

Exploración de la medición del coeficiente de rozamiento en laminadas decorativas de alta presión

Exploration of the measurement of the coefficient of friction in high pressure decorative sheets

Luis D. Mendoza Osorio¹; Dina Mendoza Beltrán²; José Luis Villa Ramírez³; Katherine Castro Díaz⁴; Cristina De La Parra Molina⁴; Silvia Arrieta Quintana⁴

¹ Docente, Facultad de ingeniería, GISNET, Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, Barrio España Cr 44 D N° 30A – 91, Cartagena, Colombia. lmendozao@tecnocomfenalco.edu.co

² Docente, Facultad de ingeniería, MPP, Universidad de Cartagena, Avenida del Consulado Calle 30 N° 48 – 152, Cartagena, Colombia. dmendozab1@unicartagena.edu.co

³ Docente, Facultad de ingeniería, GAICO, Universidad tecnológica de Bolívar, Campus Tecnológico Km 1, Vía Turbaco, Cartagena, Colombia. jvilla@utb.edu.co

⁴ Estudiante, Ingeniería Industrial, Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, Barrio España Cr 44 D N° 44D N° 30 A – 91, Cartagena, Colombia.

silviahelenaqa@hotmail.com; castrodiaz9680@gmail.com; cdelaparram@hotmail.com

Recibido: 15/ago/2022 Revisado: 30/sep/2022

Aceptado: 30/oct/2022 Publicado: 30/dic/2022

Resumen Los laminados decorativos de alta presión se fabrican a partir de capas de papel kraft especialmente seleccionados y papeles decorativos, impregnadas con resinas termoestables (melamínica y fenólica); esto se funden para que las resinas se polimericen bajo la acción del calor y alta presión en una prensa hidráulica para formar una lámina con ciertas características de calidad. Los parámetros medibles para estas láminas, según norma NEMA LD 3-2000 son: la resistencia a altas temperaturas, al agua hirviendo, al impacto, resistencia a la abrasión, al ampollamiento y determinación del espesor. El coeficiente de rozamiento es la resistencia al movimiento de dos cuerpos que se encuentran en contacto, esta medida ha ganado importancia porque podría establecerse como un parámetro de calidad en los materiales que se mida, con el fin de estimar su comportamiento y decidir respecto a características tales como es el acabado superficial, vida útil; y también podría utilizarse para ahorrar dinero y en algunos casos energía. Este artículo ofrece una revisión de la medición del coeficiente de rozamiento en diferentes materiales y en especial de los laminados decorativos de alta presión, para ser una guía inicial de evaluación de este parámetro en este material, y para ver su posibilidad en establecer esta medición como un parámetro de calidad.

Palabras clave coeficiente de fricción estática, coeficiente de fricción dinámica, láminas decorativas de alta presión.

Abstract The high-pressure decorative laminates are manufactured from specially selected kraft paper layers and decorative papers impregnated with thermosetting resins (melamine and phenolic); this is melted so that the resins polymerize under the action of heat and high pressure in a hydraulic press to form a sheet with certain quality characteristics. The measurable parameters for these sheets, according to NEMA LD 3-2000 are: resistance to high temperatures, boiling water, impact, resistance to abrasion, blistering and thickness determination. The coefficient of friction is the resistance to movement of two bodies that are in contact, this measure has gained importance because it could be established as a quality parameter in the materials that are measured, in order to estimate their behavior and decide on characteristics Such as is the surface finish, lifespan; and it could also be used to save money and in some cases energy. This article offers a review of the measurement of the coefficient of friction in high pressure decorative laminates, to be an initial guide for the evaluation of this parameter, and to see its possibility to establish this measurement as a quality parameter.

Keywords static coefficient of friction, coefficient of dynamic friction, decorative plates of high pressure.

1 Introducción

El rozamiento o fricción es un fenómeno complejo, que surge como consecuencia de la fuerza de atracción entre las moléculas que forman dos superficies en contacto (Tipler, 2003).

Por la importancia práctica en aplicaciones de ingeniería, el fenómeno de la fricción se ha estudiado en diversas disciplinas, como en la ingeniería mecánica, con el fin de modelar el funcionamiento de maquinarias sujetas a fuerzas de fricción, en la tribología para controlar y optimizar el desgaste en materiales de contacto, y también en ingeniería sísmica para cuantificar desplazamientos relativos entre cuerpos deslizando uno sobre otro (Méndez, 2009).

En ingeniería mecánica es muy utilizado en diferentes maquinarias y equipos como es el caso de fricción en engranajes (Song, Sungmin, & Rajendra, 2007), fricción en el contacto rueda riel evaluado en el metro de la ciudad de Medellín (Rico, 2014), o fricción en tuberías, teniendo en cuenta el fluido que se maneja (Anaya, Cauich, Funabazama, & García, 2014). En la tribología también se ha estudiado sobre fricción, cuyo objetivo ha sido analizar las causas que originan la fuerza de fricción que se genera en el contacto entre dos materiales para comprender el fenómeno y poder así llegar a controlarlo, un ejemplo es el estudio de la influencia de los parámetros tribológicos en el fenómeno de fricción (Pavón, Villarraga, & Tobón, 2014), también se ha estudiado a nivel nano-escala (Krim, 2005), y a nivel atómico (Hirano, 2018). También se han estudiado las tendencias tribológicas actuales en el conformado de la chapa metálica (Valdivia, Robles, & Santana, 2005), encontrándose una aplicación en los sistemas tribológicos presentes en la maquinaria agrícola donde se calcula este coeficiente para obtener la rugosidad superficial requerida, que podría determinar la eficiencia y la fiabilidad de las máquinas agrícolas (Rodríguez, 2007).

