

## FENÓMENO DE NANO-LUBRICACIÓN EN UN CONTACTO HDD/CABEZAL. MODELADO Y SIMULACIÓN

José Di Paolo y Marcelo E. Berli

Grupo de Investigación en Mecánica de Fluidos

Departamento Ingeniería Industrial - Facultad Regional Santa Fe

Universidad Tecnológica Nacional

Lavaise 610, Santa Fe, Argentina (CP:3000)

e-mail: jdipaolo@bioingenieria.edu.ar

**Resumen:** En este trabajo se presenta un modelo teórico del fenómeno de lubricación de un contacto lineal lubricado entre elementos rígidos y lisos, cuya geometría se asemeja al contacto entre un dispositivo lecto-grabador y el disco rotante, incluyendo la existencia de un fluido lubricante no Newtoniano descrito por un modelo reológico de ley de potencia. El modelo contempla las fuerzas de origen molecular y se resuelve mediante una técnica numérica basada en el método de elementos finitos.

Los resultados muestran que las fuerzas moleculares se manifiestan significativamente sobre la carga para espesores menores de 5 nm y velocidades tangenciales del disco menores a los 100 mm/s. En los discos actuales (velocidades superiores a 50 m/s), esto significa que la carga sería puramente hidrodinámica, mientras que en ciertos micro-motores con contactos similares (ej: micro motores para microelectromecánica) que desarrollan velocidades de 14 mm/s, las fuerzas moleculares podrían desestabilizar su funcionamiento.

**Palabras Claves:** Elementos finitos, nano-lubricación, fluido pseudoplástico, fuerzas moleculares, disco rígido.

**Abstract:** This paper presents a theoretical model of a lubricated line contact between smooth rigid elements, whose geometry is similar to that of the contact between reading-recording head and rotating disk, including the existence of a non-Newtonian lubricating fluid modeled by a power law. The model considers the molecular forces and is solved by a numerical technique based on the finite element method. The results show that molecular forces manifest significantly over the load at thicknesses less than 5 nm and sliding speeds lower than 100 mm/s. In current discs (speeds over 50 m/s), this means that the load would be purely hydrodynamic, while in certain micro engines (like those founded in micro-electromechanics devices) whose speeds could be around 14 mm/s, the oscillatory nature of molecular forces could destabilize its operation condition.

**Keywords:** Finite element, nano-lubrication, pseudoplastic fluid, molecular forces, hard disk.

### INTRODUCCION

La necesidad actual de aumentar el volumen de información contenida en los dispositivos de almacenamiento magnéticos (discos rígidos, cuya sigla en inglés es HDD), solo puede lograrse si se satisfacen requerimientos tecnológicos que permitan realizar

la lectura de los datos en forma precisa y minimizar las posibilidades de desgaste y deterioro del dispositivo (Brunner, 2009; Brushan, 1996; Hamamoto et al., 2012; Brushan et al., 1995; Elsharkawy, 1997; Elsharkawy, 2001). En este sentido, el incremento en la densidad de almacenamiento está fuertemente ligado a la reducción en la distancia entre el cabezal lecto/

grabador y la superficie del disco rotante. Para lograr densidades actuales que superan los 400 Gbit/pulg<sup>2</sup> (Brunner, 2009) uno de los desafíos mas importantes para la industria de HDDs desde el punto de vista tribológico, es lograr que el cabezal pueda sobrevolar sobre el disco a distancias (espesor lubricante) iguales o inferiores a los 5 nm (Brunner, 2009).

Ante distancias tan pequeñas, resulta fundamental lograr una eficiente lubricación para evitar el contacto directo entre el cabezal y el disco y evitar el desgaste, reduciendo la posibilidad de deterioro del dispositivo y la consiguiente pérdida de información (Brunner, 2009; Elsharkawy, 2001). En este sentido, el desarrollo de recubrimientos ultradelgados y lubricantes que permitan mantener una película ininterrumpida entre el cabezal y el disco, son parte de los desafíos tecnológicos mas elevados en el diseño actual de discos rígidos. El lubricante actualmente utilizado que cumple con la mayoría de los requisitos para el funcionamiento del dispositivo (adherencia a la superficie, baja evaporación, estabilidad química y térmica, hidrofóbico, etc), es el perfluorpolieter (PFPE). La característica reológica que caracteriza a este lubricante es la de ser es un fluido pseudoplástico (Jiang et al., 2006), característica que conduce al desarrollo de esfuerzos cortantes y campos de presiones de valores reducidos respecto de un fluido Newtoniano (Elsharkawy, 1997), repercutiendo en una reducida fricción y menores requerimientos de la carga a ser aplicada sobre el contacto para lograr los espesores lubricantes nanométricos deseados.

