

Rolling friction of AISI 4140 steel in a ring on ring tribometer

J. E. Romero C.^{*,a}, E. Rondón^b

^a*Centro de Investigación en Materiales (CIM), Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

^b*Laboratorio de Predicciones de la Escuela de Mecánica, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

Abstract.- This paper shows the work done for the characterization of the behavior against rolling friction by AISI 4140 steel. Tests were performed of friction on rolling contact with a lubricant (R&O mineral ISO46), into a tribometer type ring on ring, using an experimental design based on an arrangement of Taguchi. The selected parameters, were: normal load (50 and 100 N), speed ratio (10-30 %) ratio and the time ($2,5 \times 10^5$ and $1,0 \times 10^6$ cycles). The result of the average friction coefficient is $\mu_{with\ lubricant} = 0,098536$ for assessed conditions. Of the three evaluated parameters, speed ratio turned out to be the most influential parameter for lubricated rolling friction by AISI 4140 steel.

Keywords: rolling friction; AISI 4140 steel; Taguchi method; tribology.

Fricción por rodamiento del acero AISI 4140 en tribómetro anillo sobre anillo

Resumen.- En el presente artículo se muestra el trabajo realizado para la caracterización del comportamiento ante la fricción por rodamiento del acero AISI 4140. Se realizaron ensayos de fricción por contacto rodante con un lubricante (mineral R&O ISO46), en un tribómetro tipo anillo sobre anillo, empleando un diseño experimental basado en un arreglo de Taguchi. Los parámetros seleccionados, fueron: La carga normal (50 y 100 N), la relación de velocidades (10 y 30 %) y el tiempo ($2,5 \times 10^5$ y $1,0 \times 10^6$ ciclos). El resultado del coeficiente de fricción promedio es $\mu_{con\ lubricante} = 0,098536$ para las condiciones evaluadas. De los tres parámetros evaluados, la relación de velocidades resultó ser el parámetro más influyente para la fricción por rodamiento con lubricante del acero AISI 4140.

Palabras clave: fricción por rodamiento; acero AISI 4140; método Taguchi; tribología.

Recibido: 01 de noviembre, 2018.

Aceptado: 16 de julio, de 2019.

provee el tribómetro anillo sobre anillo diseñado y fabricado por Heredia y Ledo [2].

1. Introducción

El acero AISI 4140, está entre los materiales empleados para el diseño de distintos elementos de máquinas como árboles de levas, engranajes y otros; pero la información de sus propiedades tribológicas es escasa y poco disponible.

Por este motivo se realizó un proyecto experimental [1], con el fin de obtener las características tribológicas, principalmente fricción y desgaste, del acero en cuestión y adicionalmente, incrementar el nivel de confianza de la base de datos que

El comportamiento friccional es afectado por una amplia lista de factores [3], como por ejemplo, la cinemática de las superficies en contacto y la aplicación externa de carga o el desplazamiento, lo que indica que el coeficiente de fricción 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 [3]. Este último, demuestra una mejor correlación entre el coeficiente de fricción teórico y el experimental [4].

La fricción se considera como la fuerza de

*Autor para correspondencia:

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

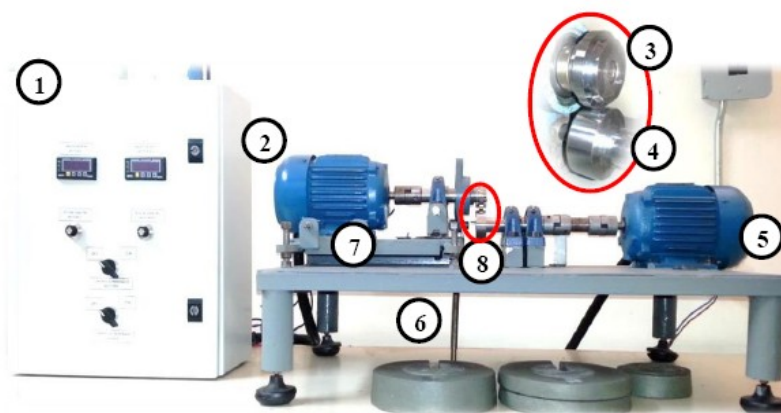


Figura 1: Arreglo general del tribómetro tipo anillo sobre anillo.