Actualmente se ha visto que la industria de los laminados decorativos de alta presión, han diversificado las aplicaciones de estos laminados, como son los acabados en superficies exteriores, también el uso en pisos de viviendas, entre otros; lo cual hace que esta industria piense en tener de manera más rigurosa las mediciones de parámetros de calidad.

Las láminas decorativas de alta presión están compuestas por papeles decorativos y papeles kraft

impregnados con resinas fenólicas y melamínicas que son sometidos a altas temperaturas y presión. Los laminados obtenidos son evaluados bajo la norma NEMA (NEMA Standards Publication LD 3-2000, 2001), en la cual se especifican los parámetros de calidad establecidos para la conformidad de las mismas, tales como: resistencia a las altas temperaturas, al agua hirviendo, al impacto, al ampollamiento y la determinación del espesor (Mendoza & Lara, 1999). Sin embargo, en dicha norma no se pudo encontrar un método directo para determinar el coeficiente de fricción.

Por otra parte, en la búsqueda de información se pudo indagar que en la industria de laminados decorativos de alta presión aplican la determinación de los coeficientes de rozamiento para medir la resistencia del laminado de forma cuantitativa y cualitativa mediante el concepto pérdida de unidades de brillo, utilizando el equipo de abrasión BYK – GARDNER AG-8100.

Por esta razón, ante la evidencia de estudios insuficientes, el presente artículo presenta una revisión bibliográfica de la medición del coeficiente de rozamiento en diferentes materiales y en especial en los laminados decorativos de alta presión.

2 Metodología

Las preguntas de investigación asociadas a esta investigación fueron fundamentalmente:

- ¿Cuáles son los elementos conceptuales más relevantes sobre el cálculo del coeficiente de fricción (rozamiento) estático y dinámico)?
- ¿Cuáles son los métodos aplicados en la determinación de los coeficientes de rozamiento estático y dinámico en distintos tipos de materiales y superficies?
- ¿Cuáles son los equipos utilizados en la determinación de los coeficientes de rozamiento estático y dinámico?

Se identificaron los artículos científicos con mayor número de citas sobre el tema en Google Scholar y sobre esta base se respondieron las preguntas en diferentes secciones de este artículo.

3 Cálculo del coeficiente de fricción (rozamiento) estático y dinámico

La fricción es la resistencia u oposición al movimiento de dos cuerpos que se encuentran en

contacto (esta es una respuesta del sistema a una determinada acción). Cuando un objeto está en movimiento ya sea sobre una superficie o en un medio viscoso como aire o agua, existe resistencia al movimiento a esto es lo que llamamos fuerza de fricción (Serway & Jewett, 2008). Su origen es electromagnético y se podría pensar que los átomos superficiales de ambos lados tienen electrones que se encuentran anclados a los átomos y que se repelen entre sí, prácticamente de forma electrostática (Hincapié, 2011). Matemáticamente se define la fuerza de fricción como en la ecuación (1):

$$F = \mu W \quad (1)$$

donde F es la Fuerza de fricción, W es la carga normal sobre el contacto y μ es una constante conocida como el coeficiente de fricción. (Espitia, 2013). De manera similar, la fuerza de rozamiento de cada cuerpo es de dirección opuesta a su movimiento relativo con relación al otro cuerpo. Las fuerzas de rozamiento se oponen automáticamente a este movimiento relativo y nunca contribuyen a él (Moreno, Font, & Ramírez, 2016).

La fuerza de fricción entre dos superficies sólidas se puede aproximar al modelo de fricción de Amontons y a Coulomb, quienes plantean que, en condiciones de deslizamiento, la fuerza de fricción es proporcional a la fuerza normal, N , y la constante de proporcionalidad es definida como coeficiente de fricción. La fuerza de fricción de Coulomb es una fuerza que tiene una amplitud constante con respecto al cambio de velocidad. (Pérez, Arroyave, & Acevedo, 2010). Una definición del coeficiente de fricción como el cociente entre la fuerza de fricción y la fuerza normal fue dada por Da Vinci (Persson & Spencer, 1999). La ley de fricción de Coulomb establece un coeficiente de fricción estático y uno cinético (Persson & Spencer, 1999).

La fricción como fenómeno físico posee la misma definición que la resistencia al deslizamiento; esta descrita a través del coeficiente de fricción, medido como la razón entre la fuerza de fricción y una fuerza normal originada por el peso. La fricción total en el plano horizontal resulta de la distribución entre los cuadrados de las fricciones en sentido radial y tangencial. (De Solminihac, Echaveguren, & Bustos, 2006). Por tal razón, la fuerza de rozamiento no es más que la componente tangencial de la fuerza de contacto entre las dos superficies y su origen es electromagnético. En efecto, se puede decir que los átomos superficiales de ambos lados tienen electrones que se encuentran anclados a los átomos y

que se repelen entre sí, prácticamente de forma electrostática. Este es, el origen de la fuerza de fricción y también de la fuerza normal, que juntas componen la fuerza de contacto (Normal y fricción) de origen electromagnético.

