

EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y CARGA DE GRIPADO

EVALUATION OF THE FRICTION COEFFICIENT AND GRIPPING LOAD

Carlos José Santillán Mariño

Ingeniero Mecánico, Máster en Ciencias Mención Diseño Mecánico, Docente Facultad de Mecánica. ESPOCH, Riobamba, Ecuador.

E-mail: csantillan_m@esPOCH.edu.ec

Jhonny Marcelo Orozco Ramos

Ingeniero Mecánico, Magister en Diseño, Producción y Automatización Industrial. Facultad de Mecánica. Grupo de Investigación de nuevas tecnologías. ESPOCH, Riobamba. Ecuador.

E-mail: ingjmorozco@gmail.com

Ernesto Ramiro Santillán Mariño

Ingeniero Mecánico, Magíster en Diseño, Producción y Automatización Industrial. ESPE, Latacunga, Ecuador.

E-mail: ernsanti96@gmail.com

Eduardo Francisco García Cabezas

Ingeniero en Control y redes Industriales, Magister en Sistemas de control y Automatización Industrial. Facultad de Mecánica. ESPOCH, Riobamba. Ecuador.

E-mail: edugarcia_87@hotmail.com

Recepción: 20/02/2019 **Aceptación:** 10/09/2019 **Publicación:** 13/09/2019

Citación sugerida:

Santillán Mariño, C. J., Orozco Ramos, J. M., Santillán Mariño, E. R. y García Cabezas, E. F. (2019). Evaluación del coeficiente de fricción y carga de gripado. *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme*, 8(3), 68-83. doi: <http://dx.doi.org/10.17993/3ctecno/2019.v8n3e31.68-83>

RESUMEN

En la teoría de lubricación se determinan un conjunto de ecuaciones empíricas para la determinación del coeficiente de fricción a diferentes regímenes de lubricación, sin embargo, no se cuenta con ecuaciones para determinar dicho coeficiente a condiciones límites de funcionamiento de un par de contacto; es por tanto, objetivo de esta investigación experimental elaborar las pruebas que permitan determinar como la temperatura, la distribución de presiones, la velocidad de rodadura y de deslizamiento, que aseguren un régimen de lubricación no fluido (mixto, límite), además de la dureza y acabado superficial; influyen en el valor del coeficiente de fricción así como en el régimen de lubricación, resultados presentados mediante la ecuación de Dowson – Higginson para contacto lineal se determina el espesor de película lubricante y considerando los valores de radio de asperezas de las probetas se establece que el conjunto de pruebas se realizó en un régimen Mixto – EHD en las probetas de dureza baja y en las probetas de mayor dureza en un régimen Mixto.

PALABRAS CLAVE

Régimen de lubricación, Gripado, Coeficiente de fricción, Distribución de presiones, Diseño de experimentos.

ABSTRACT

In the theory of lubrication, a set of empirical equations for the determination of the coefficient of friction at different lubrication regimes are determined, however, there are no equations to determine this coefficient at the operating limits of a contact torque; It is therefore the objective of this experimental research to develop the tests that allow determining the temperature, the pressure distribution, the rolling speed and the sliding speed, which ensure a non-fluid lubrication regime (mixed, limit), in addition to the hardness and surface finish; influence the value of the coefficient of friction as well as the lubrication regime, results presented by the Dowson - Higginson equation for linear contact, the thickness of the lubricating film is determined and considering the values of the radius of asperities of the specimens, it is established that the set of tests was carried out in a Mixed-EHD regime in the low hardness specimens and in the higher hardness specimens in a Mixed regime.

KEY WORDS

Lubrication rate, Seizure, Coefficient of friction, Pressure distribution, Design of experiments.

1. INTRODUCCIÓN

Un preciso conocimiento de las condiciones de lubricación y el espesor de película mínimo de lubricante es considerado como un importante criterio de diseño en sistemas de transmisión, en especial del tipo engranes (Muraki, Matsuoka, y Kimura, 1989). Este trabajo realiza un estudio de la durabilidad en superficies de contacto usando criterios para el control de gripado, descostrado, deformación plástica, entre los principales. Criterios relacionados a la carga de contacto local, fricción, velocidad de deslizamiento y rodadura, espesor de película lubricante, temperatura de contacto, acabado superficial y dureza superficial son revisados y considerados o atribuibles como las principales variables en la mayoría de los componentes de fallo en servicio y atribuidos a efectos superficiales iniciales, que pueden ser evitados o retardados por la incorporación de principios tribológicos dentro del diseño ingenieril.