resistencia tangencial, en la frontera común entre dos cuerpos cuando, bajo la acción de una fuerza externa, un cuerpo se mueve o tiende a desplazarse con respecto a la superficie de la otra. Se distinguen principalmente dos clases de fricción, por deslizamiento y por rodamiento. La fricción por rodamiento implica a las superficies no concordantes, mientras que las superficies correspondientes al deslizamiento son concordantes. La razón entre la fuerza tangencial, F , y la carga normal aplicada, W , se conoce como el coeficiente de fricción (CoF) y es, $\mu = F/W$.

En el presente artículo se reportan los resultados de la caracterización realizada de la fricción por rodamiento en especímenes de acero AISI 4140 sin tratamiento térmico, con lubricación y a temperatura, presión y humedad normal de un laboratorio.

2. Metodología Experimental

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

2.1. Especímenes de prueba

La fabricación de las probetas o especímenes de prueba se realizó mediante un mecanizado en torno, de acuerdo a la geometría y dimensiones especificadas por León y Pinto [5] en su investigación, a partir de un tocho de sección circular de 0,5715 m de diámetro y 0,5 m de

longitud de acero al cromo molibdeno AISI 4140 adquirido de un distribuidor local. Se obtuvieron 10 probetas con 20 mm de espesor y 50,8 mm de diámetro. En cuanto a la preparación, las probetas fueron limpiadas en un baño ultrasónico con alcohol y acetona, con la finalidad de eliminar en lo posible todo residuo en la superficie debido al mecanización, se secaron con aire caliente y luego almacenadas para cada ensayo.

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 éste corresponde al sentido del movimiento, donde se utilizó un rugosímetro de punta de diamante. Igualmente, se midió la dureza HRC 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.

2.3. Ensayo de fricción por rodamiento

Los ensayos de fricción por rodamiento se llevaron a cabo en un tribómetro tipo anillo sobre anillo (ring on ring or twin disc rig en inglés), ampliamente utilizado para evaluar las condiciones de contacto en engranajes [6, 7]. El tribómetro empleado es un desarrollo propio [2, 5] que se encuentra disponible en el Laboratorio de Predicciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo. El arreglo de tribómetro se muestra en la Figura 1 [2], el cual

consiste en dos ejes alineados, en planos paralelos, con un sistema de carga donde son colocadas las probetas.

La carga y la velocidad de rotación pueden ser variadas permitiendo ensayos flexibles. En este tribómetro, los discos son presionados uno contra otro para obtener la presión de contacto (Figura 1) y al energizar el aparato mediante su caja de control (1), se tiene el arranque del motor 1 (5) accionando el eje que contiene la probeta tipo B (4), mientras que el motor 2 (2) hace girar el eje de la probeta tipo A (3), siendo este último eje el que posee el sistema de la carga normal (6) aplicada sobre los especímenes y estando la probeta tipo B en contacto con el lubricante que se encuentra en el recipiente (8).

Los parámetros que se pueden controlar en el tribómetro descrito son la carga normal, velocidad de deslizamiento, la relación de velocidades y la duración (tiempo o ciclos) del ensayo. Los datos de la fricción se obtuvieron de manera indirecta, por medio de las variaciones de corriente (amperaje) en vacío y con carga del motor 1, mediante el equipo de variación de frecuencia, esto debido a que el equipo no dispone de un sensor para el torque axial, tal como sería un torquímetro de reacción (sensor del par de torsión dinámico) [2].

2.4. Diseño experimental

La matriz de ensayo se planificó en función de evaluar el comportamiento friccional en consideración de los tres parámetros antes mencionados: carga normal, relación de velocidad y tiempo, en dos niveles cada uno, para una aplicación en elementos de máquinas y tomando en cuenta las limitaciones del equipo de ensayo.

