

TITULO: Enfoque algorítmico para el cálculo del desgaste en pares de fricción de materiales metálicos.

AUTOR: Dr. Francisco Martínez Pérez
Centro de Estudios de Ingeniería de Mantenimiento
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Técnica de La Habana

RESUMEN:

Las propiedades tribológicas de los materiales de los pares de fricción constituyen hoy parte de los requerimientos tecnológicos exigidos, por tener una influencia decisiva en la vida útil de estos pares.

Un parámetro esencial a medir es el desgaste que sufren los materiales en su trabajo. Estas mediciones pueden efectuarse en pruebas de campo o laboratorio, sin embargo puede también calcularse este desgaste y para ello hay que tener en cuenta el mecanismo actuante.

En el trabajo se expone el desarrollo de un algoritmo para el cálculo del desgaste que recoge y sintetiza las recomendaciones principales que aparecen en la diversa literatura especializada.

ABSTRACT:

Tribological properties of those materials of friction pairs are nowadays part of the technological requirements such as they have a decisive influence on useful life of these pairs.

An essential parameter to be measures is the wear undergone by materials that is caused durin their perfomance. These measures can be taken in both lab or field testing, but they can be also calculated. For that, the wear mechanism must be taken into account.

In the present paper, an algorithm for the calculation of wear based on the principals and disperse recommendation on specializad literature is put into consideration.

INTRODUCCION:

La aplicación de la tribología como tecnología que permite influir en la reducción de las pérdidas por fricción y las de desgaste en los pares de fricción, es hoy introducida en países desarrollados como Estados Unidos, Inglaterra, Japón, Francia, Alemania, Rusia y otros. Algunos la introducen como un requerimiento a cumplir por las superficies interactuantes durante su trabajo.

Muchos investigadores de estos países han trabajado en formulaciones que permitan calcular y predecir el desgaste. Estas formulaciones se encuentran dispersas en las publicaciones efectuadas, ya que, dependiendo del mecanismo de desgaste y de la presencia de "terceros cuerpos", habrá una incidencia diferenciada en los principales

parámetros a tener en cuenta para el cálculo del desgaste.

Por otra parte, el diseñador o especialista en mantenimiento que pretenda hacer estos cálculos no encontrará un ordenamiento que le simplifique su labor.

En el trabajo, después de tener en cuenta las formulaciones para el cálculo del desgaste en la literatura especializada, se presenta a consideración un algoritmo que pretende simplificar este trabajo para aquellos que laboran en el diseño o mantenimiento o para investigadores que lo requieran.

El algoritmo tiene en cuenta los diferentes mecanismos de desgaste y discrimina entre superficies que deslizan una respecto a otra con fricción seca o lubricada. En cada caso se brindan las principales ecuaciones o procedimientos que pueden ser empleados.

DESARROLLO:

En la Fig. 1 se muestra un enfoque algorítmico para llevar a cabo cálculos del desgaste que sufren pares de fricción de materiales metálicos, sometidos a diferentes mecanismos de desgaste.

En todo proceso de interacción entre dos superficies siempre habrá que considerar la presencia de un "tercer cuerpo" ya sea ésta casual (medio ambiente) o provocada (capa de lubricante). En el primer caso, y cuando el medio, aunque casual no ejerza condiciones lubricantes (como puede ser la presencia de arcilla en el desgaste abrasivo en suelos) se denominará al proceso de desgaste, de fricción seca. El esquema comienza diferenciando esto. Si la fricción es seca entonces se discrimina el tipo de desgaste, comenzando por el desgaste adhesivo.