Trabajos teóricos anteriores abordaron el estudio del fenómeno de lubricación hidrodinámica de un contacto equivalente entre un cabezal y el disco rotante. Elsharkawy (1997) desarrolló un modelo de lubricación para el contacto cabezal-disco considerando un fluido lubricante no Newtoniano (pseudoplástico) para modelar el comportamiento reológico del líquido a través de una ley de potencias, con el objetivo de investigar el efecto del exponente no

Newtoniano ( $n$ ) de dicha ley sobre los campos de presión, los coeficientes de fricción y la capacidad de carga del contacto. Sus resultados muestran una elevada dependencia entre los valores de presión y el exponente  $n$ , concluyendo que las máximas presiones decrecen notablemente conforme decrece  $n$ . Esto es, a medida que el fluido lubricante se torna mas pseudoplástico, las presiones se reducen llevando a una reducción de la carga que debe aplicarse sobre el contacto, lo cual se resalta como una característica favorable para el diseño del dispositivo (Elsharkawy, 1997). En consecuencia, Elsharkawy (1997) afirma que la característica no Newtoniana de un potencial lubricante debe ser considerada en la formulación de modelos teóricos del contacto lecto-grabador lubricado. En un trabajo posterior, Elsharkawy (2001) incluye el efecto de la rugosidad superficial en el mismo modelo y muestra que, manteniendo las conclusiones del anterior trabajo, las rugosidades influyen negativamente sobre las máximas presiones si su orientación es longitudinal respecto de la dirección de movimiento, y positivamente cuando dicha orientación es transversal. No obstante, ante las capacidades de pulido actuales, se pueden lograr rugosidades de hasta 0.15 nm (Brunner, 2009) motivo por el cual en este primer estudio se considerará a las superficies como perfectamente lisas, al igual que en el primer trabajo de Elsharkawy.

Por otro lado, otros trabajos centrados en el estudio de las fuerzas moleculares sobre micro-contacts lubricados, han mostrado que para espesores muy pequeños es posible que se manifiesten las fuerzas de origen molecular, las cuales pueden desarrollar valores que enmascaren a las fuerzas de origen hidrodinámico. En este sentido, Di Paolo y Berli (2013) desarrollaron un modelo de lubricación hidrodinámica para un microcontacto lineal lubricado con fluido pseudoplástico, mostrando que ante espesores del lubricante que separa los elementos menores a los 10 nm, las fuerzas de solva-

tación (ver modelo) se manifiestan modificando las predicciones de la carga hidrodinámica, siendo estas modificaciones de notoriedad creciente conforme los espesores lubricantes descienden desde los 5 nm. Adicionalmente, las contribuciones moleculares a la carga sobre el contacto muestran influencias superiores para fluidos pseudoplásticos, evidenciando que la naturaleza reológica del líquido debe considerarse al predecir el comportamiento mecánico de un microdispositivo lubricado.

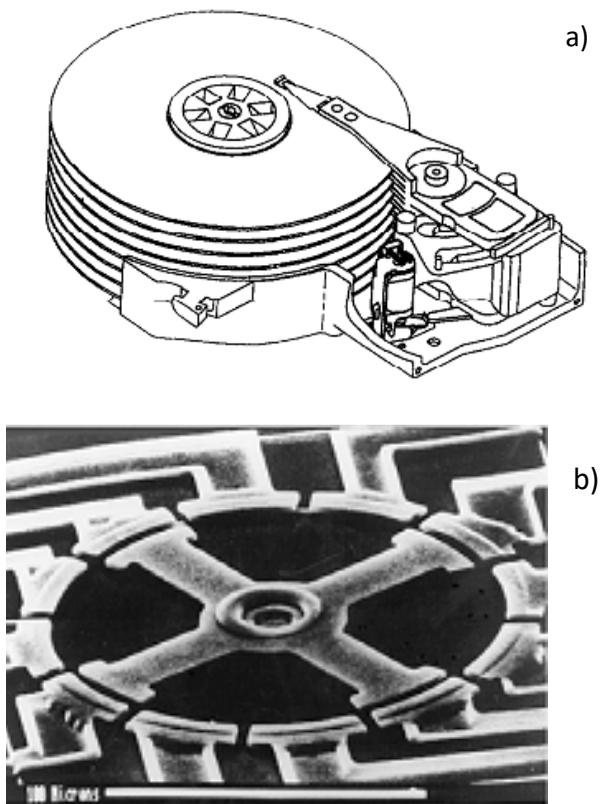


FIGURA 1: ESQUEMAS DE A) UN DISCO RÍGIDO (APLICACIÓN PRINCIPAL DE ESTE TRABAJO) Y B) MICROMOTOR ELECTROSTÁTICO, AMBOS EXTRAÍDOS DEL PAPER DE BHUSHAN (1995).

En este trabajo se continúa con la línea de investigación iniciada por Di Paolo y Berli (2013), presentando un modelo de lubricación de un cabezal lecto-grabador de un disco rígido en contacto lineal con el disco magnético rotante, lubricados mediante una película de fluido interpuesta de espesores nanométricos cuyo comportamiento reológico se modela mediante

una ley de potencia. El modelo consta además de las ecuaciones que describen las influencias de las fuerzas moleculares sobre las tensiones que soporta punto a punto cada superficie, lo cual puede modificar las predicciones sobre los campos de presiones y las cargas sobre el contacto respecto de los resultados obtenidos al considerar solamente la contribución hidrodinámica. La complejidad y no linealidad del modelo junto con el desconocimiento del dominio donde se resuelven las presiones hidrodinámicas, conducen a un esquema numérico de solución basado en el método de elementos finitos. Los resultados están orientados a mostrar la influencia de las fuerzas moleculares y los posibles efectos no Newtonianos del fluido lubricante sobre los campos de presión y las cargas sobre el contacto. Las predicciones de este trabajo podrán ser útiles para orientar la experimentación sobre contactos lineales lubricados de dimensiones micrométricas y separaciones nanométricas, como ser los discos rígidos actuales (principal aplicación de este trabajo, ver figura 1 a) o algunos micro-motores fabricados para dispositivos micro-electromecánicos (Bhushan, 1995) (MEMs, ver figura 1 b).