Los porcentajes de la relación de velocidades se ajustaron a situaciones promedio de deslizamiento que puedan estar sometidos elementos de máquinas tales como en dientes de engranajes rectos y helicoidales, considerando las velocidades de operación del tribómetro disponible. Para una relación de 10 % se empleó 2000 rpm para el motor 1 y 2200 rpm para el motor 2 y para una relación de 30 % se usó 2000 rpm y 2600 rpm, para el motor 1 y motor 2, respectivamente. La duración del ensayo escogida, hace referencia a la

posibilidad de reproducir el fenómeno de la fatiga superficial que podría presentarse a partir de 10^5 y 10^6 ciclos, en superficies de aceros altamente pulidas [8], seleccionando los valores de $2,5 \times 10^5$ y $1,0 \times 10^6$.

Así mismo, tomando en cuenta limitaciones de valores operacionales permisibles por el tribómetro, se optó por dos niveles de estudio para la carga normal aplicada: 50 N y 100 N. Los parámetros y niveles seleccionados son mostrados en la Tabla 1. En cuanto a las pruebas, se realizaron en condiciones de lubricación con aceite mineral con protección contra la herrumbre y la oxidación (R&O) de viscosidad ISO46 (cifras típicas disponibles en www.incaoil.net) y a temperatura ambiente, presión y humedad normal en laboratorio.

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 además, del análisis de la relación señal a ruido (S/N) que permite estadísticamente determinar la influencia en los resultados de los parámetros seleccionados. El procedimiento general de la aplicación de la metodología DET se describe en Roy [9]. Al aplicar esta metodología tomando como base los parámetros de ensayo se obtuvo la matriz ortogonal L_4 la cual se presenta en la Tabla 2.

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

Parámetros	Niveles	
	Bajo	Alto
Carga (N)	50	100
Relación de Velocidad (%)	10	30
Tiempo (Ciclos)	$2,5 \times 10^5$	$1,0 \times 10^6$

2.5. Análisis de la relación señal a ruido (S/N)

Una vez ejecutada las pruebas prevista en el diseño experimental y obtenido los resultados para cada ensayo realizado, éstos pueden ser utilizados para determinar el efecto de los parámetros y los

Tabla 2: Matriz de ensayos.

Experimento	Carga (N)	Relación de Velocidad (%)	Tiempo (Ciclos)
1	50	10	$2,5 \times 10^5$
2	50	30	$1,0 \times 10^6$
3	100	10	$1,0 \times 10^6$
4	100	30	$2,5 \times 10^5$

niveles en el comportamiento friccional del acero estudiado.

Para determinar la influencia de cada factor o parámetro en los resultados se cuenta con el análisis de la relación S/N [9]. 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 [9]. De estas funciones, más pequeña es la mejor característica, es la más adecuada para describir la fricción mínima y por lo tanto seleccionada para identificar el parámetro más influyente que afecta el acero en estudio.

La relación S/N como más pequeño es mejor característica puede ser calculado como la transformación logarítmica de la función de pérdida que describe en la ecuación (1) [9].

$$S/N = -10 \log \frac{\sum y_i^2}{n} \quad (1)$$

Donde:

n : es el número de observaciones

y_i : son los datos observados, es decir el coeficiente de fricción por rodamiento.

Una vez obtenido el valor de la relación S/N para cada parámetro y nivel, se calcula el valor de rango Δ ($S/N_{mayor} - S/N_{menor}$) del S/N de cada parámetro. A medida que este Δ sea mayor, mayor será la influencia del parámetro en el desempeño de la característica en evaluación [9].

Los cálculos de la relación S/N fueron logrados a través de una herramienta comercial dedicada al diseño de experimento y análisis de datos estadísticos.

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 [3]. Los resultados de los ensayos de rugosidad reportaron un valor promedio, luego de cinco repeticiones, de $R_a = 0,0878 \mu\text{m}$ con desviación estándar de 0,01801.

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 en inglés) [3]. El resultado del ensayo realizado en escala Rockwell C con una carga de 150 kg y cinco repeticiones, correspondió a un valor promedio de HRC 29,4 con desviación estándar de 1,41751.