Este trabajo realiza un estudio de la durabilidad en superficies de contacto usando criterios para el control de gripado, descostrado, deformación plástica, entre los principales.

El coeficiente de fricción es un factor que influye considerablemente en los diferentes tipos de fallo y por ende su alta incidencia en la eficiencia de pares de contacto. En las bibliografías relacionadas a la temática tribológica, analiza los regímenes de lubricación elasto hidrodinámica (EHD), mixto o límite, (Smeeth y Spikes, 1995) ofertando ecuaciones obtenidas para condiciones de velocidades medias y altas y con superficies de contacto considerado de alta dureza; sin embargo, en la práctica industrial existen sistemas de transmisión cerrados que son caracterizados por bajas velocidades, altas fuerzas de contacto y durezas superficiales relativamente bajas, aspectos no apreciado frecuentemente en la bibliografía especializada, por tanto, evaluar de forma experimental teorías empíricas del comportamiento tribológico de un sistema de pares de contacto permitirá proponer métodos de prevención que eviten o retarden el surgimiento de daños superficiales (Suh, 1986).

Es por tanto importante, proponer metodologías y obtener ecuaciones empíricas que permitan determinar el coeficiente de fricción en condiciones de bajas velocidades, lubricación semiseca y altas cargas de contacto; (Hamrock y Dowson, 1984), para lograr este objetivo, se contempla la aplicación de un estudio experimental que permite presentar ecuaciones de regresión para condiciones límites de diferentes variables y su proyección al comportamiento no lineal tribológico.

2. DESARROLLO

2.1. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

El equipo empleado es un tribómetro Amsler A 135 que permite realizar ensayos de desgaste; los discos de pruebas son preparados en tamaños que oscilan entre los 30 y 50 mm de diámetro y alrededor de 10 mm de espesor. Los discos son fijados en los extremos de dos ejes de forma que puedan tener contacto uno contra otro. La fuerza radial empleada se regula en un rango entre los 20 y 200 Kg, carga que puede ser leída en una escala, la velocidad de rotación y la dirección de rotación son contrarias en los discos; para discos del mismo diámetro la relación de deslizamiento es del 10%, la velocidad de operación baja es de 200 rpm y la alta es de 400 rpm. Entre el motor y el eje de la probeta de baja velocidad existe un dinamómetro el cual indica el torque de fricción transmitido, se emplea momentos friccionales de 10, 50, 100, 150 Kgf cm.

El equipo empleado es un tribómetro Amsler A 135 que permite realizar ensayos de desgaste; los discos de pruebas son preparados en tamaños que oscilan entre los 30 y 50 mm de diámetro y alrededor de 10 mm de espesor.

2.2. MATERIALES Y GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS

Las características de las probetas empleadas para la realización de las pruebas, se presenta en la Tabla 1, donde se especifica materiales, dureza superficial, tratamiento superficial y otros.

Tabla 1. Resumen de Materiales y Geometría de las Probetas.

CARACTERÍSTICAS	CILINDRO TIPO 1	CILINDRO TIPO 2
Diámetro exterior (m)	0.0429	0.05
Material	SAE 1018	SAE 1040 (Endurecido)
Dureza Superficial (HB)	164	416
Rugosidad (μm)	0.12	0.42

Fuente: elaboración propia.

El lubricante utilizado para todas las pruebas es un aceite SAE EP 90.

2.3. PLAN DEL EXPERIMENTO

1. Determinación de la carga de gripado a partir de la ecuación de Block (Bhusman, 1984).
2. Diseño de experimentos
3. Determinación del coeficiente de fricción experimental
4. Análisis de regresión a los resultados obtenidos en las diferentes pruebas.