## MODELO

La figura 2 muestra un esquema del modelo equivalente, representado por un lecto-grabador que se mantiene estático sobre una superficie plana que representa al disco rotante moviéndose con una velocidad tangencial  $V$  en la zona de contacto, manteniendo un canal de lubricación de dimensiones nanométricas entre los elementos. En la zona de contacto, se desarrolla un campo de presiones  $P(X)$  en el fluido circulante que debe equilibrar la acción de la carga  $(W)$  y de las fuerzas moleculares. Mediante un método de perturbación, se derivó una ecuación de Reynolds modificada (Di Paolo and Berli, 2006) que gobierna la generación de dichas presiones ante las siguientes hipótesis:

- Aproximación de lubricación ( $H(-B) \ll B$ ) y fluido incompresible.
- Fluido no Newtoniano (pseudoplástico) modelado como ley de potencia.
- Flujo estacionario, unidireccional, laminar y Couette dominante.
- Flujos internos (en dirección del eje de los cilindros) despreciables.
- Rugosidad superficial despreciable.
- Temperatura constante.

En forma integral, dicha ecuación es:

$$P(X) = 12n\mu_0 \int_{-B}^X \left[ \frac{H(-B)}{H(X)} \right]^{n-1} \frac{V_m H(X) - Q_c}{H(X)^3} dx \quad (1)$$

donde  $H(X)$  es el espesor del canal de lubricación formado entre las superficies,  $Q_c$  es el caudal circulante,  $V_m = V/2$  la velocidad media entre el lecto-grabador y el disco y  $n$  es el exponente de la ley de potencias. Para este trabajo,  $n$  puede variar entre 0,60 y 1,00. Notar que:

$$\mu_{eq} = \mu_0 n \left[ \frac{H(-B)}{H(X)} \right]^{n-1} \quad (2)$$

es la denominada viscosidad equivalente, cuyo valor está íntimamente ligado al espesor del canal lubricante. Como  $H(X)$  será menor o a lo sumo igual que  $H(-B)$  (ver figura 1) en todos los puntos del dominio, si el exponente  $n$  es menor a 1 (fluido pseudoplástico) entonces  $\mu_{eq}$  será menor a  $\mu_0$  para cualquier punto, siendo  $\mu_0$  la viscosidad de referencia fuera de la zona de contacto.

Las condiciones de contorno impuestas para resolver la ecuación (1), son las siguientes:

$$\begin{aligned} X = -B, \quad P = P_0 = 0, \\ X = X, \quad P = P_0 = dP/dX = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

Siendo  $X$  una ubicación desconocida donde el problema hidrodinámico culmina.  $X$  transforma la

formulación del problema en una formulación de frontera libre. Para este trabajo,  $B=4.1$  mm,  $\mu_0=0.002$  Pa.s y  $V$  será utilizado como parámetro, pudiendo variar entre 1 mm/s y 10 m/s.

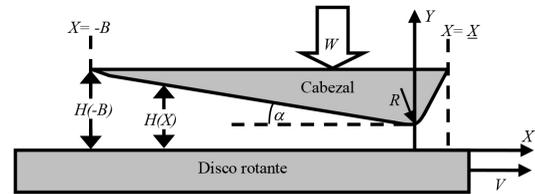


FIGURA 2: REPRESENTACIÓN DEL CONTACTO LUBRICADO.

Las fuerzas de solvatación (o estructurales) son fuerzas de interacción entre superficies sólidas cuando se aproximan para formar canales muy estrechos. Algunos autores han estudiado las fuerzas estructurales, mostrando en forma unánime que estas fuerzas tienen una característica oscilatoria que decae con el aumento de la separación de los sólidos (espesor del canal de lubricación) (Israelachvili, 1992; Teodorescu et al., 2006).

Se comportan como fuerzas variables, tornándose atractivas o repulsivas en forma periódica en función del espesor lubricante, con un período igual al diámetro medio de las moléculas del fluido (Israelachvili, 1992; Teodorescu et al., 2006). Estas fuerzas oscilatorias reflejan el reordenamiento constante de las moléculas del fluido en láminas discretas cuando están restringidas al espacio confinado por los sólidos.

Como una primera aproximación (Israelachvili, 1992; Teodorescu et al., 2006), estos efectos se pueden describir mediante una tensión normal de solvatación considerada como una función cosenoidal, cuya amplitud disminuye exponencialmente con la distancia entre dichos sólidos (espesor del canal). De esta manera, la tensión de solvatación puede ser expresada como:

$$t_s = -Ce^{-\frac{H(X)}{a}} \cos\left(2\pi \frac{H(X)}{a}\right) \quad (4)$$

donde  $a$  es el diámetro medio de las moléculas del líquido lubricante y  $C$  es la tensión normal medida en el caso límite para  $H(X) \rightarrow 0$ . Los valores de dichos parámetros fueron extraídos de un anterior trabajo:  $a = 1 \text{ nm}$  y  $C = 172 \text{ MPa}$  (Teodorescu et al., 2006). Por otro lado, Las fuerzas de atracción de van der Waals se desarrollan entre superficies separadas por distancias muy estrechas. En este trabajo, se utiliza una expresión de la tensión normal desarrollada punto a punto debido a las fuerzas moleculares, propuesta por Israelachvili (1992), utilizada por algunos autores (Teodorescu et al., 2006), de acuerdo a la cual existe una atracción inducida por las fuerzas de van der Waals como función de la separación de los sólidos, dada por la siguiente ecuación (Israelachvili, 1992):

$$t_w = -\frac{A}{6\pi H^3(X)} \tag{5}$$

donde  $A$  es la constante de Hamaker. En este trabajo se considera un valor de  $A = 10^{-19} \text{ J}$  (Teodorescu et al., 2006).

