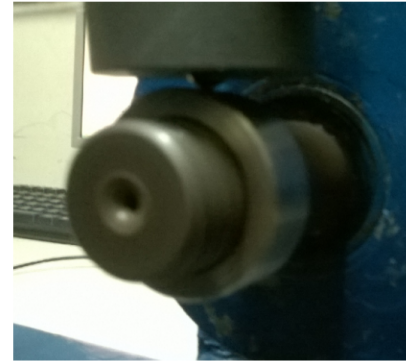
Los ensayos de fricción por deslizamiento se llevaron a cabo en un tribómetro tipo bola sobre anillo que se encuentra en el Laboratorio de Predicciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo, el cual es un desarrollo propio [7, 13, 14], y su esquema se muestra en la Figura 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 registró, la velocidad de giro, la carga normal, la fuerza de roce, el tiempo de ensayo y el coeficiente de roce, entre otros parámetros, a medida que se desarrolló cada experimento.

2.4. Diseño experimental de Taguchi

La matriz de ensayo se planificó en función de evaluar los tres parámetros antes mencionados, carga normal, velocidad de deslizamiento y distancia para una aplicación biomédica y considerando las limitaciones del equipo de ensayo. Se pretendió simular las condiciones a las cuales



(a) Arreglo general del dispositivo



(b) Detalle de la geometría del contacto

Figura 1: Tribómetro tipo bola sobre anillo.

se someterían dispositivos ortopédicos de extremidades inferiores al andar, por ejemplo, en una prótesis de rodilla se puede verificar un esfuerzo máximo de aproximadamente $37MPa$ [15] y una velocidad tangencial relativa de $0,16m/s$ [16]. Estas condiciones no son posibles emularlas en el tribómetro seleccionado por sus bajas magnitudes, así que se optó por los parámetros y niveles mostrados en la Tabla 1, que puede permitir la comparación con otras investigaciones [4, 5, 7]. En cuanto a las pruebas, estas se realizaron en condiciones de lubricación seca y ambiente normales en laboratorio.

Tabla 1: Parámetros y niveles del ensayo de fricción por deslizamiento.

N°	Parámetro Nombre	Niveles		
		Bajo	Medio	Alto
1	Carga (N)	9	19	29
2	Velocidad (m/s)	0,9		2
3	Distancia (m)	500	1000	2000

Se desarrolló un diseño experimental basado en

la metodología de arreglos ortogonales de Taguchi (DET), debido a la limitación en la cantidad de material. El DET permitió optimizar las probetas disponibles y el análisis de la razón señal a ruido, S/N , determinar la influencia en los resultados de los parámetros seleccionados. El procedimiento general de la aplicación de la metodología DET se encuentra en [12]. Al aplicar esta metodología tomando como base los parámetros de ensayo se obtuvo la matriz ortogonal L9 la cual se presenta en la Tabla 2. Cada ensayo se realizó con una repetición para conocer la variabilidad en los parámetros seleccionados.

Tabla 2: Matriz de ensayos.

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

2.5. Análisis estadístico de los datos

Una vez ejecutada la experimentación prevista en el diseño experimental y obtenidos los resultados para cada ensayo realizado, estos pueden ser utilizados para determinar el efecto de los parámetros y niveles en dichos resultados.

Para determinar la influencia de cada factor o parámetro en los resultados se cuenta con el análisis S/N , señal (nivel medio) a ruido (variación respecto a la media), el cual se calculó para cada experimento con el criterio “el nominal es el mejor”, llevado a cabo al aplicar las siguientes ecuaciones:

$$S/N_i = 10 \log \left(\frac{\bar{y}_i^2}{S_i^2} \right)$$

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{u=1}^{N_i} y_{i,u}$$

$$S_i^2 = \frac{1}{N_i - 1} \sum_{u=1}^{N_i} (y_{i,u} - \bar{y}_i)^2$$

Donde,

i : número de experimento,

u : número de prueba,

N_i : número de pruebas por experimento i .

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

Adicionalmente, se realizó una interpretación de los resultados experimentales por análisis de promedio y 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 [17].

