

DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA CAPACIDAD DE CARGA SCUFFING DE MATERIALES PSEUDO-LUBRICADOS. APLICACIONES DE LA FRICCIÓN MECANOQUÍMICA

MARLON R. CRUZ V.⁽¹⁾; PATRICIO LARA T.⁽²⁾; RODRIGO BULNES A.⁽²⁾

⁽¹⁾ Universidad Simón Bolívar. Dep. Ciencia de los Materiales, Caracas-Venezuela, email: mcruz@usb.ve

⁽²⁾ TRIBOTHEK Systems. Alcérreca 1144 Ofic. 4. Santiago, Chile, email: tribothek@gmail.com

Recibido: diciembre de 2010

Recibido en forma final revisado: mayo de 2011

RESUMEN

Esta investigación corresponde a las primeras validaciones experimentales de la fricción mecanoquímica (MQf) para un simple y directo cálculo de la Capacidad de Carga ante el gripado (CdC-*Scuffing*), en la que interactúan: material base, tratamiento superficial, lubricante, aditivos, condiciones de operación y fricción. Las buenas correlaciones obtenidas confirman la verdadera naturaleza termodinámica de procesos irreversibles del mal llamado “coeficiente de fricción”. En otras palabras, se confirma que la fricción empírica “on-site”, o fricción mecanoquímica, basado en la noción tribológica de 3er cuerpo, no es un fenómeno térmicamente dominado. Con este nuevo paradigma mecanoquímico, podría no ser necesario extender a más de unos cuantos minutos (inclusive segundos), la proyección de la CdC-*Scuffing*. Este nuevo método es aplicable para técnicas in-situ de evaluación de lubricantes dirigidos a potenciales clientes y/o desarrolladores de formulaciones de lubricantes.

Palabras clave: Lubricación, Capacidad de Carga al gripado, Fricción Mecanoquímica (MQf), 3er Cuerpo tribológico, Gripado.

EXPERIMENTAL DEVELOPMENT OF THE SCUFFING LOAD CARRYING CAPACITY OF PSEUDO-LUBRICATED MATERIALS. APPLICATIONS OF THE MECHANOCHEMICAL FRICTION

ABSTRACT

This research corresponds to the first experimental validations of the mechanochemical friction (MQf) for the simple and direct verified calculation of the s-LCC: Scuffing Load Carrying Capacity, which are interacting the following: base material, superficial treatment, lubricant additive and operation conditions. The good obtained correlation confirms the true non-equilibrium irreversible thermodynamic nature of the wrongly so called friction “coefficient”. In other words, it is confirmed that the empirical on-site friction, or mechanochemical friction, based on the notion of the 3rd tribological body, is-NOT- a thermally dominated phenomenon. With this new mechanochemical paradigm, it would not be necessary to extend beyond a few minutes (even seconds), the s-LCC projection technique for MQf. The new method is on-site applicable (to clients).

Keywords: , s-LCC, Mechanochemical Friction (MQf), 3rd tribological body, Scuffing, CdC-*Scuffin*.

INTRODUCCIÓN

Los lubricantes aditivados EP de Extrema Presión (EP), se utilizan en equipos y maquinarias de la industria pesada (minería, sistemas de turbogeneración, industria petrolera, entre otros). La importancia de las propiedades EP de los lubricantes, radican en la capacidad que puedan ofrecer los mismos en mantener una capa lubricante que evite

el contacto directo metal-metal y así reducir los daños generados por las fallas conocidas como *scuffing* (gripado) en las superficies bajo contacto y en movimiento.

Las fallas de *scuffing* se caracterizan por ser un tipo de desgaste adhesivo entre materiales, iniciado por altas presiones locales entre asperezas. Las altas presiones superan rápidamente el esfuerzo de fluencia del material,

provocando una súbita deformación plástica. Ante tal nivel de exigencia de presión en velocidad, el lubricante reacciona físico-químicamente aumentando la protección de la superficie. En rigor, el lubricante EP logra que el “coeficiente” de roce se acomode en velocidad, aumentando la carga transmitida entre superficies o, equivalentemente, disminuyendo la actividad destructiva del rozamiento. Es por esta razón que la quinta propiedad básica exigida a un lubricante es una buena Capacidad de Soporte de Carga (CdC); característica especialmente sensible a la fricción disipada. Las otras cuatro propiedades son: viscosidad, índice presión/viscosidad, compatibilidad con elastómeros y temperatura máxima de operación (Klüber, 2006).