A nivel microscópico, esta fuerza depende de la normal, de los materiales y la rugosidad de las superficies en contacto (Hincapié, 2011). En 1961 se hizo un estudio sistemático de la fricción superficial que se crea en la interfase entre suelos y diferentes materiales de construcción (Potyondy, 1961).

Existen dos tipos de coeficiente de fricción: el estático (μ_s) y el cinético (μ_k). Charles de Coulomb añade una propiedad más, conocida como ley de Coulomb, la cual estipula que el coeficiente de fricción cinético es independiente de la velocidad de deslizamiento una vez el cuerpo se encuentra en movimiento (Young & Roger, 2009). Es importante enfatizar que μ en general es independiente de la velocidad de deslizamiento, pero su valor depende de condiciones de operación (temperatura, humedad, presión ambiental). Algunos pares de materiales pueden mostrar una cierta dependencia de los coeficientes de fricción estático y cinético con la carga normal, la velocidad de deslizamiento y el área aparente (Espitia, 2013).

El coeficiente de fricción estático, es el cociente entre la magnitud de la fuerza máxima de rozamiento estática y la magnitud de la fuerza normal. (Moreno, Font, & Ramírez, 2016). Por tanto, la fricción estática impide que un objeto inicie su movimiento, ya que, es igual a la fuerza neta aplicada sobre el cuerpo, solo que con sentido opuesto. Dado que, el roce estático es siempre menor o igual al coeficiente de roce entre los dos objetos multiplicado por la fuerza normal. (Espitia, 2013). Por ejemplo, se tiene un cuerpo estacionario sobre un plano inclinado, dicho plano forma un ángulo con la horizontal el cual puede variar desde cero hasta un valor, que representa el máximo ángulo de inclinación de una superficie para que un objeto que se encuentre sobre esta, descansa estacionariamente. La figura 1 muestra el diagrama de cuerpo libre de un cuerpo sobre una superficie inclinada. (Pérez, Arroyave, & Acevedo, 2010).

El coeficiente de fricción dinámico o cinético, es la relación entre la magnitud de la fuerza de rozamiento cinético y la magnitud de la fuerza normal. En general, los valores de estos coeficientes dependen del material de las superficies en contacto, por lo que la máxima fuerza de rozamiento estática siempre es mayor que la fuerza de rozamiento cinética. (Moreno,

Font, & Ramirez, 2016). En el instante en que el cuerpo empieza a deslizar, este puede experimentar una velocidad y una aceleración determinada (Perez, Arroyave, & Acevedo, 2010).

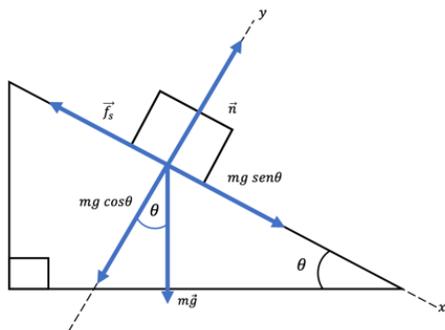


Fig 1. Diagrama de cuerpo libre

Fuente: Serway, R., & Jewett, J. (2008). *Física Para Ciencias E Ingeniería*. Mexico: Cengage Learning.

Se realizó un experimento para determinar la transición entre condiciones estáticas y cinéticas cuando las superficies metálicas estacionarias se ponen en movimiento; en 1951 se utilizó un método simple para medir la energía que debe darse a uno de los cuerpos para que comience a moverse (Rabinowicz, 1951). El desgaste que se presenta en la fricción dinámica, es el daño de la superficie o la remoción del material de una o ambas superficies sólidas en el movimiento relativo, sea por deslizamiento, rodamiento o impacto. El deslizamiento entre superficies sólidas se caracteriza generalmente por un alto coeficiente de fricción y un gran desgaste debido a las propiedades específicas de las superficies (Espitia, 2013).

Para determinar el coeficiente de fricción cinético se puede llevar a cabo experimentos en donde se mide la fuerza lateral que produce el movimiento de un cuerpo a velocidad constante (Constantinou, Mokha, & Reinhorn, 1990). Esta medición estima un coeficiente de fricción promedio que puede estar influenciado por la rigidez del artefacto con el que se mide la fuerza ejercida (Grudziński & Kostek, 2005). Para no tener estos inconvenientes, algunos investigadores han realizado experimentos utilizando mesa vibradora donde miden las aceleraciones de respuesta de un bloque rígido deslizando respecto del plano donde descansa, logrando aislar de mejor forma el fenómeno de fricción cinética en una interfaz (Yegian & Kadakal, 2004).