DESGASTE ADHESIVO

Si el desgaste es adhesivo, se introduce el concepto de índice de plasticidad ψ que resulta muy conveniente para conocer si el proceso de desgaste ocurre con interacción elástica o plástica entre las asperezas de las superficies [1]. El índice ψ se calcula según:

$$\psi = E' / [p_y (\sigma / \beta)^{3/2}] \quad (1)$$

donde: E' módulo elástico efectivo que se obtiene según

$$E' = [(1 - \mu_1^2) / E_1 + (1 - \mu_2^2) / E_2]^{-1} \quad \text{donde:}$$

μ coeficiente de Poisson del material

E módulo elástico del material

p_y presión que provoca la fluencia en el material y que en ocasiones puede ser sustituida por la dureza H

σ es la raíz cuadrada de la media de las desviaciones normales de la distribución de la altura de las irregularidades (rms) en las superficies de los dos cuerpos siendo

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$$

β media del radio de las asperezas

y donde los subíndices corresponden al material más blando 1 y más duro 2 del par de fricción.

Si el cálculo de $\psi \leq 0,6$, el contacto es de tipo elástico. En este caso habrá que diferenciar, para efectuar los cálculos de desgaste, la forma de accionar de la carga, si ésta es o no constante; dando lugar en el primer caso a la salida $F1$ y en el segundo, a la salida $F2$.

F1 DESGASTE ADHESIVO CON INTERACCION ELASTICA Y CARGA CONSTANTE.

- Intensidad específica de desgaste i_h

$$i_h = x / (n_c \sqrt{h/r}) \quad (2) \quad \text{donde:}$$

x factor de intersección entre dos superficies que puede ser calculado por $x = [\frac{1}{2} (v + 1) \sqrt{\frac{v}{2\gamma}}]$

v puede asumirse para el contacto elástico entre 1 y 3 o calcularse según $v = 1,1 (Rp / Ra) - 1$

γ es el ángulo de interacción y penetración de la superficie mas dura en la mas blanda y sera igual a:

$\gamma = k N v / H_1$ donde N es la carga actuante, v es la velocidad y H_1 es la dureza del material mas duro.

En (2) n_c número de ciclos hasta el daño y

se calcula según: $n_c = [(3 \pi \sigma_{el} \theta / 4 k f) \sqrt{\frac{r}{h}}]$

Donde $\theta = (1 - \mu_1)^2 / E_1$

$$k = \frac{1,5}{\sqrt{4 - \mu_1 - (\mu_1)^2} + [(1 - 2\mu_1)^2 / f^2]}$$

μ_1 coeficiente de Poisson del material mas blando y f coeficiente de fricción.

En (2) $n_c = [(3\pi\sigma_{el} \theta/4kf) \sqrt{\frac{r}{h}}]^t$

$\theta = (1-\mu_1)^2 / E_1$

t es una constante que varia según el material: aceros 6 a 9, fundiciones 4 a 5, bronces 4 a 7, plásticos 4 a 6.

- El área real de contacto Ar puede ser calculada según [3] como

(3) $Ar = (Fn/E')^n$ siendo:

Fn fuerza normal aplicada
n parámetro adimensional donde $2/3 < n < 1$

- La intensidad de desgaste lh puede ser calculada según [2] por

$lh = \frac{\alpha b \epsilon^{v+1} R_{m\acute{a}x}}{(v+1) n_c d} \eta_{c,a}$

α parámetro que en el contacto elástico es 0,5.

b parámetro que caracteriza la superficie de apoyo y se calcula según: $b = 0,55 (R_{m\acute{a}x} / R_p)^v$

ε Aproximación relativa de las superficies expresada como la distancia entre Rz1 y Rz2 suponiendo el apoyo de los dos cuerpos en Rmax.

F2. DESGASTE ADHESIVO CON INTERACCIÓN ELASTICA Y CARGA VARIABLE.

- La intensidad del desgaste lh se calcula según [2]

$lh = C(p_a^0/k'_v)^{t+\beta t} \Delta^{t(1-\beta)/2} (K_f/\sigma_{el})^t \eta_{c,a}^{-\beta t}$ y

$k'_v = k_v/2\sqrt{\pi}$ y $k_v = \Gamma(v+1) / \Gamma(v+3/2)$ siendo Γ la función Γ.

pa presión nominal de contacto.