3.2. Respuesta del material evaluado a la fricción por rodamiento

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del coeficiente de fricción, CoF, a partir del ensayo tribológico, siguiendo el procedimiento indicado en Heredia y Ledo [2] y León y Pinto [5].

Se ejecutó la matriz de experimentos en el acero AISI 4140 con la metodología descrita en la sección anterior. El tribómetro, proporcionó los datos necesarios para la determinación del CoF para las condiciones evaluadas en intervalos de tiempo aproximadamente regulares. En la Figura 2 se presentan una serie de curvas de los resultados del CoF en función de los ciclos ensayados.

Al observar los gráficos de la Figura 2, del comportamiento general de la CoF del acero AISI 4140, se apreciaron tres etapas, una de coeficiente máximo, una de transición y una etapa de estabilidad, similar a las reportadas por Suh y Sin [4]. En la primera etapa, se logra apreciar un periodo de resistencia al corte hasta alcanzar un punto máximo ($\mu_{\text{máx}} = 0,116859$) a los 26000 ciclos para experimento 1 y a 40000 ciclos para experimento 4; atribuible a tener una superficie con material removido, incremento de las interacciones de las asperezas y posibles partículas de desgaste atrapadas, permitiendo de esta manera dicho

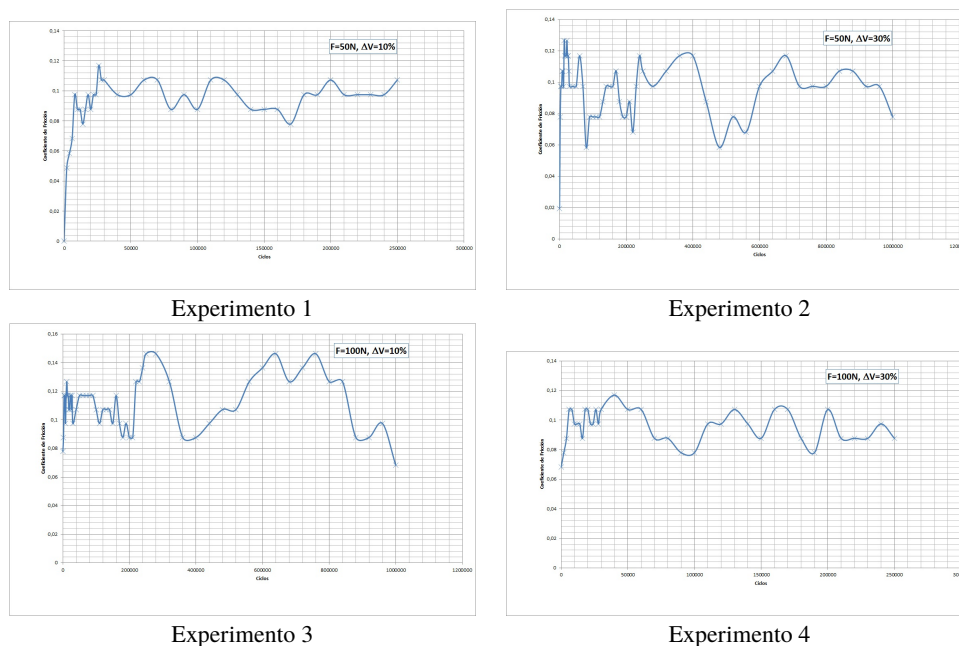


Figura 2: Resultados de CoF de cada experimento en función del tiempo.

incremento en el coeficiente de fricción en ambos casos.

Sin embargo, luego de este periodo, se presentan variaciones en el coeficiente de fricción para ambas probetas, por lo que no se logra obtener una etapa de estabilidad en las curvas para la duración del ensayo presente, pero se observan ciertos picos de altos y bajos, en forma constante, resultando ser parte de la etapa de transición con presencia de lubricación.