2.4. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Un diseño de experimentos cuidadosamente seleccionado (Montgomery, 1997), considera un conjunto de variables que se agrupan en parámetros operacionales como son: tipo de movimiento, carga, velocidad, temperatura y duración del ensayo y de los parámetros estructurales relacionados con el aceite lubricante y el medio circundante donde se realiza la prueba. Estas variables tienen relación con las características tribológicas a obtener como son la fuerza de fricción, el coeficiente de fricción, variación de la temperatura, desgaste y condiciones de contacto (Artes y Pedrero, 1994) que permiten obtener una relación de dependencia de la fricción en función de los parámetros operacionales y de operación.

Un diseño de experimentos cuidadosamente seleccionado (Montgomery, 1997), considera un conjunto de variables que se agrupan en parámetros operacionales como son: tipo de movimiento, carga, velocidad, temperatura y duración del ensayo y de los parámetros estructurales relacionados con el aceite lubricante y el medio circundante donde se realiza la prueba.

2.5. APROXIMACIÓN SIMPLE FACTORIAL

CASO 1: Para probetas tipo 1, de dureza superficial 164 HB, se realizó tres replicas en función de la matriz de experimentos presentado en la Tabla 2.

Tabla 2. Matriz dos factorial de experimento y variables de análisis.

No. Réplica	X_1 (σ_H)	X_2 (V_d)	Y_1 (v)	Y_2 (f)
1	+	+		
	-	+		
	+	-		
	-	-		

Fuente: elaboración propia.

Considerando la matriz de experimentos, sus resultados de acuerdo con las variables experimentales se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de las pruebas para caso de evaluación 1.

Réplica	σ_H (Mpa)	V_d (m/s)	T (°C)	v (N - s/m ²)	f
1	413.65	0.08	26.2	0.5457	0.06410
	226.57	0.08	23.2	0.7671	0.06313
	413.65	0.04	24	0.6976	0.06847
	226.57	0.04	20.5	1.0847	0.06119
2	413.65	0.08	25.4	0.5952	0.05857
	226.57	0.08	22	0.8901	0.05827
	413.65	0.04	23	0.7859	0.06935
	226.57	0.04	23	0.7859	0.07770
3	413.65	0.08	26.4	0.5342	0.05973
	226.57	0.08	23	0.7859	0.05925
	413.65	0.04	21.5	0.9493	0.07022
	226.57	0.04	20.3	1.1149	0.06799

Fuente: elaboración propia.

CASO 2: Para las probetas endurecidas de tipo 2, dureza superficial 416 HB, 3 réplicas, considerándose la respectiva matriz de experimentos y variables a evaluarse se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Matriz de experimentos Caso 2.

No. Réplica	X_1 (σ_H)	X_2 (V_d)	X_3 (HB)	Y_1 (v)	Y_2 (f)
1	+	+	+		
	-	+	+		
	+	-	-		
	-	-	-		
	+	+	-		
	-	+	-		
	+	-	+		
	-	-	+		

Fuente: elaboración propia.

Resultados experimentales obtenidos, cuantificando las variables de análisis para el caso 2, se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Resumen de resultados para caso 2.

Réplica	σ_H Mpa	V_d (m/s)	HB Kg/mm ²	T (°C)	v (N - s/m ²)	f
1	413.65	0.08	416	26.8	0.5122	0.08304
	226.57	0.08	416	22.5	0.8358	0.06410
	413.65	0.04	164	24	0.6976	0.06847
	226.57	0.04	164	20.5	1.0847	0.06119
	413.65	0.08	164	26.2	0.5457	0.06410
	226.57	0.08	164	23.2	0.7671	0.06313
	413.65	0.04	416	22.5	0.8358	0.08625
	226.57	0.04	416	20	1.1624	0.08353

Réplica	σ_H Mpa	V_d (m/s)	HB Kg/mm ²	T (°C)	v (N – s/m ²)	f
2	413.65	0.08	416	28	0.4531	0.08013
	226.57	0.08	416	23.5	0.7400	0.06313
	413.65	0.04	164	23	0.7859	0.06935
	226.57	0.04	164	23	0.7859	0.07770
	413.65	0.08	164	25.4	0.5952	0.05857
	226.57	0.08	164	22	0.8901	0.05827
	413.65	0.04	416	24.4	0.6661	0.07576
	226.57	0.04	416	22	0.8901	0.06605
3	413.65	0.08	416	28.5	0.4312	0.07780
	226.57	0.08	416	24.5	0.6585	0.06799
	413.65	0.04	164	21.5	0.9493	0.07022
	226.57	0.04	164	20.3	1.1149	0.06799
	413.65	0.08	164	26.4	0.5342	0.05973
	226.57	0.08	164	23	0.7859	0.05925
	413.65	0.04	416	24.8	0.6364	0.08799
	226.57	0.04	416	23	0.7859	0.07187