$C = \frac{v^{1/2} \Gamma(v) \Gamma(1+t/2)}{4(v+1) \Gamma(v+t/2)}$

$K_f = \sqrt{(\sigma_{el} - 2f.HB)/(\sigma_{el} + 2f.HB)v}$

- El número de ciclos hasta el daño nc será [2]

$n_c = \left(\frac{3\pi \theta \sigma_{el}}{4.k.f} \sqrt{r/R_{m\acute{a}x} \epsilon} \right)^t$

- El área real de contacto puede ser calculada según (3) indicado anteriormente.

Si $\Psi > 0,6$ el contacto es de tipo plástico

F3. DESGASTE ADHESIVO CON INTERACCION PLASTICA.

- La intensidad de desgaste lh será [2]

$lh = \frac{K_f^{1+\beta t} / e_o^{1-\beta t}}{\eta_{c,a}} \sqrt{\frac{2}{C(p_a/HB)}} \Delta^{t - (1+\beta t)/1-\beta}$

siendo $K_f = \sqrt{(\sigma_{el} + 2f.HB)/(\sigma_{el} - 2f.HB)}$

el número de ciclos nc hasta el daño será:

$n_c = [(2r e_o/d) \sqrt{(\sigma_{el}-2f.HB)/(\sigma_{el}+2f.HB)v}] t. Kt$

- El área real de contacto Ar se podrá calcular según [3] por la expresión

$$A_r = C \frac{F_n}{P_{y1}} \quad \text{calculándose } C \text{ por (4).}$$

Como se podrá apreciar en los cálculos de Ψ no interviene en la fórmula la carga, siendo determinante las propiedades superficiales y la topografía de las superficies. Está claro que si la topografía de la superficie es tal que inicialmente se produce flujo superficial, la interacción repetida de las superficies, alisa la topografía, principalmente en el período de asentamiento hasta que decrece la desviación standard de las alturas de las rugosidades σ y/o el radio de curvatura de las asperezas se incrementa, y de esta forma el contacto pasa de plástico a elástico [1].

Si el valor de Ψ oscila entre 0,6 y 1 el contacto es elasto plástico, o sea ocurre alguna deformación elástica y alguna plástica. El criterio para aplicar un calculo u otro puede ser la determinación del índice de fortalecimiento m del material mas blando. Si $m \geq 0,9$ se aplicaran los cálculos para el contacto elástico y si $m < 0,9$ se aplicarán para el contacto plástico.

Si el desgaste no es adhesivo, el algoritmo discrimina si lo es abrasivo, y de ser así los cálculos se realizan según F4.

F4 DESGASTE ABRASIVO.

- Volumen de material desgastado V_d . Se calcula según [4] como

$$V_d = L (0,63 \text{ ctg } \alpha) (P/H) \text{ sivas}$$

- La intensidad de desgaste I_h se puede calcular por

$$I_h = \frac{\Delta V}{L} \quad \text{ó} \quad I_h = \frac{\Delta G}{L} \quad \text{también}$$

$$I_h = \frac{\Delta V}{t} \quad \text{ó} \quad I_h = \frac{\Delta G}{t} \quad \text{donde}$$

ΔV diferencia en volumen del elemento desgastado antes y después del proceso de desgaste para una trayectoria de fricción L o un tiempo t respectivamente.

ΔG diferencia en peso del elemento desgastado antes y después del proceso de desgaste para una trayectoria de fricción L o un tiempo t respectivamente.

En (5) si el material es heterogéneo, puede calcularse H según:

$$1/H = (x_1 \frac{1}{H_1} + x_2 \frac{1}{H_2} + \dots + x_n \frac{1}{H_n}) \quad \text{donde}$$

x_n por ciento de cada fase presente en la estructura
 H_n dureza de cada fase

En estos casos la coherencia fase-matriz juega un papel importante que puede alterar el resultado, por lo que debe tenerse en cuenta.