Se han realizado estudios para determinar el coeficiente de fricción dinámico en diferentes materiales, uno de estos estudios determinó el valor del coeficiente fricción dinámico suelo-metal como dato de entrada para la evaluación de los modelos físicos matemáticos desarrollados con vista al diseño de parámetros geométricos de sondas utilizadas en la agricultura de precisión, se determinó experimentalmente sus valores para un suelo ferralítico rojo en función de tres variables controladas: humedad volumétrica, la velocidad de deslizamiento de la plancha metálica sobre el suelo, y para presiones específicas. (Ramos, Laffita, García, Valdés, & Torres, 2012). Otro estudio describe un método computacional para calcular la fuerza de fricción entre dos superficies rugosas donde la fricción resulta de las fuerzas desarrolladas durante la deformación elástica y la resistencia al corte de las uniones adhesivas en las áreas de contacto; esto se aplicó al problema clásico de una esfera en un medio espacio como punto de referencia, los cálculos mostraron cómo la fricción cambia con la rugosidad de la superficie (Karpenko & Akay, 2001). Se encontró un estudio experimental para determinar los coeficientes de fricción entre dos cerdas delgadas de acero de los cepillos laterales en barredoras de calles, donde se obtuvo que el coeficiente de fricción depende de la fuerza normal, como velocidad relativa entre las superficies (Vanegas, Abdel, & Arroyave, 2008).

Se ha podido también recopilar que se ha realizado un modelo numérico para determinar el coeficiente de rozamiento entre superficies rugosas (Karpenko & Akay, 2001).

En la ingeniería civil también ha sido importante evaluar este fenómeno, un estudio reporta la evaluación de este coeficiente entre el pavimento en presencia de hielo utilizando el equipo péndulo en la interfaz deslizador (Hurtado, 2017), otro estudio analiza la fricción y el desgaste de baldosas cerámicas de gres de monococción y de gres porcelánico obteniendo coeficientes de fricción dinámicos (Ricón, Romero, & Almendro, 2005). Otra aplicación es en la ingeniería de puentes donde se estima experimentalmente los coeficientes de fricción por desviación (k) y curvatura (μ) en cables postensados, mediante instrumentación electrónica (Carlos, Jaime, & Edgar, 2009). Los aportes que realiza la ingeniería electrónica a estos estudios son los equipos electrónicos utilizados para la medición electrónica de este fenómeno, estos quipos son los microcontroladores que son utilizados para diseñar

dispositivos que permita encontrar coeficientes de fricción estático de diferente materiales cuando las superficies de éstas entran en contacto (Aliaga, 2012).

Desde el punto de vista geotécnico, el comportamiento estructural de muchas obras queda definido por la interacción que se desarrolla en el contacto suelo-estructura. La interacción que se crea en dicha interfase es principalmente debida al coeficiente de rozamiento entre ambos materiales. Esto se pudo indagar con los resultados de un estudio experimental, donde se evalúa la fricción superficial que se desarrolla en la interfase suelo-material compuesto, cuyos resultados mostraron aumento del ángulo de rozamiento entre ambos materiales con el aumento de la rugosidad de las placas (Jara & Fort-López, 2009).

4 Métodos aplicados en la determinación de los coeficientes de rozamiento estático y dinámico en distintos tipos de materiales y superficies

Inicialmente, el método usado en la determinación del coeficiente de rozamiento dinámico entre materiales como: madera y aluminio, consiste en un dispositivo que contiene un riel de madera, sobre el cual se hacen deslizar bloques de materiales diferentes (madera y aluminio), y masas diferentes, por medio de una polea y un acelerómetro, se determina el coeficiente de rozamiento dinámico para cada par de superficies (madera/madera y aluminio/madera). Con este ensayo se determina que el deslizamiento entre los pares de materiales, el coeficiente de rozamiento es independiente de la masa del bloque que desliza y sólo depende de la naturaleza de las superficies en contacto como se observa en la figura 2. (Espitia, 2013).

Empleando el método de la mecánica clásica con el criterio la ley de Amontón para el rozamiento seco, se utiliza el método de determinación experimental del coeficiente de fricción dinámico suelo-metal en un suelo ferralítico rojo inicia partiendo de la fuerza de tiro (f) obtenida del transductor de fuerza tipo S y la fuerza normal se determina el coeficiente de fricción dinámica, se asume que la velocidad de deslizamiento es constante, siendo la acción de las fuerzas de inercia igual a cero, como se observa en la figura 3.

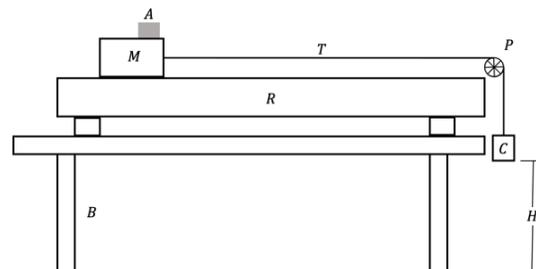


Fig. 2. Dispositivo para medir coeficiente de rozamiento dinámico.

Nota. A: acelerómetro; M: bloque; T: hilo; R: riel; P: polea; C: contrapeso; B: base; H: altura.

Fuente: Lab 1 Dpto. Física FCEN, UBA. (2002).