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización superficial de los especímenes estudiados

Una de las propiedades de superficie evaluadas del material en estudio fue la rugosidad, la cual se conoce que afecta la fuerza de fricción en su componente de rugosidad [10]. Los resultados de los ensayos de rugosidad reportaron un valor promedio, luego de cinco repeticiones, de $R_a = 0,1625 \mu m$ con desviación estándar de 0,01280. La norma ASTM G77-98 [18], tomada en referencia para esta evaluación, específica para anillo una rugosidad entre $0,152 \mu m$ a $0,305 \mu m$ 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 se conoce que contribuye a la fricción en su componente de adhesión y surcado (“plowing”) [10]. El resultado del ensayo realizado en escala Rockwell B con una carga de 100kg y cinco repeticiones, correspondió a un valor promedio de 95,94 con desviación estándar de 1,5143. Se aprecia que el acero SAF 2507 es un 9 % más duro que el acero inoxidable

austenítico ANSI 316L generalmente empleado en aplicaciones biomédicas.

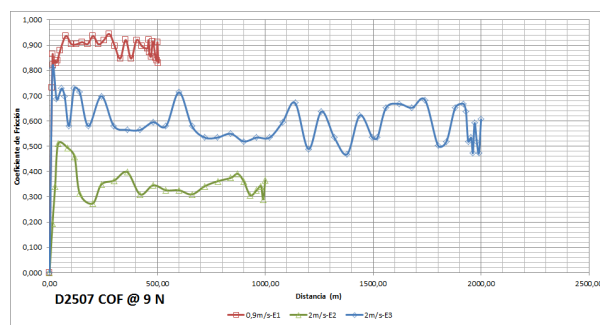
3.2. Respuesta del material evaluado a la fricción por deslizamiento

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del coeficiente de fricción, COF, a partir del ensayo tribológico, siguiendo la norma ASTM G-77 modificada [7], donde se sustituyó el bloque por una esfera o bola, dado como resultado que el espécimen corresponde al anillo y la bola a la contraparte de fricción.

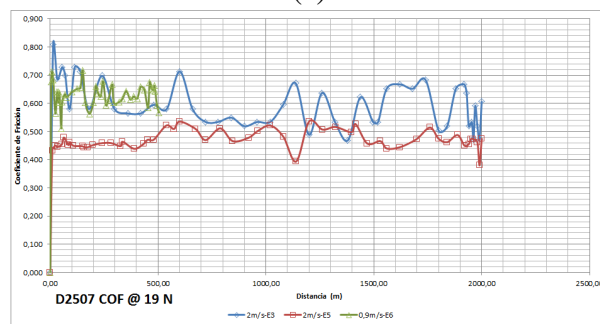
Se ejecutó la matriz de experimentos en el acero inoxidable dúplex SAF 2507 con la metodología descrita en la sección anterior. El tribómetro, arrojó mediante la captura del sistema de adquisición de datos, los valores del COF para las condiciones evaluadas en a intervalos de tiempo aproximadamente regulares. En la Figura 2 se presentan una serie de curvas de los resultados del COF en función de la distancia ensayada, cada gráfico muestra en línea continua, el valor promedio de las réplicas de cada experimento.

Al observar los gráficos (a), (b) y (c) de la Figura 2, del comportamiento general de la COF del acero SAF 2507, no se apreció un periodo estable definido, sino una serie periodos de transición a lo largo del recorrido, ya reportado en otras investigaciones para el acero dúplex [4, 5, 7], esto se atribuye a las velocidades seleccionadas (mayor a $0,8m/s$), a la condición de superficie (baja rugosidad), a la severidad del contacto en la interface (un contacto lineal) y al mecanismo de desgaste predominante (delaminación). Por consiguiente, se consideró un régimen moderadamente estable, resolviendo tomar un promedio de todos los datos obtenidos como la respuesta de COF reportado para el acero evaluado. En la Tabla 3 se muestran los resultados para cada experimento logrado, donde los valores del COF promedio de los experimentos resultaron en entre 0,213 a 0,891 para las condiciones evaluadas, lo cual se considera un comportamiento friccional de moderado a severo.