Tanto para la tensión de van der Waals como la tensión de solvatación, en este trabajo se considera que las mismas deben retomar el valor referencia para un punto alejado a la derecha del centro del contacto y a igual distancia que el punto de entrada ( $X = -B$ ). Para que ello ocurra, se supone que el dominio termina en  $X = B$ , es decir que:

$$X = B, \quad t_w = t_s = 0 \tag{6}$$

Cabe mencionar que la presión hidrodinámica  $P_h$  es nula más allá de  $X$ , por lo que en  $X = B$   $P_h$  también cumplirá la condición (6).

El canal de lubricación que determina el espesor lubricante consiste en dos tramos. El primero, ubicado entre  $X = -B$  y  $X = 0$  (ver figura 1), es un canal convergente confinado entre un plano horizontal (disco rotante) y una recta que representa a la superficie

del cabezal sobre el disco. El segundo tramo es una idealización de una superficie suavizada para evitar zonas de concentración de tensiones en el cabezal, y se describe mediante una parábola que es función de un radio de acuerdo  $R$ . En la zona de máximo acercamiento que se empalma con la recta de la primera zona en  $X = 0$ . Allí, la pendiente de la parábola es nula, mientras que al considerar pequeños ángulos de inclinación, la pendiente de la recta es tan pequeña que el empalme se realiza lo suficientemente suave como para no provocar problemas de origen numérico. Las ecuaciones del canal en cada tramo son las siguientes:

$$H(X) = -\left(\frac{H(-B) - H(0)}{B}\right)X + H(0); \quad -B \leq X < 0 \tag{7}$$

$$H(X) = H(0) + \frac{X^2}{2R}; \quad 0 \leq X \leq B \tag{8}$$

donde  $H(0)$  es la separación en el punto de máximo acercamiento,  $R$  el radio de acuerdo al que se aproxima la parábola, siendo para este trabajo  $R = 5 \text{ mm}$  y  $\alpha = 0,045^\circ$  (Elsharkawy, 2001) (ver figura 2).

Por último, la carga que debe soportar el campo de presiones ( $W_h$ ) en el fluido, es la suma de la carga aplicada más las fuerzas moleculares, esto es:

$$W + \int_{-B}^B (t_s(X) + t_w(X)) dX = W + W_s + W_w = \int_{-B}^B P(X) dX = W_h \tag{9}$$

Donde  $W_h$  es la carga hidrodinámica,  $W_s$  la carga debido a las fuerzas de solvatación,  $W_w$  la carga debido a las fuerzas de van der Waals y  $W$  la carga total que debe aplicarse externamente sobre el contacto.  $W$  puede conocerse a partir del cálculo de  $W_h$ ,  $W_s$  y  $W_w$ .

## MÉTODO

El fuerte acoplamiento que existe entre la presión del fluido y el canal, y el desconocimiento del dominio

donde las ecuaciones deben ser resueltas, son las principales dificultades para resolver analíticamente las ecuaciones, lo cual hace necesario el uso de métodos numéricos.

En este trabajo, se utilizó una técnica computacional basada en:

- Discretización de las ecuaciones por el método de Elementos Finitos a través de la formulación de Galerkin, utilizando funciones de prueba lineales.
- Solución simultánea de las ecuaciones por el método de Newton, involucrando la determinación del dominio del problema en cada iteración.
- Discretización adaptable en función de cada nueva posición de la frontera libre y de la distribución nodal inicial.
- Proceso de continuación paramétrica con control del paso del parámetro.

Para el manejo de la ubicación de X y de la discretización nodal se utilizó una aplicación unidimensional del método de los spines creado para la localización de superficies libres (Di Paolo and Berli, 2006; Berli et al., 2009). El algoritmo computacional fue programado en lenguaje FORTRAN y puede ser ejecutado eficientemente en computadoras personales. El mismo fue preparado de manera que las únicas incógnitas a resolver fueran: la presión hidrodinámica en cada nodo, el caudal (Qe) y la posición de X; es decir que para NN nodos seleccionados en el dominio de solución, habrá NN+2 incógnitas a resolver. El exponente de viscosidad (n) y H(0) se toman como parámetros sobre los cuales se pueden realizar procesos de continuación paramétrica.

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

La predicción de la carga que debe ser aplicada al cabezal para lograr una distancia de sobrevuelo inferior a los 5 nm, tiene una dependencia directa con la velocidad de rotación del disco y por lo tanto, de la velocidad de deslizamiento entre el cabezal y el disco, como puede observarse en la figura 3. El valor de la

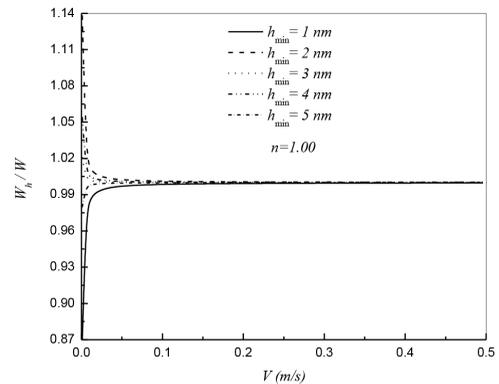


FIGURA 3: COCIENTE ENTRE LA CARGA HIDRODINÁMICA ( $W_h$ ) Y LA CARGA TOTAL ( $W$ ) EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTO DEL DISCO, PARA DISTINTOS ESPESORES LUBRICANTES Y FLUIDO NEWTONIANO ( $n=1,00$ ).