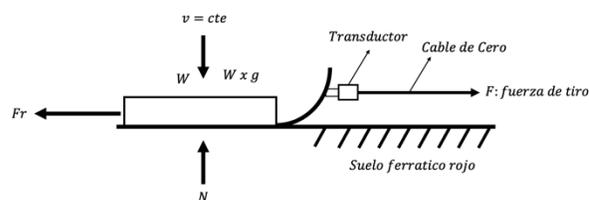


Fig. 3. Esquema de análisis utilizado en el experimento.

Fuente: Revista de Ciencias Técnicas Agropecuarias, vol. 21 n°3

El suelo ferralítico típico de la agricultura cubana indicó la variación del coeficiente de fricción dinámico suelo-metal en función de la velocidad relativa de deslizamiento, humedad volumétrica y presión específica del suelo (Espitia, 2013).

Del mismo modo, el modelo constitutivo de Deriaguin (MTD), considera la fricción y la adherencia insolubles, por lo que el proceso de deslizamiento transcurre de forma simultánea y continua, dependiendo de los valores de su resistencia a dicho deslizamiento y el coeficiente de fricción dinámico, de las propiedades físicas mecánicas de suelo y del material en fricción, así como de las cargas externas y de adherencia entre ellas. Debido a que, el aumento de la presión normal disminuye el valor del coeficiente fricción suelo-metal sólo hasta determinado valor y, posteriormente, tiende al aumento. Deriaguin en 1963, propone sobre la base de la teoría molecular de la fricción, que la resistencia a la fricción es la suma de: la fuerza por la carga externa y el tangencial producto de la adherencia molecular. (Laffita, Ramos, García, Sigler, & Rodríguez, 2013).

Por otro lado, el coeficiente de fricción dinámica puede ser determinado a partir de oscilaciones armónicas, mediante un método que sugiere, la

utilización de una barra rígida, que se encuentra simplemente apoyada sobre dos bases que giran en sentido opuesto, venciendo la fricción existente entre el material a ensayar y el material de las bases, por lo tanto la barra oscila a lo largo de la dirección longitudinal. Esto es captado por el medidor horizontal de frecuencias, las cuales se analizan para determinar el coeficiente de fricción dinámica. (Espitia, 2013).

Por lo anterior, cuando la fuerza que actúa en una partícula o sistema es proporcional al desplazamiento respecto a un punto de “equilibrio”, siguiendo la ley de Hooke, el objeto se dice que describe un movimiento armónico simple. Figura 4. Ley de Hooke. Una partícula oscila cuando se mueve periódicamente respecto de su posición de equilibrio, se puede demostrar que la gran mayoría de los sistemas que tiene un punto de equilibrio estable admiten un tratamiento armónico para pequeñas oscilaciones en torno a dicho punto. Debido a que, para que un objeto de masa (m) describa un Movimiento Armónico Simple (M.A.S.), la fuerza ha de ser proporcional al desplazamiento y de sentido contrario a éste. (Espitia, 2013)

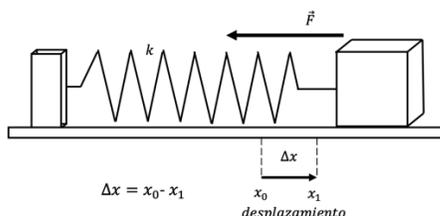


Fig. 4. Ley de Hooke

Fuente: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images>

Se encontró un trabajo donde se pretendió validar el coeficiente de fricción dinámica mediante los procedimientos de oscilaciones armónicas, fuerza de empuje y plano inclinado con su dispositivo para su obtención en los materiales de acero, aluminio y bronce; al final cuando se compararon los resultados con las referencias bibliográficas, tuvieron variaciones, que se le atribuyó a los componentes del metal y el medio que rodea a los metales en contacto (Ordoñez, 2015).

El coeficiente de fricción es determinado en superficies cerámicas por ser una propiedad que depende de la interfase de los materiales que contactan y se define como la relación entre el “esfuerzo” y el “peso” que soporta una superficie cuando es recorrida por un material manteniendo el contacto entre ambos; los ensayos de determinación del coeficiente de fricción se han realizado con un

equipo “pin- on-disk” (de CSEM instruments) con puntas (ó “pins”) de alúmina y en algunos casos de acero, bajo una carga normal de 1N. Los ensayos de fricción realizados sobre plaquetas comerciales permiten representar el coeficiente de fricción (μ) en función de las revoluciones por minutos o ciclos que realiza el pin contactando sobre la superficie de la muestra. Por tanto, el valor de μ se incrementa al comienzo por efecto del contacto sobre la muestra en el caso de muestras con superficies más blandas, manteniendo un cierto coeficiente de fricción hasta que por efecto de desgaste producido por el rozamiento dicho coeficiente disminuye a partir de ciertas revoluciones. (Jordan, Almendro-Candel, Romero, & Rincón, 2005).

Conjuntamente, el coeficiente de fricción en el régimen de transición: aplicación a cadenas lineales, se calcula mediante la relación de dos velocidades de colisión de partículas agregado ficticios evaluados en el continuo y el deslizamiento de flujo de regímenes. Las tasas de colisión eficaces se obtienen de la solución numérica de la ecuación de Laplace con condición de contorno Robin. “Denominado el Método Collision Rate (CRM)”. (Mela, Isella, Konstandopoulos, & Yannis, 2015), mediante el cual el coeficiente de fricción de cadenas lineales se determina a partir de la tasa de colisión eficaz de difusión de partículas ficticias.