Las curvas de las probetas en experimento 2 y experimento 3, muestran en toda la duración del ensayo, cambios altos y bajos del coeficiente de fricción que se atribuyen a la influencia del contacto directo la probeta (B1) con el lubricante. En los 14000 y 20000 ciclos, la probeta del experimento 2 obtiene el coeficiente de fricción máximo ($\mu_{\text{máx}} = 0,126705$); la probeta del experimento 3 tiene su mayor coeficiente de fricción ($\mu_{\text{máx}} = 0,146198$) en $2,5 \times 10^5$, $2,8 \times 10^5$, $6,4 \times 10^5$ y $7,6 \times 10^5$ ciclos, pero se considera que están en una etapa de transición, atribuyendo ese aumento del coeficiente de fricción, a residuos de material que pudieron haber estado sobre los especímenes en el momento de su contacto metal-metal, haciendo esos cambios altos de dicho coeficiente.

En la Tabla 3 se muestran los resultados

para cada experimento logrado, donde los valores del CoF promedio resultaron entre 0,092879 a 0,111814 para las condiciones evaluadas, lo cual se considera un comportamiento friccional leve.

Tabla 3: Resumen de resultados para CoF del AISI 4140.

Experimento	Promedio	Desviación
1	0,096318669	0,008357582
2	0,093133528	0,015178942
3	0,111814380	0,021031628
4	0,092878716	0,010405106

En la Figura 3, se muestra la respuesta de fricción por rodamiento para el acero AISI 4140 considerando la carga, la relación de velocidad o el tiempo como una constante. De la Figura 3, al analizar el efecto de la carga normal evaluada considerando la relación de velocidad y el tiempo como fija se observó, que el CoF de fricción promedio aumenta a medida que la carga aumenta. De los datos de la Tabla 3, se obtiene que los valores promedio del CoF para 50 N y 100 N fueron 0,094726 y 0,102347, respectivamente.

De igual manera, en la Figura 3, se reseña el comportamiento de la fricción respecto a la

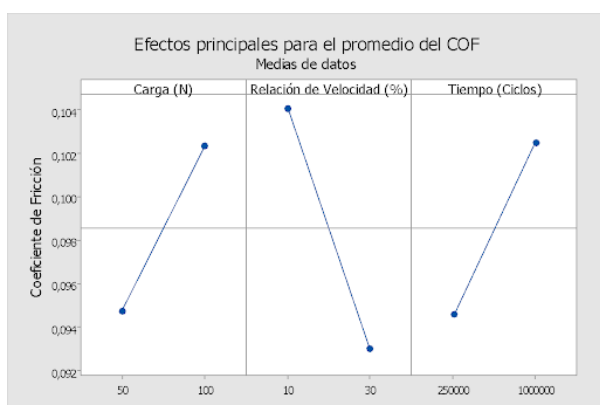


Figura 3: Respuesta de CoF promedio en función de la carga normal, relación de velocidad y tiempo o ciclos.

relación de velocidad considerando la carga normal y el tiempo como fijos, se puede destacar que el CoF disminuye con el aumento de la relación de velocidad tangencial a razón de 11,83 %. De la Tabla 3, para la relación de velocidad de 10 % y 30 %, se tiene un CoF promedio de 0,104067 y 0,093006, respectivamente.

Respecto al comportamiento de la fricción con la variación del tiempo, al observar la Figura 3, se determina una tendencia a aumentar el coeficiente de fricción cuando aumenta el tiempo, obteniéndose un valor promedio del CoF de 0,094599 para $2,5 \times 10^5$ ciclos y de 0,102474 para 1×10^6 ciclos.

A manera de comparación se realizaron dos pruebas adicionales sin lubricante (fricción seca) donde se obtuvo un valor promedio de CoF de 0,373373, lo cual demuestra una disminución del CoF con el empleo de lubricante de alrededor de un 78 %. La temperatura del aceite lubricante en los ensayos lubricados fue en promedio aproximadamente 46,8 C.

3.3. Relación Señal a Ruido- S/N

Como se expuso en la sección anterior, la metodología Taguchi presenta un análisis que permite identificar aquellos parámetros que tienen mayor influencia en los resultados de fricción de manera más eficiente. Los valores S/N obtenidos con la aplicación Minitab®, para los factores y niveles evaluados se muestran en la Tabla 4 y en la Figura 4 (considerando el más pequeño es mejor).