velocidad determinará cuán relevante es la presencia de fuerzas moleculares en la determinación de la carga respecto de las predicciones realizadas al considerar solamente una contribución hidrodinámica. Como es esperable, dicha dependencia se hará mas evidente cuanto menor sea la distancia que separa el cabezal del disco. Por ejemplo, para un fluido Newtoniano ( $n=1,00$ ), la fuerza de origen hidrodinámico contribuye sobre la carga total en un 86 % cuando el espesor lubricante es de 1 nm y la velocidad es de 1 mm/s, mientras que esta contribución es del 98 % para un espesor de 5 nm e idéntica velocidad, siendo el resto del porcentaje aportado por las fuerzas moleculares. Para una velocidad de 100 mm/s, la carga hidrodinámica contribuye en aproximadamente un 99 % para un espesor de 1 nm y es prácticamente la única carga significativa sobre el contacto para espesores superiores. Para velocidades mayores a 100 mm/s, la figura 3 muestra que la contribución de las fuerzas moleculares es despreciable frente a la magnitud de la carga hidrodinámica.

La figura 4 muestra que aunque la tendencia predicha en la figura 3 se mantiene, las proporciones ( $W_h / W$ ) son dependientes de la naturaleza reológica del fluido, lo cual se muestra en detalle en la figura 5 y concuerda cualitativamente con el trabajo

de Elsharkawy (1997). En este sentido, la pseudo-plasticidad del fluido lubricante reduce las presiones hidrodinámicas realizando así el efecto de las fuerzas moleculares para velocidades de deslizamiento bajas. En relación a los valores estudiados anteriormente, para un fluido pseudoplástico ( $n=0,60$ ) y una velocidad de deslizamiento de 1 mm/s, la contribución hidrodinámica es de aproximadamente un 54 % para un espesor de 1 nm y de un 98 % para un espesor de 5 nm, mientras que para una velocidad de 100 mm/s la carga hidrodinámica aporta un valor superior al 99 % a la carga total en todos los casos. Una característica destacable de las figuras 3 y 4 es que para algunos valores del espesor lubricante que se encuentran entre 1 nm y 5 nm la carga hidrodinámica es superior a la carga total. Esto se debe a que las fuerzas debido a las presiones de solvatación son oscilantes en función del espesor lubricante, tornando su efecto en algunos casos atractivo y en otros repulsivo, motivo por el cual para ciertos espesores, las presiones hidrodinámicas deben soportar no solo la carga externa sobre el contacto sino también el efecto atractivo de las fuerzas moleculares, mientras que para el caso repulsivo, las fuerzas moleculares reducen los requerimientos hidrodinámicos para soportar la carga aplicada. Mas adelante en el texto se discutirá sobre las posibles consecuencias de estas oscilaciones sobre la estabilidad del contacto.

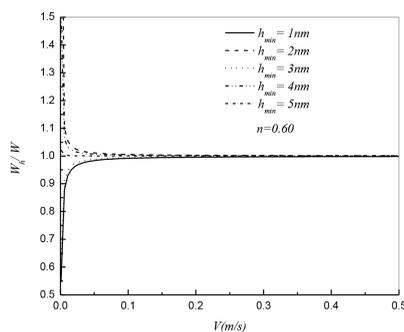


FIGURA 4: COCIENTE ENTRE LA CARGA HIDRODINÁMICA ( $W_h$ ) Y LA CARGA TOTAL ( $W$ ) EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTO DEL DISCO, PARA DISTINTOS ESPESORES LUBRICANTES Y FLUIDO PSEUDOPLÁSTICO ( $N=0,60$ ).

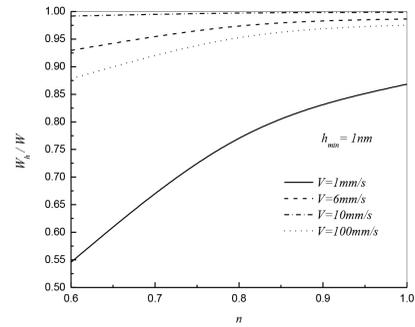


FIGURA 5: COCIENTE ENTRE LA CARGA HIDRODINÁMICA ( $W_h$ ) Y LA CARGA TOTAL ( $W$ ) EN FUNCIÓN DEL EXPONENTE DE LA LEY DE POTENCIA ( $n$ ), PARA DISTINTOS VELOCIDADES DE DESLIZAMIENTO DEL DISCO.