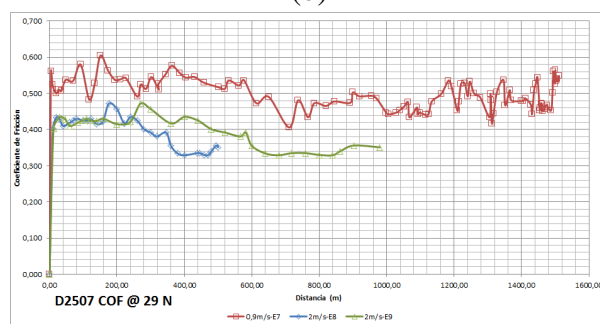
De los datos expuestos en la Tabla 3 se comprueba que el COF promedio es menor a medida que la carga normal aplicada es mayor a



(a)



(b)



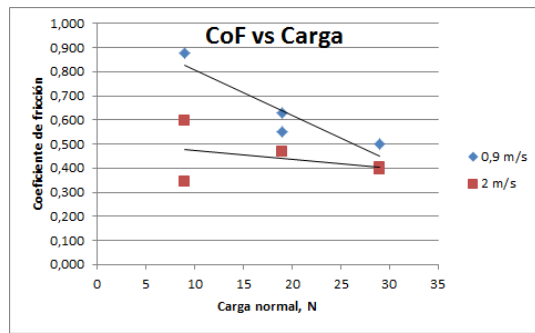
(c)

Figura 2: Resultados de COF de cada experimento en función de la distancia de deslizamiento.

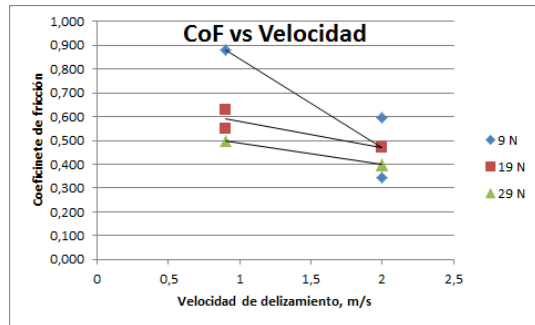
Tabla 3: Resumen de resultados para COF del SAF 2507.

Experimento	Evento A	Evento B	Promedio	Desviación
1	0,8911	0,8661	0,8786	0,0177
2	0,2126	0,4720	0,3423	0,1834
3	0,5681	0,6253	0,5967	0,0405
4	0,5748	0,5237	0,5492	0,0361
5	0,4463	0,4939	0,4701	0,0337
6	0,6118	0,6477	0,6298	0,0254
7	0,5332	0,4664	0,4998	0,0472
8	0,4017	0,3872	0,3945	0,0103
9	0,3914	0,4120	0,4017	0,0146

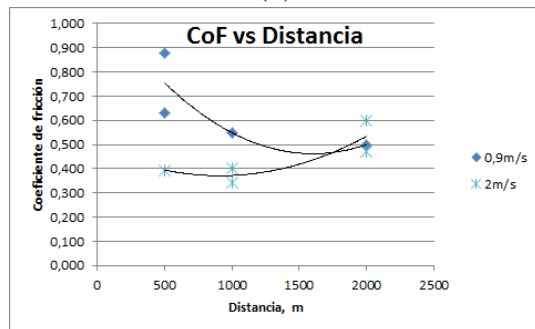
razón de un 29,05 % y disminuye al aumentar la velocidad de deslizamiento en una proporción de 39,33 %.



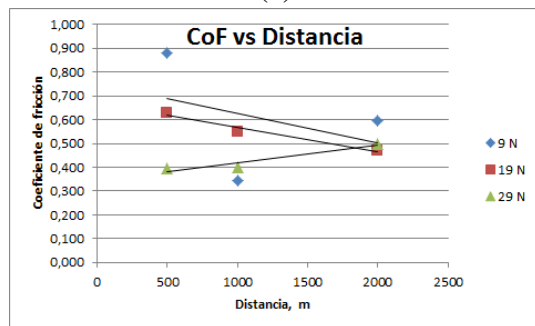
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3: Respuesta de COF promedio en función de (a) la carga normal, (b) la velocidad de deslizamiento y (c) y (d) distancia de deslizamiento.

En la Figura 3, se muestra la respuesta de fricción por deslizamiento para el acero dúplex SAF 2507 considerando la carga, la velocidad o la

distancia como una constante. De la Figura 3 (a), al analizar el efecto de la carga normal evaluada considerando la velocidad como fija se observó, con excepción del experimento 2, que el COF de fricción disminuye a medida que la carga aumenta, es decir, a fuerza de fricción es proporcional a la carga normal, como se espera para la fricción seca de acuerdo a la teoría (1ra ley de Amontons-Coulomb). De los datos de la Tabla 3, se obtiene que los valores promedio del COF para 9N, 19N y 29N son, 0,606, 0,550 y 0,432, respectivamente.