Fuente: elaboración propia.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

- a. A porcentaje de deslizamiento del 10%, la probeta de dureza mínima (164 HB) actúa sin muestra aparente de agarramiento, en tanto que, con porcentaje de deslizamiento del 20% a carga mínima surge el agarramiento siendo la carga de gripado permisible 20 veces menor a la carga de trabajo. (Hamrock y Dowson , 1998).
- b. La probeta de dureza máxima (416 HB) presenta mejores condiciones de resistencia por parte de los discos, señalándose la existencia de una velocidad crítica de deslizamiento comprendida en el rango del 10 al 20%.

- c. La relación de velocidades de prueba se determinó en un valor del 10%
- d. De los datos experimentales, se obtiene como rango del coeficiente de fricción para las probetas de 164 HB en los valores $0,058 \div 0,077$; en tanto, para las probetas de 416 HB los valores corresponden al rango $0,066 \div 0,088$ para medidas de temperatura medidas en la zona de contacto entre $20 \div 36$ °C.

3.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Las ecuaciones, obtenidas mediante regresión lineal para los casos anteriores se presentan a continuación:

CASO 1: Probetas de dureza 164 HB

El rango de aplicación de las ecuaciones de regresión para el Caso 1, Probetas de 164 HB, se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados caso 1 del coeficiente de fricción.

Rango	σ_H (Mpa)	V_d (m/s)	v (N - s/m ²)	f
Máximo	413.65	0.08	0.5342	0.05827
Mínimo	226.57	0.04	1.1149	0.07770

Fuente: elaboración propia.

- A) La primera aproximación del estudio, considerando el comportamiento de las variables de forma independiente se obtiene:

$$f = 0,091326 - 0,000007032 \sigma_H - 0,189678 V_d - 0,018035 v$$

$$R - SQ (adj) = 0,7566$$

- B) De forma gráfica el comportamiento de las variables consideradas de forma independiente presenta el siguiente comportamiento:

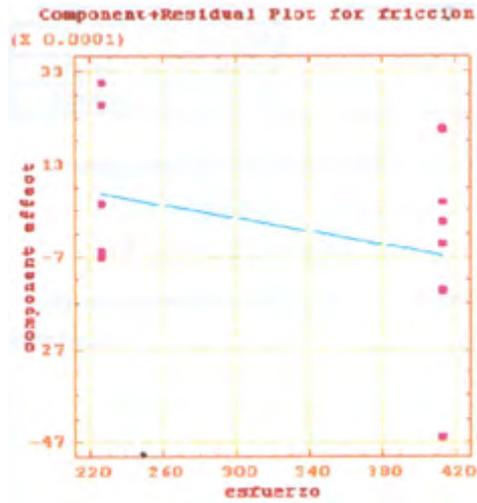


Figura 1. Resultados caso 1 del coeficiente de fricción respecto al esfuerzo. Fuente: elaboración propia.

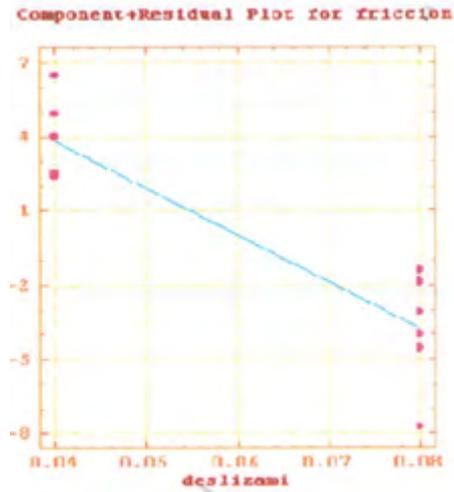


Figura 2. Resultados caso 1 del coeficiente de fricción respecto a la velocidad de deslizamiento. Fuente: elaboración propia.