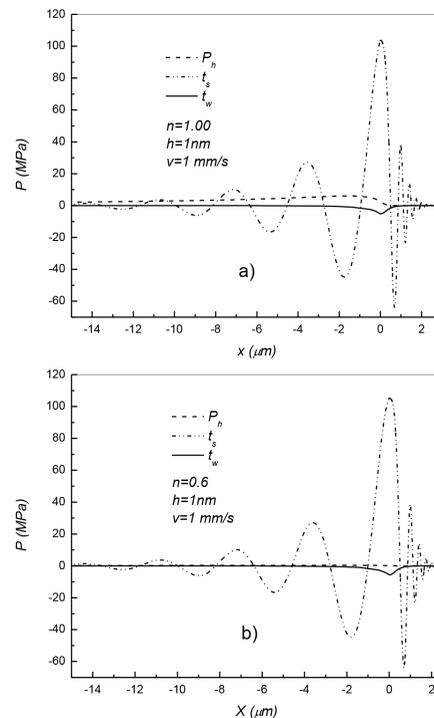
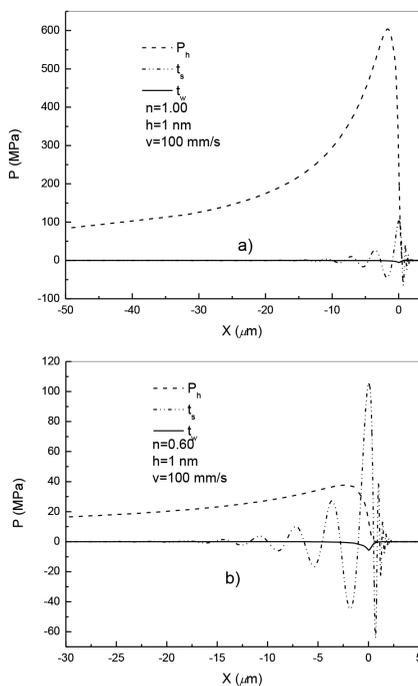


FIGURA 6: PRESIÓN HIDRODINÁMICA, TENSIONES DE SOLVATACIÓN Y TENSIONES DE VAN DER WAALS PARA UNA SEPARACIÓN CABEZAL-DISCO DE 1 NM Y VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTO DE 1 MM/S, PARA FLUIDO A) NEWTONIANO ( $N=1,00$ ) Y B) NO NEWTONIANO ( $N=0,60$ ).

En correspondencia a los resultados ya discutidos, las figuras 6 a) y b) muestran las curvas de presión y las tensiones debido a las fuerzas moleculares. Puede observarse que para un espesor de 1 nm y una velocidad de 1 mm/s, las tensiones debido a fuerzas moleculares muestran valores de dimensiones que superan en hasta un 150 % el valor máximo de las

presiones hidrodinámicas para fluido Newtoniano ( $n=1,00$ ) y en hasta un 350 % para fluido pseudoplástico con  $n=0,60$ . No obstante, la naturaleza oscilante de las tensiones de solvatación (valores elevados positivos pero también negativos respecto de  $P_h$ ) conducen a que su efecto neto (integral en el dominio) no se manifieste con las diferencias mencionadas, como se discutió en el párrafo anterior.

Estos resultados permiten visualizar que las fuerzas moleculares, principalmente de solvatación, tienen dimensiones importantes para espesores menores a 1 nm y velocidades muy bajas de operación, que pueden modificar significativamente las predicciones al considerar solamente la componente hidrodinámica.



**FIGURA 7: PRESIÓN HIDRODINÁMICA Y TENSIONES DE SOLVATACIÓN Y DE VAN DER WAALS PARA UNA SEPARACIÓN CABEZAL-DISCO DE 1 NM Y VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTO DE 100 MM/S, PARA FLUIDO A) NEWTONIANO ( $N=1,00$ ) Y B) NO NEWTONIANO ( $N=0,60$ ).**

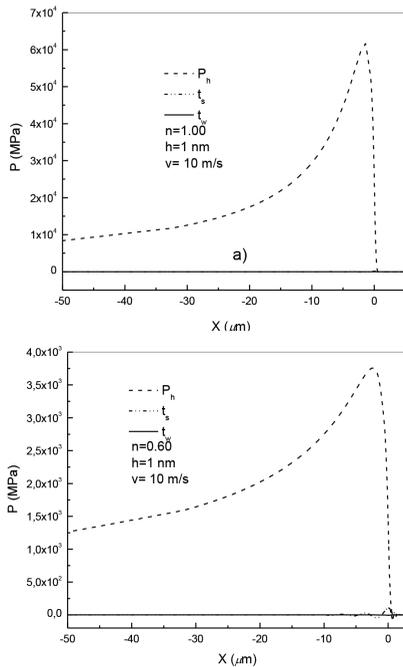
Para un espesor de 1 nm y una velocidad de 100 mm/s (figuras 7 a y b), las presiones en el fluido se incrementan en forma significativa reduciendo así

el efecto de las fuerzas moleculares respecto a los efectos hidrodinámicos. Para fluido Newtoniano, se puede observar que la presión hidrodinámica es un 83% superior a las tensiones de solvatación, mientras que para fluido pseudoplástico (con  $n=0,60$ ), las tensiones de solvatación son aproximadamente 170 % superiores a las presiones hidrodinámicas. Nuevamente, es preciso aclarar que estas diferencias no se manifiestan en las contribuciones a la carga total, ya que las tensiones oscilatorias de solvatación derivan en un aporte despreciable ante estos valores (ver figura 5), pero permiten visualizar mas claramente que para valores de espesor lubricante y de velocidades de deslizamiento pequeños, la influencia de las fuerzas moleculares depende de la naturaleza reológica del fluido lubricante. Debido a que el PFPE es pseudoplástico, si bien se desconoce el valor exacto del exponente no Newtoniano que lo representa, su uso como lubricante implica que ante las condiciones de funcionamiento consideradas en esta parte de la discusión, debería considerarse las contribuciones moleculares para predecir las cargas sobre el contacto.