De las gráficas de la Figura 4, se observa que los efectos la relación de velocidad y el tiempo son los que más afectan a la razón S/N; es decir, los parámetros, relación de velocidad y tiempo son los que más influyen sobre la variación del CoF del acero AISI 4140. Al observar el valor de posición, obtenido para cada parámetro (mostrado en la Tabla 4), se destaca que el CoF para el acero AISI 4140 fue más afectado por la relación de velocidad de deslizamiento, al mostrar una mayor proporción S/N (es la mayor diferencia en las relaciones de S/N), seguido por la duración del ensayo 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 seleccionan 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 29 N, una velocidad de deslizamiento de 2 m/s y una distancia de 1000 m.

Tabla 4: Análisis S/N para CoF del AISI 4140.

Nivel	Carga (N)	Relación Velocidad (%)	Tiempo (ciclos)
1	20,47	19,68	20,48
2	19,84	20,63	19,82
Δ	0,64	0,95	0,66
Posición	3	1	2

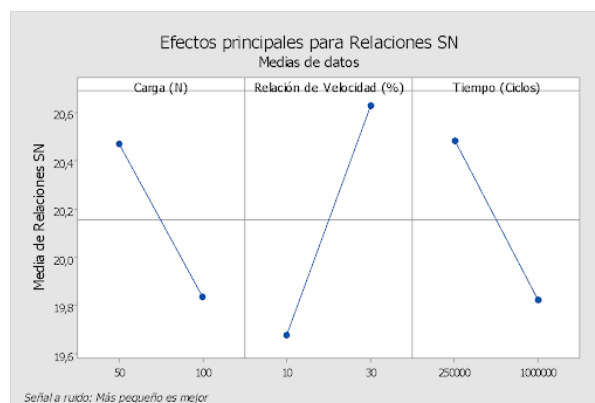


Figura 4: Gráficas de efectos para la relación señal a ruido (S/N) del CoF del ANSI 4140.

4. Conclusiones

El acero AISI 4140 obtuvo un coeficiente de fricción promedio de 0,098536 para las condiciones evaluadas.

El coeficiente de fricción disminuye al aumentar la relación de velocidad de deslizamiento en una proporción de 11,83 % en promedio.

El coeficiente de fricción disminuyó un 78 % respecto de la fricción seca con el empleo de un lubricante.

La relación de velocidad resultó ser el parámetro más influyente y la carga normal, el de menor influencia para el acero AISI 4140 en los niveles estudiados.

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 mediciones y ensayos. Al Centro de Investigación de Materiales de la Facultad de Ingeniería, UC, por el financiamiento parcial del proyecto y a la empresa INCAOIL por proveer el lubricante empleado en la investigación.

5. Referencias

- [1] E. Rondón. Evaluación experimental de las propiedades tribológicas por contacto rodante del acero AISI 4140. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2014.
- [2] L. Heredia y A. Ledo. Tribómetro para la simulación de la fricción y el desgaste bajo condición de contacto rodante. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2011.
- [3] N. Suh. *Tribophysics*. Prentice-Hall, 1986.
- [4] N. Suh and H. Sin. The genesis of friction. *Wear*, 69(1):91–114, 1981.
- [5] J. León y M. Pinto. Elaboración de una metodología para detectar fallas subsuperficiales en condiciones de contacto rodante mediante el uso de ultrasonido. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2013.
- [6] M. Tokuda, M. Nagafuchi, N. Tsushima, and H. Muro. Observations of the peeling mode of failure and surface-originated flaking from a ring-to-ring rolling contact fatigue test rig. In J. Hoo, editor, *Rolling Contact Fatigue Testing of Bearing Steels*. ASTM International, 1982.
- [7] T. Ahlroos, H. Ronkainen, A. Helle, R. Parikka, J. Virta, and S. Varjus. Twin disc micropitting tests. *Tribology International*, 42(10):1460–1466, 2009.
- [8] R. Norton. *Diseño de Máquinas: Un enfoque integrado*. Pearson Educación, 4^{ta} edition, 2011.
- [9] R. Roy. *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers, 2^{da} edition, 2010.