Además, el coeficiente de fricción se puede calcular empleando sensores movimiento a través de un dispositivo que contiene un plano inclinado, que se eleva debido al movimiento ejercido por un mecanismo de cuatro barras. Un motor transmite la potencia necesaria al mecanismo por medio un sistema de engranajes el cual proporciona la velocidad adecuada en los eslabones del mecanismo. La probeta se ajusta sobre la superficie de deslizamiento de tal manera que su presencia sea percibida por un sensor óptico de barrera. Posicionada la probeta, se empieza a inclinar lentamente la superficie hasta que la probeta apenas empiece a deslizar, en dicho instante el sensor le envía una señal al motor para que este se detenga. La visualización del ángulo de inclinación es hecha a través de un potenciómetro rotacional el cual se encuentra acoplado a la superficie inclinada. El valor del ángulo de inclinación nos permite el cálculo del coeficiente de fricción estático. (Perez, Arroyave, & Acevedo, 2010).

Asimismo, la fricción en pavimentos, puede ser determinada mediante un método basado en el diseño geométrico, asumiendo un factor de fricción admisible

que representa el efecto de la fuerza de fricción con respecto a la velocidad. Como hipótesis, se asume que éste es invariante en el tiempo e independiente del pavimento. Entre los aspectos que determinan esta variabilidad se cuentan el tipo de pavimento, características de los agregados, humedad del pavimento, estado y tipo de neumáticos, velocidad, peso del vehículo, presencia de contaminantes, condición geométrica, las variaciones estacionales del clima, nivel de precipitaciones, entre otras. Estos factores condicionan las variaciones de las características superficiales del pavimento en diferentes ventanas de tiempo, lo cual debe ser considerado al implementar procesos de medición. Por tanto, la fricción total en el plano horizontal resulta de la distribución entre los cuadrados de las fricciones en sentido radial y tangencial. (De Solminihaç, Echaveguren, & Bustos, 2006).

Finalmente, el modelo de Hertz contribuye con la determinación del coeficiente de fricción en piel humana válida para el comportamiento elástico lineal y se limita a pequeñas deformaciones. Sin embargo, la piel y el tejido blando subyacente se caracterizan por un comportamiento no lineal mecánico, en los experimentos tribológicas. Debido a que, el coeficiente de fricción de la piel humana es una propiedad del sistema determinado por las propiedades del material y de la superficie de la piel en sí, el material de contacto, así como las posibles capas intermedias tales como atrapado temporalmente o se aplica tópicamente sustancias (por ejemplo, productos cosméticos), o el sudor y el sebo natural excretada de la piel. En general se reconoce que la fricción de la piel depende del tipo (materiales fibroso sólido, suave) y las propiedades físicas de los materiales de contacto, así como en las condiciones de la piel fisiológicos (por ejemplo, estado de hidratación, el nivel de sebo) y los parámetros de contacto mecánico, especialmente en la carga normal, es decir, la presión de contacto (Gerhardt & Derler, 2012).

5 Equipos utilizados en la determinación de los coeficientes de rozamiento estático y dinámico

A continuación se especifican algunos equipos empleados en los métodos para medir el coeficiente de rozamiento:

PARAM MXD-01: Determina el coeficiente de fricción estático y dinámico a las películas, hojas,

goma, papel, bolsas de polipropileno tejidas, telas, metal-plástico banda compuesta, madera, recubrimiento, pastillas de freno, limpiaparabrisas, material de calzado y neumáticos, entre otros. Está compuesto por un micro-ordenador y una pantalla LCD, para la interfaz hombre-máquina. Los coeficientes estático y dinámico se pueden probar simultáneamente y las funciones de sincronización automática de retardo y puesta a cero, garantizan el tiempo suficiente entre las muestras a ensayar. La superficie de deslizamiento y el trineo donde se colocan las piezas se tratan mediante desmagnetización y detección de remanencia, que reducen eficazmente los errores del sistema. (Espitia, 2013).

PIN-ON-DISK: El cual consiste en un disco giratorio sobre el que se coloca uno de los materiales bajo ensayo y es cargado a través de un elemento (del otro material bajo ensayo) tipo punzón, bola o superficie plana por medio de un peso conocido. El sistema se controla por ordenador y se puede obtener y registrar diferentes parámetros, como: Fuerza de rozamiento, Coeficiente de rozamiento, Desgaste y Temperatura (Espitia, 2013).

BALL ON DISK: Sistema de bola sobre disco, opera en condiciones ambientales de temperatura y humedad. El equipo que está constituido por una plataforma. En esta se encuentran cuatro galgas extensiométricas sólidamente adheridas a una palanca elástica y se conectan en puente de Wheatstone, también incluye un computador con un programa que corre sobre un sistema operativo DOS. Allí se registran y presentan los datos de las medidas en tiempo real, además se controlan los parámetros de prueba del sistema experimental (Espitia, 2013).