Para velocidades del orden de las velocidades actuales de operación de los HDD, las figuras 8 a) y b) muestran que las tensiones moleculares son prácticamente despreciables frente a las presiones hidrodinámicas. Solo para el caso pseudoplástico se visualizan pequeños valores de las tensiones de solvatación (figura 8 b), pero con efectos netos imperceptibles sobre la carga total (figura 4). No obstante, debe destacarse que las presiones desarrolladas para un fluido no Newtoniano con  $n=0,60$  muestran valores un orden de magnitud menores que para un fluido Newtoniano. Por ejemplo, de la figura 8 a) puede extraerse que la presión máxima es aproximadamente  $6 \times 10^4$  Pa, mientras que de la figura 8 b) se extrae una presión máxima de aproximadamente  $3,8 \times 10^3$ .

Siendo la presión hidrodinámica prácticamente la única que aporta valores significativos en el cálculo de la carga para las condiciones de las figuras 8 a) y

b), se puede inferir que la utilización de fluidos pseudoplástico como hipotéticos lubricantes para HDDs de elevada capacidad de almacenamiento, reduciría significativamente los requerimientos de la carga que debe aplicarse al cabezal respecto de un lubricante Newtoniano para mantener distancias menores a los 5 nm con el disco.



**FIGURA 8: PRESIÓN HIDRODINÁMICA Y TENSIONES DE SOLVATACIÓN Y DE VAN DER WAALS PARA UNA SEPARACIÓN CABEZAL-DISCO DE 1 NM Y VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTO DE 10 M/S, PARA FLUIDO A) NEWTONIANO (N=1,00) Y B) NO NEWTONIANO (N=0,60).**

Los resultados discutidos anteriormente indican que, para dispositivos de almacenamiento magnético lubricados cuyo funcionamiento requiera velocidades inferiores a los 100 mm/s, las fuerzas moleculares deben ser consideradas en las predicciones de la carga a aplicar sobre el contacto para mantener una distancia menor a los 5 nm entre el cabezal y el disco, sobre todo si el fluido utilizado es pseudoplástico. No obstante, actualmente los discos de almacenamiento magnético tienen una velocidad de rotación entre los 5000 rpm y 10000 rpm, resultando en velocidades de deslizamiento que pueden superar los 50 m/s. Ante

estos valores, es razonable inferir que, asumiendo un régimen de lubricación de película completa, las fuerzas moleculares no influirán apreciablemente sobre el valor de la carga, la cual estará prácticamente determinada por efectos hidrodinámicos.

Debido a que el ángulo de inclinación  $\alpha$  es muy pequeño, estos resultados pueden también extrapolarse al contacto lubricado de un micromotor como el de la figura 1 b). Si entonces se consideran los parámetros dimensionales del mismo, ante velocidades de rotación de 2500 rpm y diámetros del rotor que rondan los 120 μm (Bhushan, 1995), se pueden desarrollar velocidades de deslizamiento que alcanzan los 14 mm/s, valor para el cual las predicciones de este trabajo indican que la contribución de las fuerzas moleculares tiene efectos apreciables sobre la carga total. En este sentido, la figura 9 muestra que, debido a la naturaleza oscilante de las fuerzas de solvatación, la carga se torna oscilante en función de la altura de separación, lo cual podría repercutir en una inestabilidad en la posición relativa entre los elementos del contacto. Por ejemplo, para una separación de 3 nm, un pequeño incremento en la carga podría llevar al contacto a una separación de 1,5 nm, pero con la posibilidad de que el salto discreto genere un movimiento oscilatorio de acercamiento y alejamiento entre los elementos en contacto.

Por otro lado, los cambios de distancia por la presencia de rugosidades, asperezas o suciedad puede llevar a modificaciones en la carga requerida de hasta un 75 % (ej. al pasar de 4,5 nm a 1 nm), suficiente para generar aceleraciones que también podrían inestabilizar la posición del cabezal respecto del disco y, eventualmente, generar un contacto directo sólido-sólido. Si analizamos este efecto en micro-motores, una pequeña diferencia en la distancia rotor-estator de un brazo del rotor respecto de otro podría desarrollar movimientos laterales y esfuerzos en el eje perjudicando el correcto funcionamiento del dispositivo. Estas observaciones eviden-

cian que en la fabricación de MEMS y dispositivos que requieran de movimientos relativos en contactos lineales ante separaciones nanométricas, se requiere de importantes esfuerzos en un diseño muy preciso de sus partes, requiriendo de predicciones como las que este trabajo intenta aportar.

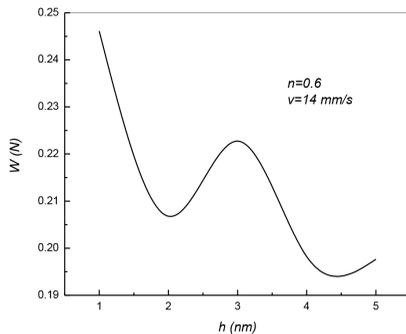


FIGURA 9: CARGA TOTAL SOBRE EL CONTACTO EN FUNCIÓN DEL ESPESOR LUBRICANTE, PARA UN FLUIDO PSEUDOPLÁSTICO CON  $n=0,60$  Y UNA VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTO DE 14 MM/S.