De igual manera, al examinar la gráfica (b) de la Figura 3, se reseña el comportamiento de la fricción respecto a la velocidad de deslizamiento considerando la carga normal fija, se puede destacar que para todos los experimentos realizados con el acero dúplex SAF 2507 se obtuvo que el COF disminuye con el aumento de la velocidad tangencial, siendo entonces esta respuesta una excepción a la 3ra ley de Coulomb, que establece que la fuerza de fricción es independiente de la velocidad. De la Tabla 3, para la velocidad de deslizamiento de 0,9m/s y 2m/s, se tiene un COF promedio de 0,639 y 0,441, respectivamente.

Respecto al comportamiento de la fricción con la variación de la distancia, al observar las gráficas (c) y (d) de la Figura 3, no se logró determinar una tendencia definida. Para la velocidad de 0,9m/s, el COF promedio disminuye con la distancia, pero para 2m/s, el COF promedio aumenta. Por otro lado, para las cargas normales de 9N y 19N, el COF promedio disminuye, mientras aumenta para 29N a medida que la duración se incrementa. Esta respuesta variable respecto a la duración del ensayo del fenómeno de fricción, puede atribuirse a la interrelación de la fuerza de fricción con el desgaste, donde al cambiar la topografía de la superficie debida a la generación de desechos, la fuerza de fricción se ve afectada principalmente por un mecanismo de surcado de las partículas de desgaste [10].

3.3. Análisis estadístico de los parámetros de control del ensayo de fricción por deslizamiento

Análisis de Varianza. Al interpretar la información derivada del análisis de varianza (Anova 3^k), mostrado en la Tabla 4, resulta que en los

experimentos realizados todos los parámetros son estadísticamente significativos, al igual que sus interacciones.

Tabla 4: Análisis Anova para COF del SAF 2507.

Fuente de Variación	SS	df	MS	F test	P-value	F crit (95 %)
A (*)	0,312	2	0,156	49,213	$8,614 \times 10^{-7}$	3,80557
B (**)	0,397	1	0,397	125,244	$4,803 \times 10^{-8}$	4,66719
C (***)	0,078	2	0,039	12,233	$1,028 \times 10^{-3}$	3,80557
A x B	0,179	2	0,089	28,179	$1,877 \times 10^{-5}$	3,80557
A x C	0,454	4	0,113	35,768	$6,707 \times 10^{-7}$	3,17912
B x C	0,089	2	0,044	13,979	$5,760 \times 10^{-4}$	3,80557
Error	0,041	13	0,003			
Total	0,463	17				

(*): Carga

(**): Velocidad

(***): Duración

De los resultados de la Tabla 4, se observa que todos los valores de la probabilidad, P, son menor que 0,05 (nivel de significancia de 95 %). Primeramente, se tiene que el valor de P, para la “A” es el valor de P para el efecto en el COF al variar la carga normal. Puesto que el valor P es menor que 0,05, se establece que la respuesta a la fricción por deslizamiento del acero dúplex SAF2507 al variar la carga normal es significativamente diferente. Por lo tanto, la carga normal afectará el COF del material. De manera similar, se interpreta para “B” velocidad de deslizamiento y “C” la distancia recorrida. En segundo lugar, se deseaba saber si existe alguna interacción entre los factores, si hay interacción, no serán independientes unos de otros. Los valores de P para la “AxB”, “AxC” y “BxC”, es el valor de P para el efecto en el COF al variar los factores en combinación uno x otro. Puesto que el valor P es menor que 0,05 para la interacción, se puede señalar que las respuestas a la fricción obtenidas al realizar las interacciones, son significativamente diferentes y son independientes unas de otras. Para poder optimizar con eficacia la respuesta a la fricción por deslizamiento, se podría realizar prueba manteniendo constante dos de los parámetros y variar el tercero y viceversa, lo cual es ineficiente en costos y tiempo.