En la práctica, esto último significa que la CdC, más que una propiedad, es un verdadero “atributo” de la dominante condición termodinámica local disipada por el lugar de roce. Simplemente, la situación termodinámica del tribo-contacto representa un sistema complejo cuya respuesta de fricción estará afectada no sólo por el lubricante (o la temperatura), sino también por las condiciones locales de operación (fuerza y velocidad) que influyen, provocando una particular “actividad” termodinámica de genéricas “estructuras secundarias”, mientras haya (micro) deslizamiento (Abdel-Aal, 2010). Esta fenomenología es adecuadamente explicada por la noción del 3er cuerpo, según la siguiente literatura especializada:

En un sistema tribológico la zona del contacto está formada por dos primeros cuerpos, los elementos de máquina y por una interfase o 3er cuerpo, de diferente composición, en la cual la velocidad entre los primeros cuerpos se “acomoda”. Ese *acomodo* procede de reacciones tribo-químicas y flujos de entidades metalúrgicas (Godet, 1984).

Considerando que dicho *acomodo*, básicamente pertenece a la cinética de materiales, se desarrolló una expresión consistente para el coeficiente de roce. La nueva expresión se denomina *Fricción Mecanoquímica (MQf)* (Bulnes, 2011), y viene dada en su forma más genérica por la siguiente expresión:

$$\mu + \varphi(t/\tau)\mu - \beta\mu^2 \quad \dots\dots(1)$$

Donde: μ es fricción tribo-química activada por medios mecánicos, $\varphi(t/\tau)$ se denomina “propagador estocástico” (t/τ) representa un tiempo adimensionalizado de reacción), y β es un factor termo-mecánico (contiene al número de Pecklet, el coeficiente de dilatación térmica y la temperatura de las superficies). El concepto de *MQf* se fundamenta en la visualización de un sistema tribológico desde el punto de vista de la Termodinámica de Procesos Irreversibles (Woods, 1985).

Basado en el hecho de que las fallas tribológicas son una respuesta a una condición Termodinámica crítica (originada principalmente por el acomodamiento en velocidad del rozamiento entre cuerpos), se emplea la *MQf* para caracterizar y predecir *in-situ* estas fallas sensibles a la velocidad y a la cinética físico-química disipada por la interfase.

El objetivo de este trabajo ha sido demostrar que la *MQf* suministra un criterio de selección para la rápida caracterización de materiales, proyectando la *CdC-Scuffing* (Capacidad de Carga *Scuffing*), sin realizar ajustes de interpolación y con poca cantidad de ensayos.

FUNDAMENTO DE LA FRICCIÓN MECANOQUÍMICA (MQf)

La *MQf* nace como una aproximación de la fricción (desde el punto de vista termodinámico en no-equilibrio irreversible). De manera muy simplificada, se fundamenta en la visión del rozamiento como un *black-box* (Figura 1), que contiene factores externos (velocidad, carga, temperatura, entre otras), e internos que, por lo demás, son indirectos (representados como t/τ). Es decir, la *black-box*, así denominada “lugar de roce”, disipa tasa de entropía y ésta, a su vez, es irreversiblemente “sostenida” por producción interna de entropía.

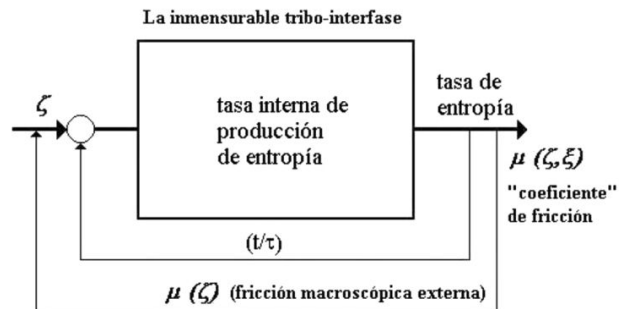


Figura 1. Esquema de la *black-box* para representar un tribo-contacto genérico. ζ denota “coordenadas externas” (velocidad, carga, temperatura, entre otras), ξ son coordenadas internas, y μ es la disipación mal denominada “coeficiente” de roce

La disipación más trascendental de la *black-box* corresponde a la ecuación (1). Como se puede deducir, es una disipación fuertemente afectada por la tasa interna de producción de entropía. Dicho de otra manera, el calor de fricción permite, literalmente hablando, vincular la tasa interna de producción de entropía con el “coeficiente” de roce que disipa la *black-box*.