### CONCLUSIONES

En este trabajo se resolvió un modelo de lubricación en un micro-contacto cuya principal aplicación es un contacto hipotéticamente lubricado entre el cabezal lecto-grabador y el disco magnético de un disco rígido. Debido a que los espesores de separación estudiados son menores a los 5 nm, se asume un contacto lubricado por una película de fluido ininterrumpida, no contemplando en este primer trabajo los efectos capilares de las películas interrumpidas predichos en otros trabajos para espesores mayores (Bhushan, 1995; Bhushan, 1996). El fluido es modelado mediante una ley de potencias, cuyo exponente ha sido modificado entre los valores 0,60 y 1,00, representando a fluidos pseudoplásticos y Newtonianos respectivamente. Adicionalmente, las dimensiones manométricas del estrecho canal de lubricación condujeron a plantear un modelo que contempla las fuerzas de origen molecular, las cuales se manifiestan ante separaciones entre elementos lubricados menores a 5 nm. El modelo se resolvió

numéricamente mediante un esquema basado en el método de elementos finitos resolviendo la ubicación de una frontera libre para la ubicación del dominio donde se desarrollan las presiones hidrodinámicas.

Los resultados muestran que las fuerzas moleculares se manifiestan significativamente cuando las velocidades de deslizamiento entre el cabezal y el disco son menores a 100 mm/s. Ante estas condiciones, la carga sobre el contacto arroja valores para los cuales las predicciones puramente hidrodinámicas serían erróneas hasta en un 45 %, mientras que el análisis de los campos de tensiones y presiones evidencian una presencia de tensiones moleculares que pueden superar hasta en un 360 % las presiones hidrodinámicas. Estas predicciones son altamente dependientes de la naturaleza reológica del lubricante, mostrando una mayor sensibilidad a la presencia de fuerzas moleculares a medida que el fluido se torna mas pseudoplástico (disminuye el valor del exponente  $n$ ). No obstante, las velocidades actuales de los discos puede superar los 50 m/s, valor para el cual los resultados muestran que las fuerzas moleculares son prácticamente despreciables frente a la carga hidrodinámica. Contrariamente, ciertos micro-motores con separaciones nanométricas entre el rotor y el estator y velocidades de 14 mm/s (Bhushan, 1995), podrían experimentar una reducción en el rendimiento si su diseño no contempla el efecto de las fuerzas moleculares, ya que la carga requerida ha mostrado tener importantes oscilaciones en función del espesor lubricante que podrían inestabilizar al contacto.

Finalmente, las presiones sobre el contacto lubricado hidrodinámicamente de un disco rígido muestran ser un orden de magnitud menor para fluidos pseudoplásticos con  $n=0,60$  respecto a un fluido Newtoniano. Este resultado muestra que un potencial fluido pseudoplástico lubricante como el actualmente utilizado (PFPE) puede reducir los requerimientos de carga sobre el contacto para mantener una separa-

ción nanométrica entre el cabezal y el disco respecto de un lubricante Newtoniano.

Estos resultados son una primera instancia en una línea de investigación que intenta aportar conocimientos para el diseño de microdispositivos que requieren de un contacto lubricado de dimensiones nanométricas para su funcionamiento.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional, el financiamiento para la realización de este trabajo a través del PID 25/O131, ejecutado en la Facultad Regional Santa Fe.

### REFERENCIAS

Berli M. E., Campana D. M., Ubal S. and Di Paolo J, "Lubrication model of a knee prosthesis, with non Newtonian fluid and porous rough material". *Latin American Applied Research*. Vol. 39, N. 2, pp. 105 -111 (2009).

Bhushan B., Yang L., Gao C., Suri S. , Roger A. Miller R, Marchon B. Friction and wear studies of magnetic thin-film rigid disks with glass-ceramic, glass and aluminum-magnesium substrates *Wear*. Vol. 190, pp. 44-59 (1995).

Bhushan B. Micro/nanotribology and its applications to magnetic storage devices and MEMS. *Tribology International*. Vol. 28, N. 2, pp. 85-96 (1995).

Bhushan B. Macro- and microtribology of magnetic rigid-disk storage devices. *Journal of Magnetism and*

*Magnetic Materials*. Vol. 155, pp. 318-322 (1996).

Brunner R. *Properties of Carbon Overcoats and Perfluoro-Polyether Lubricants in Hard Disk Drives*. Phd Thesis. University of California. (2009).

Di Paolo J. y Berli M. Influencia de las fuerzas moleculares sobre la carga soportada por películas lubricantes de espesores nanométricos. En CD del 2º WORKSHOP OF TRIBOLOGY BAIREES. 7-9 de Mayo de 2013, Ciudad de Buenos Aires (2013).

Elsharkawy A. A. Magnetic head-rigid disk interface hydrodynamically lubricated with a power-law fluid. *Wear*. Vol 213, pp. 47-53 (1997).

Elsharkawy A. A. On the hydrodynamic liquid lubrication analysis of slider/disk interface. *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 43, pp. 177-192 (2001)

Israelachvili J. *Intermolecular and Surface Forces*. Academic Press, New York. (1992).

Itoh S., Hamamoto Y., Ishii H., Fukuzawa K., Zhang H. "Nanorheometry of Molecularly Thin Liquid Lubricant Films Coated on Magnetic Disks". *Advances in Tribology*. Hindawi Publishing Corporation. Article ID 209630, 12 pages ( 2012).

Jiang B, Keffer D and Edwards B. Estimation and analysis of the rheological properties of a perfluoropolyether through molecular dynamics simulation. *Journal of Fluorine Chemistry*. Vol. 127, pp. 787-795 (2006).

Teodorescu M., Balakrishnan S. and Ragnejat H. "Physics of ultra-thin surface films on molecularly smooth surfaces". *Proc. IMechE. Nanoengineering and nanosystems*. Vol. 220, pp. 7-19 (2006).