Siguiendo el esquema, si el desgaste no es del tipo adhesivo ni abrasivo, se discrimina si lo es erosivo. En este caso los cálculos se realizan según F5.

F5 DESGASTE EROSIVO.

Un criterio que se emplea para categorizar el fenómeno del impacto en el desgaste erosivo es el número de daño N_d que es el número de impactos necesarios para causar el desprendimiento de partículas del material impactado.

El número de daño N_d puede ser calculado según [6]

$$N_d = \rho v^2 / \sigma_y g \quad \text{donde}$$

Mientras mayor sea la relación ρ/σ_y , para una velocidad de impacto dada, mayor será la resistencia del material al daño (a la erosión). También puede calcularse el incremento de la temperatura ΔT por la energía transferida en el impacto y que es absorbida por el material impactado. Esto es importante ya que σ_y depende de la temperatura. Así ΔT es:

$$\Delta T = v^2 / 2gc \quad \text{donde } c \text{ es el calor específico del material impactado.}$$

El volumen erosionado (V_d) depende del ángulo con que impacta la partícula erosiva

(α). Este volumen puede ser calculado según [8].

$$Vd = v_i^2 / 8g \sigma_y (\text{sen } 2\alpha - 3 \text{ sen}^2 \alpha) \quad \text{Si } \alpha < 18,5^\circ \text{ y}$$

$$Vd = v_i^2 / 24 g \sigma_y (\text{cos}^2 \alpha) \quad \text{Si } \alpha > 18,5^\circ$$

EROSION POR LIQUIDOS.

En la erosión causada por líquidos es importante conocer el valor de la presión en la interfase líquido-sólido.

Tan temprano como en 1932, Gardner demostró que era análogo el tratamiento a este fenómeno al que se produce en una colisión elástica entre dos sólidos, siendo uno de ellos una barra [9].

Asumiendo una colisión normal, la presión p puede ser calculada por:

$$p = v (\rho D/g)^{1/2} \text{ donde:}$$

El efecto de esta presión, que produce una onda acústica que se expande en el metal, genera, en la superficie de éste, rugosidades, en los centros de las cuales, al crecer la onda, se produce la erosión. El efecto no lo causa el impacto directo, si no un proceso de cavitación, al surgir burbujas de vapor cuando la presión calculada p es menor que la presión de vapor del líquido p_v , a una temperatura dada.

$$p < p_v$$

Si la presión sobrepasa el límite de fluencia del material, surgen las rugosidades.

Si el desgaste no es tampoco del tipo erosivo, se discrimina entonces si es un desgaste mecánico corrosivo. A su vez aquí se discrimina en si el medio es oxígeno (o aire) u otro medio, obteniéndose en el primer caso la salida F6 y en el segundo la salida F7.

F6 DESGASTE MECANICO CORROSIVO EN PRESENCIA DE AIRE U OXIGENO.

Este tipo de desgaste, también denominado de oxidación, se lleva a cabo cuando el par de fricción está sometido a la acción de oxígeno del aire u oxígeno contenido en lubricantes.

En este tipo de desgaste influye, de forma determinante, el tipo de óxido que se forma, su espesor, tiempo de reposición y la relación entre su dureza y la del material base, siendo la velocidad de oxidación M, función de la temperatura según:

$$M \propto \exp(-a / T) \quad \text{donde} \quad (6)$$

Esto, a su vez, considera dos posibilidades [11]

- 1) que la capa de óxido se forme y se destruya en forma continua
- 2) que la capa de óxido se forme, alcance un espesor crítico y luego se destruya.

F7 DESGASTE MECANICO CORROSIVO EN DIFERENTES MEDIOS.

El desgaste mecánico-corrosivo en otro medio que no sea oxígeno es quizás el mecanismo más complejo de desgaste y hasta ahora no se reporta en la literatura una fórmula única para su cálculo.