El concepto de *MQf* ha sido inicialmente publicado por P.S. Pastén y R. Bulnes (Pastén & Bulnes, 2008), a partir del análisis del coeficiente de fricción desde el punto de

vista de la Termodinámica de Procesos Irreversibles, en la cual, según su análisis, la fricción se genera como una reacción exérgica sensible a la actividad del régimen de Energía Libre de Gibbs desarrollado por el contacto entre superficies. Posteriormente, Bulnes (Bulnes, 2011) precisa que dicha tribo-reacción proviene de una “colisión entre escalas de tiempo” la cual generaría una significativa deformación plástica en el tribo-contacto, demostrando, de esta manera, cómo es posible asociarla con las tasas de entropía, interna y externa (Figura 1).

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El experimento CdC-*Scuffing* corresponde a un *schok test* destructivo, empleando el mini-tribómetro TRK-T02 (Figura 2), el cual ha sido conceptualizado, desarrollado y construido por la empresa Chilena TRIBOTHEK^{Sys}. El TRK-T02 posee una configuración disco-contra-disco, y se ha denominado “mini” porque requiere sólo 100 ml de lubricante, a diferencia de otros equipos (configuración de 4 bolas -ASTM, 1994-, FZG -ASTM, 1997-, método Timken -ASTM, 2003-, entre otros) que pueden llegar a requerir 1000 ml o más de lubricante. Este mini-equipos emplea pares de discos-probetas ($\phi 45 \times 8$ mm), representativos del material y/o tratamiento superficial bajo estudio. El TRK-T02 posee un par de ejes que alojan los discos (uno de los ejes es el “conductor” y el otro es el “conducido”). Mediante un motor de CA de 1600W (con control variable de 1500 a 4700 rpm) se imprime un torque al disco conductor que así arrastra al conducido. La presión de la zona de contacto entre los discos (pistas de rodadura), se logra mediante un sistema hidráulico (Figura 2).

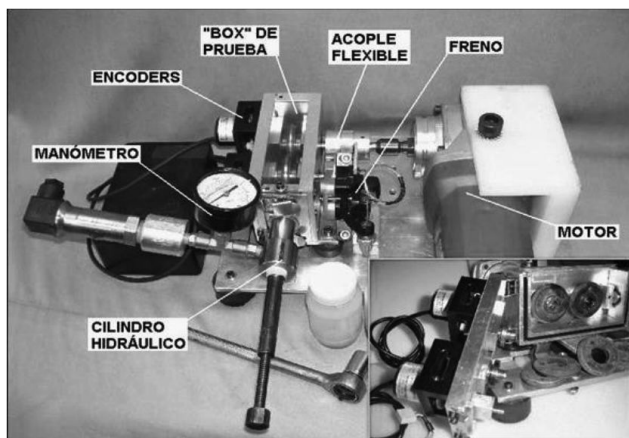


Figura 2. Mini-tribómetro TRK-T02 TRIBOTHEK^{Sys} (detalle box de prueba, y discos-probeta extremo inf. der.)

En la Tabla 1 se resumen las características del equipo y tipo de contacto entre discos.

Los materiales ensayados (Tabla 2) correspondieron a 2 aceros nitrurados (Nitro1 y Nitro2, con 6 y 3 pares de

discos respectivamente), y 1 acero cementado (Cem1, con 3 pares de discos). El material base de todos los discos ensayados en este trabajo, es un acero SAE 4340, y los tratamientos térmicos y de superficie cumplen con los estándares exigidos para el diseño y fabricación de camisas de martillos de perforación de la industria minera.

Tabla 1. Resumen de características del equipo (TRK-T02), y tipo de contacto entre discos

Tipo de Contacto	Lineal : disco-sobre-disco
Volumen de lubricante empleado	100 ml
Tipos de discos	Disco “conductor”: $\phi = 45$ mm; ancho pista = 5,0mm Disco “conducido”: $\phi = 45$ mm; ancho pista = 1,5mm
Motor que imprime el torque	1600W con control variable de 1500 a 4700 rpm
Sistema de aplicación de carga	Sistema hidráulico con aplicación progresiva de carga

Tabla 2. Características de acero empleado y los tratamientos termoquímicos aplicados