Razón Señal a Ruido- S/N. Como se expuso en la sección anterior, la metodología Taguchi pre-

senta un análisis que permite identificar aquellos parámetros que tienen mayor influencia en los resultados de fricción de manera más eficiente. Los valores S/N calculados para los factores y niveles evaluados se muestran en la Tabla 5. Al observar el valor de posición, obtenido para cada parámetro, se destaca que el COF para el acero SAF 2507 se vió más afectado por la duración del ensayo, al mostrar una mayor proporción S/N , seguido de la velocidad de deslizamiento y menos influenciado por la carga normal, al ser este S/N el valor menor. Ahora para optimizar con eficacia la respuesta a la fricción por deslizamiento, se selecciona los niveles con el valor S/N mayor, logrando el COF con la mínima variación. Así que, el conjunto de parámetros seleccionado entre los evaluados es: una carga normal de 29N, una velocidad de deslizamiento de 2m/s y una distancia de 500m.

Tabla 5: Análisis S/N para COF del SAF 2507.

Nivel	Carga (N)	Velocidad (m/s)	Distancia (m)
1	20,676	105,920	93,506
2	17,245	111,488	57,194
3	23,289		66,708
Δ	6,045	5,568	36,312
Posición	3	2	1

4. Conclusiones

El acero SAF 2507 obtuvo un coeficiente de fricción promedio entre 0,213 a 0,891 para las condiciones evaluadas.

El coeficiente de fricción es menor a medida que la carga normal aplicada es mayor a razón de un 29,05 %, así mismo este disminuye al aumentar la velocidad de deslizamiento en una proporción de 39,33 % en promedio.

Todos los parámetros resultaron estadísticamente significativos y diferentes, así como sus interacciones.

La duración resultó ser el parámetro más influyente y la carga normal, el de menor influencia para el acero inoxidable auténico-ferrítico estudiado.

Agradecimiento

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

- [1] A. Cigada, G. Rondelli, B. Vicentini, M. Giacomazzi, and A. Roos. Duplex stainless steels for osteosynthesis devices. *Journal of biomedical materials research*, 23(9):1087–1095, 1989.
- [2] L. Gómez. Estudio de biocompatibilidad del acero dúplex saf 2205. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2009.
- [3] TMR Stainless. *Directrices Prácticas para la Fabricación de los Aceros Inoxidables Dúplex*. International Molybdenum Association, Pittsburgh, PA, USA, primera edición, 2012.
- [4] G. Straffelini, A. Molinari, and D. Trabucco. Sliding wear of austenitic and austenitic-ferritic stainless steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33(3):613–624, 2002.
- [5] G. Szyndelman. Comportamiento tribológico del acero inoxidable dúplex 2205. Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, España, 2008.
- [6] J. Renedo. Comportamiento al desgaste por deslizamiento en aceros inoxidables: ferrítico, austenítico, dúplex y martensítico. Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, España, 2010.
- [7] L. Medina y G. Peralta. Evaluación de las propiedades tribológicas del acero dúplex. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2010.
- [8] J. E. Romero. 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, 2014.
- [9] M. Anglada, G. Fargas, A. Mestra, and A. Mateo. Sliding wear behavior of a duplex stainless steel. In *Mechanical Properties of Solids XI*, volume 423 of *Key Engineering Materials*, pages 125–130. Trans Tech Publications, 3 2010.
- [10] N. Suh. *Tribophysics*. Prentice-Hall, 1986.
- [11] N. Suh and H. Sin. The genesis of friction. *Wear*, 69(1):91–114, 1981.
- [12] R. Roy. *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers, 2010.
- [13] K Turkintong. Diseño y fabricación de una máquina de ensayo de roce. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 1980.
- [14] C. Gloriet. Desarrollo del sistema de medición y control de un tribometro tipo bloque en anillo. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2012.
- [15] R. Rodríguez, G. Urriolagoitia Sosa, C. Torres, L. Hernandez y G. Urriolagoitia Calderón. Análisis numérico sobre esfuerzos y áreas de contacto en una PTR Scorpio II® Stryker®. Base para el diseño de PTR personalizada al fenotipo Mexicano. *Revista Colombiana de Biotecnología*, XV(1):28–41, Julio 2013.
- [16] C. Vaughan, B. Davis, and J. O'Connor. *Dynamics of Human Gait*. Kiboho Publishers, Howard Place, Western Cape 7450, South Africa, second edition, 1999.
- [17] W. DeCoursey. *Statistics and Probability for Engineering Applications With Microsoft® Excel*. Elsevier Science, 2003.
- [18] ASTM. ASTM G77-98, Standard test method for ranking resistance of materials to sliding wear using block-on-ring wear test, 1998.