En este tipo de desgaste influyen diferentes factores, entre otros

- tipo o tipos de óxidos que se forman y su relación con el material base
- posibilidad de formación de micropares galvánicos
- características y propiedades del material base
- velocidad de deslizamiento si el desgaste mecánico es adhesivo
- tipo y forma de partículas y la relación de sus propiedades con las de las capas de óxido si el desgaste mecánico es abrasivo
- tipo y forma de las partículas, ángulo de incidencia y velocidad de impacto si el desgaste mecánico es del tipo erosivo.

Para determinar el desgaste en estos casos es indispensable realizar ensayos en condiciones reales. También se han obtenido

resultados satisfactorios, modelando físico matemáticamente el objeto real en condiciones de laboratorio [12].

Por último, si el desgaste no se lleva a cabo en condiciones de fricción seca, ver algoritmo, siendo éstas lubricadas, se obtiene nuevas salidas, dependiendo si se trata de lubricación seca F8, lubricación total F9 o lubricación mixta 10. Ya, si en este momento, no se ha llegado a establecer el tipo de desgaste, entre aquellos no lubricados, debe comenzarse de nuevo el análisis desde el principio, pues no existe otro tipo de clasificación. Es por ello que en el esquema aparece la salida A que regresa al origen.

- Al hablar de, en condiciones lubricadas, lo hacemos pensando en cojinetes fundamentalmente. Estos pueden ser parte integrante de un equipo, pero usualmente es un componente separado que a su vez puede ser un buje, la mitad de un cojinete, una arandela tope u otro tipo de superficie que, sirviendo de parte intercambiable, fusible y condicionada a desgastarse, interactúa con otro elemento en forma deslizante. Estos componentes generalmente se clasifican como de paredes delgadas, con espesor ≤ 5 mm y de paredes gruesas, si el espesor es > 5 mm. Los cojinetes con diámetro >150 mm, clasifican, por lo general, como de pared gruesa [13].

Al analizar esta salida en el algoritmo es necesario tener en cuenta tres categorías de regímenes lubricantes:

- 1) Lubricación límite o seca
- 2) Lubricación completa (las superficies totalmente separadas por una capa lubricante)
- 3) Lubricación mixta (la carga es soportada parcialmente por una capa lubricante y parcialmente las superficies entran en contacto).

F8 DESGASTE EN COJINETES CON LUBRICACION SECA.

Es posible calcular el calor Q generado en el contacto para lubricación seca según [14]

$$Q = kA(T_s - T_a) / e = \mu PVA \quad (7)$$

De (7) puede sacarse como conclusión que el calor generado Q es función de PV donde P es la carga específica (presión) y V la velocidad de rozamiento.

$$A \text{ su vez } (PV)_{\text{máx.}} \approx k / \mu e (A' / A) (T_s - T_a)_{\text{máx}}$$

Hoy resulta común caracterizar la severidad del proceso de deslizamiento de cojinetes en función del factor PV para la etapa de trabajo de los mismos.

- El valor del desgaste H / t , para muchos materiales, es constante después del período inicial de asentamiento y puede expresarse como:

$$H / t = K.P.V$$

DESGASTE EN COJINETES CON LUBRICACION.

La primera condición a tener en cuenta en estos cálculos es el valor de λ , coeficiente que define si la lubricación es completa o mixta. El nomograma que se muestra en la Fig. 2 se emplea para calcular el valor de h_{min} , que es el mínimo espesor de capa para lubricación total.

Para el uso adecuado del nomograma deben conocerse claramente los siguientes factores:

- ❖ diámetro interior del cojinete d
- ❖ longitud de apoyo L
- ❖ clarencia u holgura radial c_r
- ❖ longitud total del cojinete b
- ❖ carga aplicada N
- ❖ carga específica $N / b.d$
- ❖ grado de viscosidad según ISO a 40°C ó 105°F
- ❖ clarencia u holgura en diámetro c_d
- ❖ relación de clarencia u holgura c_d / d .