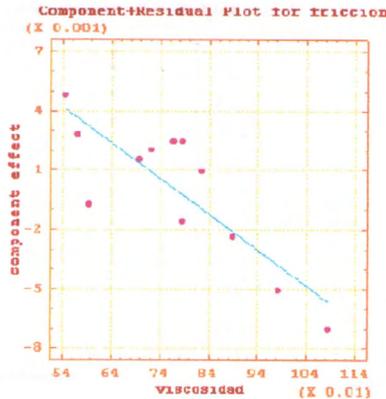


Figura 3. Resultados caso 1 del coeficiente de fricción con respecto a la viscosidad. **Fuente:** elaboración propia.

C) La ecuación de regresión, considerando la variables con comportamiento dependientes será:

CASO 2: Probetas de dureza 416 HB

El rango de aplicación de las ecuaciones de regresión para el Caso 2, Probetas de 416 HB, se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados caso 2 del coeficiente de fricción.

Rango	σ_H (Mpa)	V_d (m/s)	v (N - s/m ²)	f
Máximo	413,65	0,08	0,4312	0,06313
Mínimo	226,57	0,04	1,1623	0,08799

Fuente: elaboración propia.

A) La primera aproximación del estudio, considerando el comportamiento de las variables de forma independiente se obtiene:

$$f = 0,000079 \sigma_H + 0,115706 V_d + 0,042545 v - 0,003621$$

$$R - SQ (adj) = 0,6941$$

B) La ecuación de regresión, considerando las variables con comportamiento dependientes será:

$$\begin{aligned} f = & 0,360027 - 3,879 V_d - 0,539788 v - 0,0015275 \sigma_H \\ & + 0,002584 \sigma_H v + 0,016995 \sigma_H V_d \\ & + 6,279234 V_d v - 0,02717 \sigma_H v V_d \end{aligned}$$

$$\text{con } R^2 (\text{ajustado}) = 0.8565$$

CONCLUSIONES

El tipo de régimen de lubricación que se presenta en las pruebas se lo realiza en función del coeficiente de fricción de las pruebas, misma que indica que se presenta en las pruebas un régimen de lubricación límite y mixto.

Mediante la ecuación de Dowson – Higginson para contacto lineal se determina el espesor de película lubricante y considerando los valores de radio de asperezas de las probetas se establece que el conjunto de pruebas se realizó en un régimen Mixto – EHD en las probetas de dureza baja y en las probetas de mayor dureza en un régimen Mixto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amsler A.** (n.d.). *Wear testing machine for metals, Type A 135*. Schaffhausen, Switzerland.
- Artes M. y Pedrero J. I.** (1994). Computerized graphic method for analysis of gear design. *Mechanism and Machine Theory*, 29(1), 59-71. doi: [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0094-114X(94)90020-5)
- Bhusman, B.** (1981). *Friction, wear and lubrication*. Tech. Rep. No. AT81D060, SKF Industries Inc, King of Prussia,
- Hamrock, B. J., y Dowson, D.** (1977). Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts: Part III—Fully Flooded Results. *ASME. Journal of Lubrication Technology*, 99(2), 264–275. doi: <https://doi.org/10.1115/1.3453074>
- Montgomery, D. C.** (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. México: Limusa Wiley. Recuperado de: <https://juarezrd.files.wordpress.com/2013/09/disenodeexperimentos-montgomery.pdf>
- Muraki, M., Matsuoka T., y Kimura, Y.** (1989). Influence of temperature rise on non Newtonian behavior of fluids in EHD conditions. In *Proceedings of the Fifth International Congress on Tribology, Espoo, Finland, Vol. 4*, 226-231.
- Smeeth, M. y Spikes H.A.** (1995). The influence of slide roll ratio on the film thickness of an EHD contact operating within the mixed lubrication regime. In *Twenty-seconds Leeds – Lyon Symposium on Tribology, The Third Body Concept, Lyon – France, 5-8 September 1995*.
- Suh N.P.** (1986). *Tribophysics*. Prentice Hall.