	Muestra		
	Nitro 1	Nitro 2	Nitro 3
Sustrato	Acero SAE 4340		
Tratamiento Superficial	Nitruración Cod.DT-01	Nitruración Cod.DT-02	Nitruración Cod.DT-03
Dureza Superficial (HRC)	52-54	53-56	58-62
Espesor de capa y/o zona de difusión (mm)	máx. 0,2	máx. 0,2	máx. 0,5
Acabado Superficial	Ra = 0,25 ± 0,02 mm		

Todos los pares de discos empleados presentaron una terminación en rectificado (Ra = 0,25 ± 0,02 mm), estos fueron previamente preparados para alisar y asentar el contacto en periodos de 15 min, bajo condición de rodadura pura (teórica), a 1500 (rpm). Los ensayos de CdC-*Scuffing* fueron realizados en un intervalo de velocidades entre 3,53 y 10,90 m/s, bajo condición deslizamiento puro. En la Tabla 3 se resumen las condiciones de ensayos.

Tabla 3. Resumen de las condiciones de ensayos

Preparación de Discos	15 min en rodadura pura a 1500 rpm a nivel escalonado de carga (15, 30, y 45 Bar) de 5 min c/u
Tipo de Lubricante	Emulsión de aceite mineral + agua no tratada
Aplicación de Carga	Carga de incremento continuo hasta alcanzar criterio de control de parada
Intervalo de Velocidades	3,53 – 10,90 m/s
Tipo de movimiento entre discos	Deslizamiento puro
Control de Parada	Al alcanzar 30% de variación de velocidad media en el disco conducido

En todos los casos, se utilizó una emulsión lubricante correspondiente a una mezcla de aceite mineral de elevada viscosidad cinemática (ISO VG 320, @ 40°C 320cSt y @100°C 25cSt) y agua no-tratada (proporción aceite/agua = 1/12, respectivamente). Esta emulsión es la típicamente utilizada en faenas de perforaciones mineras (máquinas de percusión). La temperatura media de la emulsión varió entre 45 a 55 °C.

El criterio de fin de ensayo para cada par de discos fue el de “fluctuaciones anómalas de la velocidad de rotación de los discos”. Cuando se presentaba durante el ensayo una fluctuación anómala de la velocidad por el orden del 30% del valor medio, se registraba la carga medida por el manómetro.

Una vez culminado todos los ensayos se graficaron los resultados de CdC-Scuffing (Carga vs. Velocidad).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resumen de los resultados obtenidos puede verse en la Figura 3, en donde se grafica la carga a la cual se detuvo el ensayo según el criterio de parada (Tabla 3), para cada velocidad ensayada.

En todos los casos, se observa la clara disminución de la CdC con el aumento de la velocidad (el lubricante base usado contiene una mínima cantidad de precursores azufre y fósforo, total < 0,15%). El desempeño del Nitro2 fue superior al Cem1, pero una tendencia contraria manifestó el Nitro1. La fotografía inserta en la Figura 3, corresponde al daño generado en Cem1 (de izquierda a derecha el daño escala con la velocidad). A manera de comparación, los datos de cada serie experimental fueron interpolados mediante curvas de regresión del mismo tipo (línea continua

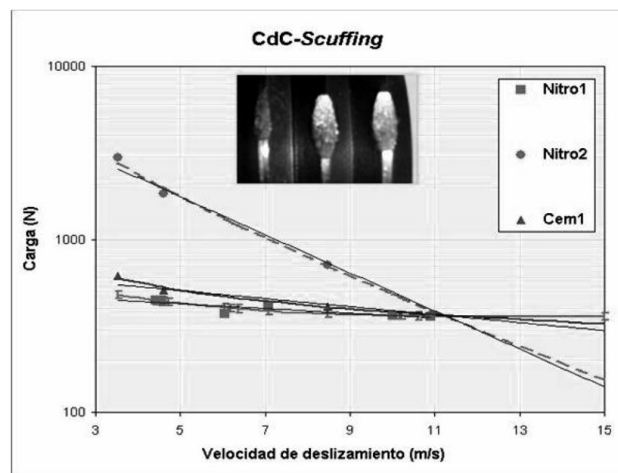


Figura 3. Resultados experimentales de los ensayos de la CdC-Scuffing para las tres condiciones ensayadas

delgada). En línea más gruesa se muestra la predicción de la MQf, la cual requiere de una cantidad mínima de datos experimentales (en la mayoría de los casos sólo tres puntos).