Los valores típicos de h_{min} / c_r para cojinetes hidrodinámicos de carga constante están en el rango de 0,4 a 0,2 [15]. Si esta relación aumenta es posible la fuga de lubricante para velocidades mayores de 300 rpm. Si la relación es inferior a 0,2 existe la posibilidad de contacto entre las superficies y el paso a un proceso de lubricación mixta.

El valor mínimo de capa lubricada h_{\min} está en el rango de 0,0025 a 0,025. Este valor está relacionado con la suma de las alturas máximas de las asperezas en el eje (e_e) y el cojinete (e_c) dando lugar a la relación λ .

$$\lambda = h_{\min} / (\sigma_1 + \sigma_2) \quad \text{o} \quad \lambda = h_{\min} / \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} \quad (10) \quad \text{o también}$$

$$\lambda = h_{\min} / (Rpm_1 + Rpm_2) \quad \text{o} \quad \lambda = h_{\min} / \sqrt{Rpm_1^2 + Rpm_2^2} \quad (11)$$

siendo:

$Rpm_n = 1/5 (Rpm_{n1} + Rpm_{n2} + \dots + Rpm_{n5})$
siendo en (10) y (11) los subíndices 1 y 2 los correspondientes a los dos cuerpos que forman el par tribológico.

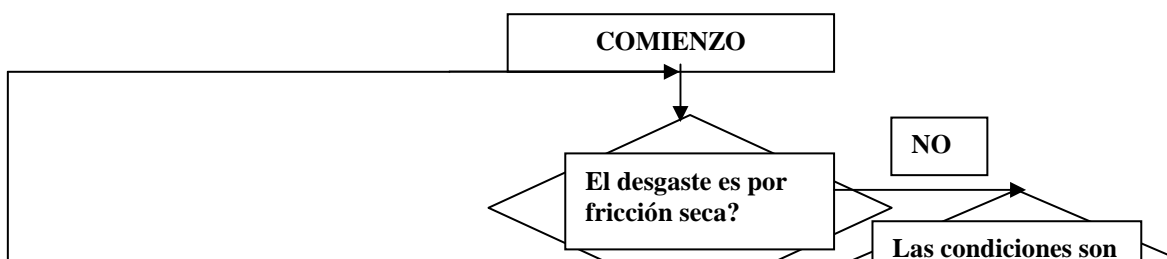
Si el cálculo de λ se hace según (10) el valor mínimo de λ será 3 para diferenciar la lubricación total de la mixta y si se hace según (11) este valor será de 1, o sea $\lambda > 1$ para que la lubricación sea total.

F9 DESGASTE EN COJINETES EN CONDICIONES DE LUBRICACION TOTAL O MIXTA.

En estos tipos de lubricación no es posible calcular un valor de desgaste, ya que éstos tienen lugar solo en el proceso de arranque y parada del par de fricción o producto del deterioro o pérdida de lubricante, contaminación de éste o presencia de partículas abrasivas bien del propio elemento desgastado o del medio ambiente. Por lo tanto, el cálculo aquí consiste en garantizar la capa de lubricante mínima necesaria (h_{\min}) para prevenir el deterioro de la superficie y después comprobar si se cumple el valor de λ para esta condición.

En este tipo de lubricación, según se explicó más arriba, la carga es soportada parcialmente por la capa lubricada y parcialmente por las superficies que entran en contacto. Esto origina un incremento en la fricción y en la temperatura, que puede llegar a ser 10 ó 50 veces mayor [16].

El tiempo de trabajo en este tipo de lubricación debe ser mínimo. El valor de λ descende por debajo de los valores permisibles y las asperezas incrementan el valor de la carga que parcialmente soportaban. Este nomograma también puede emplearse para condiciones de lubricación completa o total.