En una empresa del sector petroquímico en Cartagena se pudo indagar sobre la determinación del coeficiente de fricción de las películas termo encogibles de PVC. El laboratorio de la empresa cuenta con un equipo conocido como: Friction/Peel Tester modelo 225-1 con una celda de carga de 200 Kg-f. El ensayo es realizado colocando una capa película sobre otra en la superficie horizontal del equipo, luego se coloca una pieza del equipo que pesa de 300g aproximadamente y la sujetan a la celda de carga, e inician el ensayo y el equipo automáticamente muestra el valor de los coeficientes de rozamiento estático y dinámico. El método de ensayo está basado en la norma ASTM D-1894 (ASTM D-1894, 2001).

A continuación se resumen en la tabla 1 la recopilación bibliografía consultadas sobre la medición del coeficiente de rozamiento en diferentes materiales.

Tabla 1. Mediciones de coeficientes de fricción para diferentes materiales.

Medición	Materiales	Referencia
Determinación del coeficiente de rozamiento dinámico	Madera - madera Aluminio - madera	(Espitia, 2013)
Determinación del coeficiente de fricción empleando sensores de movimiento	Suelo-Metal	(Pérez, Arroyave, & Acevedo, 2010)
Determinación del coeficiente de fricción	Pavimento-neumático	(De Solminihaç, Echaveguren, & Bustos, 2006).
Determinación de coeficiente de fricción en piel	Piel-productos cosméticos	(Gerhardt & Derler, 2012)
Determinación del coeficiente de fricción dinámico suelo-metal	Suelo - metal	(Laffita , Ramos, García , Sigler, & Rodríguez, 2013)
Determinación coeficiente de fricción en el régimen de transición: aplicación a cadenas rectas.	Nanopartículas	(Mela, Isella, Konstandopoulos, & Yannis, 2015)
Determinación de coeficiente de fricción	Acero-Aluminio-Bronce	(Ordoñez, 2015).
Determinación de coeficiente de fricción	Rueda-riel	(Rico, 2014)
Determinación de coeficiente de fricción usando péndulo en la interfaz deslizador	Pavimento - hielo	(Hurtado, 2017),
Determinación de coeficiente de fricción baldosas usando un equipo de "pin-on-disk"	Cerámica de gres -cerámica gres porcelánico	(Ricón , Romero, & Almendro, 2005)

6 Conclusiones y trabajos futuros

Se actualiza la revisión antes de empezar una investigación en el tema, por estar este en permanente actualización, y la existencia de diferentes opiniones sobre su estado de arte.

Se recopiló información que puede acompañar los primeros pasos de una investigación sobre el diseño de un sistemas de medición de coeficientes de fricción estático y dinámico para caracterización de materiales, recopila los términos básicos y conceptos que permiten motivarse, y seguir adelante en un tema actual como medir estos parámetros de calidad.

Esta revisión se basó más en establecer los fundamentos, que en profundizar un tema específico, teniendo cuidado en no caer en imprecisiones, pues no se tuvo el acompañamiento multidisciplinario que el tema requiere.

Se utiliza en investigaciones futuras en el acompañamiento de áreas específicas sobre el tema, para lograr un rápido entendimiento de los diferentes métodos utilizados para la medición de los coeficientes de fricción.

Se requiere la implementación de una sistemas de medición de coeficientes de fricción estático y dinámico para caracterización de materiales, en investigación para minimizar las incertidumbres en los laboratorios de calidad en las empresas de producción en el sector industrial, así como la obtención de medidas más precisas con el uso de tecnologías actuales de la electrónica de sensores de movimiento inercial.

Referencias

- De Solminihaç, H., Echaveguren, T., & Bustos, M. (2006). Análisis de modelos de comportamiento temporal de la resistencia al deslizamiento en pavimentos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 157-168.
- Gerhardt, L., & Derler, S. (2012). Tribology of Skin: Review and Analysis of Experimental Results for the Friction Coefficient of Human Skin. *Tribology Letters*, 1-27.
- Grudziński, K., & Kostek, R. (2005). Influence of normal micro-vibration in contact on sliding motion of solid body. *Journal of Theoretical*, 37-49.
- Karpenko, Y., & Akay, A. (2001). A numerical model of friction between rough surfaces. *Elsevier*, 531-545.
- Ramos , E., Laffita, A., García , A., Valdés , P., & Torres, R. (2012). Determinación experimental del coeficiente de fricción dinámico suelo-metal en un suelo Ferralítico rojo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 33-44.
- Yegian, M., & Kadakal, U. (2004). Foundation Isolation for Seismic Protection Using a Smooth Synthetic Liner.

- Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1121-1130.
- Aliaga, Z. (2012). La microelectrónica en experimentos de física. *Fides et Ratio - Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 88-93.
- Anaya, A., Cauich, G., Funabazama, O., & Garcia, V. (2014). Evaluación de ecuaciones de factor de fricción explícito para tuberías. *Educación Química*, 128-134.
- Aperador, W., Rodriguez, G., & Franco, F. (2013). Estimación de la corrosión intergranular en la aleación de magnesio AZ31B soldada por fricción - agitación. *Revista de Ingeniería*, 39-44.
- ASTM D-1894. (2001). *Standards Test Method for static and Kinetic coefficients or fiction of plastic film and sheeting*. An American National Standard.
- Carlos, P., Jaime, R., & Edgar, M. (2009). Estimación experimental de los coeficientes de fricción por desviación (k) y curvatura (μ) en cables postensados, mediante instrumentación electrónica. *Infraestructura vial*, 12-19.
- Constantinou, M., Mokha, A., & Reinhorn, A. (1990). Teflon Bearings in Base Isolation II: Modeling. *Journal of Structural Engineering*, 438-453.
- Espitia, L. (2013). *Determinación del coeficiente de fricción de deslizamiento para algunos materiales de uso común en ingeniería mediante el método de las oscilaciones armónicas* (Tesis de pregrado). Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Hincapié, H. (2011). *Predicción, experimentación y simulación en la enseñanza de la fuerza de rozamiento* (Tesis de Maestría). Bogotá: Universidad Nacional.
- Hirano, M. (2018). *Friction at the atomic level*. Tokio: Wiley-VCH.
- Hurtado, A. (2017). *Estudio del coeficiente de fricción en asfalto con presencia de hielo y arena empenado el pendulo deslizante* (Tesis de Maestría). México: Universidad Politécnica de Pachuca.
- Jara, G., & Fort-López, L. (2009). Evaluación de la Fricción Superficial entre Suelos y Materiales Compuestos. *Revista de la Construcción*, 103-113.
- Jordan, M., Almendro-Candel, M., Romero, M., & Rincón, J. (2005). Application of sewage sludge in the manufacturing of ceramic tile bodies. *Elsevier*, 219-224.
- Krim, J. (2005). Friction at the nano-scale. *Physics world*, 31-34.
- Laffita, A., Ramos, E., García, A., Sigler, M., & Rodríguez, C. (2013). Fundamentación teórico metodológica para la determinación del coeficiente de fricción dinámico suelo-metal. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20-26.
- Mela, A., Isella, L., Konstandopoulos, A., & Yannis, D. (2015). A methodology to calculate the friction coefficient in the transition regime: Application to straight chains. *Elsevier*, 40-50.
- Méndez, B. (2009). *Una nueva ley de fricción cinética para bloques rígidos y su aplicación a problemas geosísmicos* (Tesis de Doctorado). Mexico: Instituto de Ingeniería UNAM.
- Mendoza, D., & Lara, H. (1999). *Modealmiento de la transferencia de calor en Lamindos Decorativos de Alta Presión* (Tesis de pregrado). UIS, Bucaramanga, Colombia. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Moreno, N., Font, V., & Ramirez, J. (2016). La importancia de los diagramas en la resolución de problemas de cuerpos deformables en Mecánica: el caso de la fuerza de fricción. Abril de 2014. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, Vol. 24, No 1. C. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 24, 158-172.
- NEMA Standards Publication LD 3-2000. (2001). *High-Pressure Decorative Laminates*. Virginia: National Electrical Manufacturers Association.
- Ordoñez, D. (2015). *Validación del Coeficiente de fricción dinámico mediante tres procedimientos para materiales de uso común en ingeniería* (Tesis de pregrado). Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Pavón, J., Villarraga, J., & Tobon, D. (2014). Influencia de los Parámetros Tribológicos en el Coeficiente de Fricción entre Polipropileno y Piel. *Ingeniería y Ciencia*, 139-160.
- Perez, W., Arroyave, J., & Acevedo, S. (2010). Determinación Experimental del coeficiente de fricción empleando sensores movimiento. *Scientia et Technica Año XVI*, 357-362.
- Persson, B., & Spencer, N. (1999). Sliding friction: physical principles and application. *Physics Today*, 66-68.
- Potyondy, J. G. (1961). Skin Friction between Various Soils and Construction Materials. *Géotechnique*, 339-353.
- Rabinowicz, E. (1951). The Nature of the Static and Kinetic Coefficients of Friction. *Journal of Applied Physics*, 1373-1379.
- Rico, Y. A. (2014). *Efecto de la fuerza de fricción en el contacto rueda-riel sobre el consumon medio de energía en operación del metro de Medellín*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Ricón, J., Romero, M., & Almendro, M. (2005). Fricción y desgaste de baldosas cerámicas de gres de monococcion y de gres porcelánico. *Boletín de la sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 352-356.
- Rodríguez, A. (2007). Metodología de cálculo y factores que afectan el coeficiente de fricción. *Ciencias Holguín*, 1-8.
- Serway, R., & Jewett, J. (2008). *Física Para Ciencias E Ingeniería*. Mexico: Cengage Learning.
- Song, H., Sungmin, C., & Rajendra, S. (2007). Prediction of dynamic friction forces in spur gears using alternate sliding friction formulations. *Elsevier*, 843-851.
- Tipler, M. (2003). *Física para la ciencia y la tecnología*. España: Reverte.
- Valdivia, L., Robles, F., & Santana, R. (2005). Tendencias tribológicas actuales en el conformado de la chapa metálica. *Ingeniería Mecánica*, 53-62.

- Vanegas, L., Abdel, M., & Arroyave, J. (2008). Determinación del coeficiente de fricción entre cerdas de acero de cepillos laterales para barrer calles. *Scientia et Technica Año XIV*, 165-169.
- Young, H., & Roger, F. (2009). *Física Universitaria*. Mexico: PEARSON EDUCACIÓN.