Los aceros nitrurados mostraron una mayor resistencia al desgaste súbito (*scuffing*) respecto del cementado. El desempeño contrario del Nitro1 a partir de una velocidad de 11 m/s, puede atribuirse a la generación de *debris* en mayor medida. Sin embargo, este *shock-test* no permite verificar tal suposición, pudiendo sólo indicarse que el mini-aparato TRK-T02 caracteriza rápida y consistentemente las respuestas tribológicas de materiales diversos en condiciones de lubricación límite.

Las curvas obtenidas de CdC-*scuffing* vs. Velocidad se intersectan a un valor de aproximadamente de 11 m/s, este valor podría corresponder a la CdC del acero base. Para verificar dicha suposición sería necesario ensayar discos sin tratamiento térmico y analizar los residuos de desgaste (*debris*) inmersos en la mezcla lubricante, porque a velocidades mayores de 11 m/s se presenta un cambio de característico en el desempeño de los materiales ensayados.

Este tipo de gráficas de Capacidad de Carga ante Gripado (CdC-*Scuffing*) vs. Velocidad presentan gran utilidad para aplicaciones industriales porque permiten definir una zona de operación segura en sistemas lubricados en la cual las fallas de gripado son catastróficas y sensibles a la velocidad. A manera de ejemplo, y a parte de las camisas de martillos de perforación de la industria minera, son los de sistemas de turbogeneradores, los cuales se caracterizan por elevadas velocidades de deslizamiento. En estos casos el empleo del mini-equipos TRK-T02, considerando la proyección de los datos empleando MQf, ayudaría a mejorar la selección de aceites y aditivos, y/o el establecimiento de condiciones de operación que minimicen el riesgo de *scuffing* o gripado súbito de superficies.

La proyección de los datos experimentales empleando MQf se obtuvo mediante el uso de la coordenada interna (t/τ) reflejada en la ecuación 1, la cual se conoce como tiempo cinético (Bulnes, 2011). Esta coordenada interna caracteriza la cinética de reacción en la interfase, en la cual están interactuando las superficies en contacto, los debris, lubricante y condiciones de operación, que algunos autores han definido como “pequeño reactor de 3er cuerpo” (Pastén & Bulnes, 2008).

CONCLUSIONES

- Se ha observado un posible valor límite a una velocidad de aproximadamente 11 m/s, la cual podría corresponder a la CdC del acero base.
- Basado en el concepto de MQf la tercera coordenada (t/τ), que sólo requiere una cantidad mínima de datos experimentales, permite proyectar la CdC-Scuffing con un ajuste mayor o al menos igual al obtenido con curvas de regresión estándar que requieren de un gran número de datos experimentales.
- La MQf permite acceder al cómputo de la CdC-Scuffing en apenas minutos (inclusive segundos), a un costo mínimo comparado con las técnicas de la tribometría actual.
- Probablemente la potencia predictiva de la MQf se debe a su definición que considera el desempeño del tercer cuerpo tribológico (Godet, 1984).

REFERENCIAS

- ABDEL-AAL, H. (2010). *Preface*. Int. J. Materials and Product Technology, Vol. 38, Nr. 1.
- ASTM D4172 – 94 (1994). *Standard test method for wear preventive characteristics of lubricating fluid (four-ball method)*.
- ASTM D5182 – 97 (1997). *Standard test method for evaluating the scuffing load capacity of oils (FZG visual method)*.
- ASTM D2509 – 03 (2003). *Standard test method for measurement of load-carrying capacity of lubricating grease (Timken method)*.
- BULNES, R. (2011). *Mechanochemical friction of third-body as an exergetic collision*. Tribology Online (TROL), Vol. 6, No. 1, pp.55-63.
- GODET, M. (1984). *The third-body approach: a mechanical view of wear*. WEAR 100, pp. 437-452.
- KLÜBER LUBRICATION (2006). *Tema Central: lubricación de engranajes*. TriboJournal, Vol.1 p. 4.
- PASTÉN, P.S. & BULNES, R. (2008). *El coeficiente de fricción como una Reacción Exergética*. Revista Iberoamericana de Física (RIF), Vol.4, N° 1, pp. 35-42.
- WOODS, L. C. (1985). *The thermodynamics of fluid systems*. Oxford, Oxford University Press, Oxford Engineering Science Series, Volume 2.