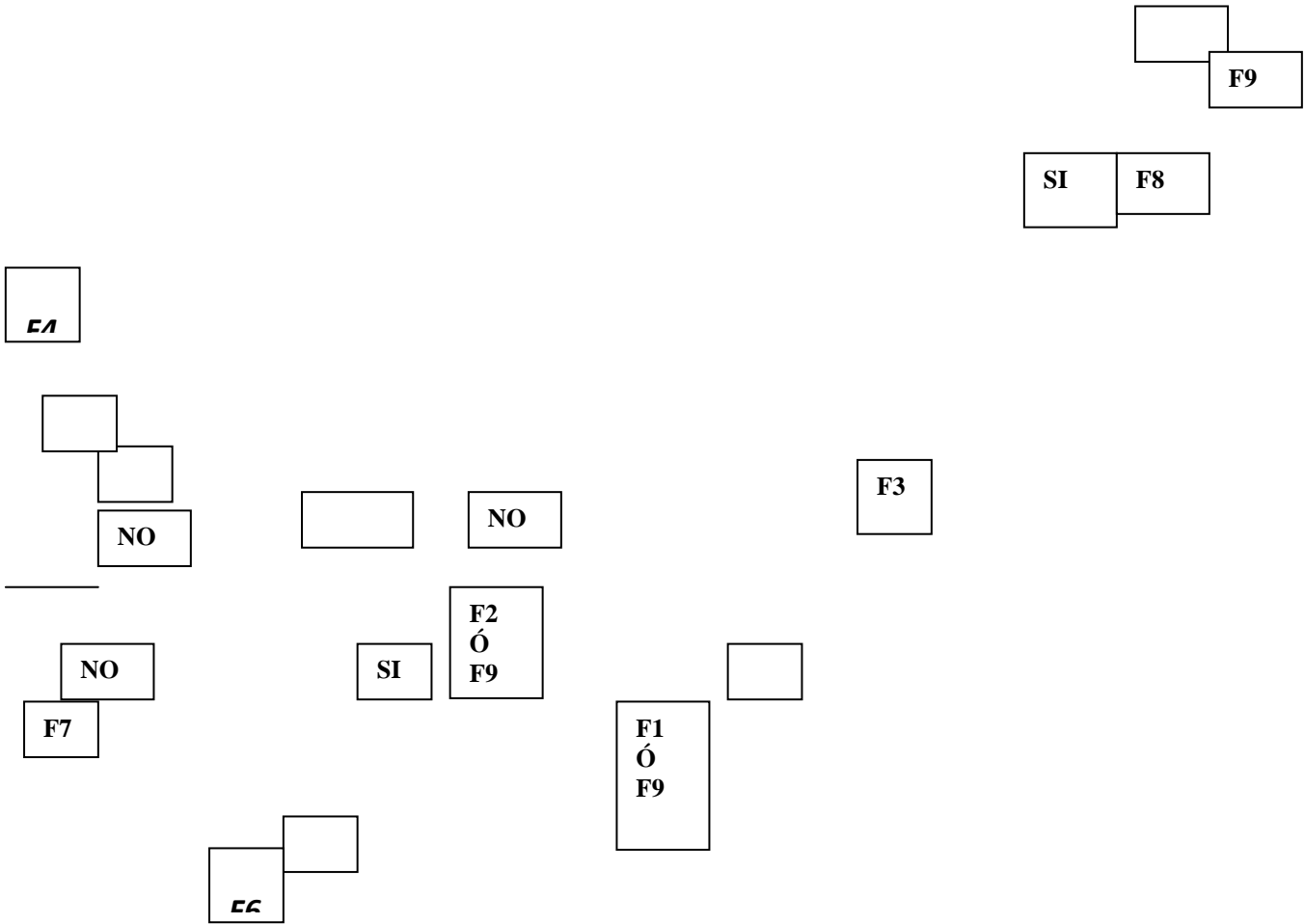


Fig 1 Algoritmo para el cálculo del desgaste en función del tipo de desgaste

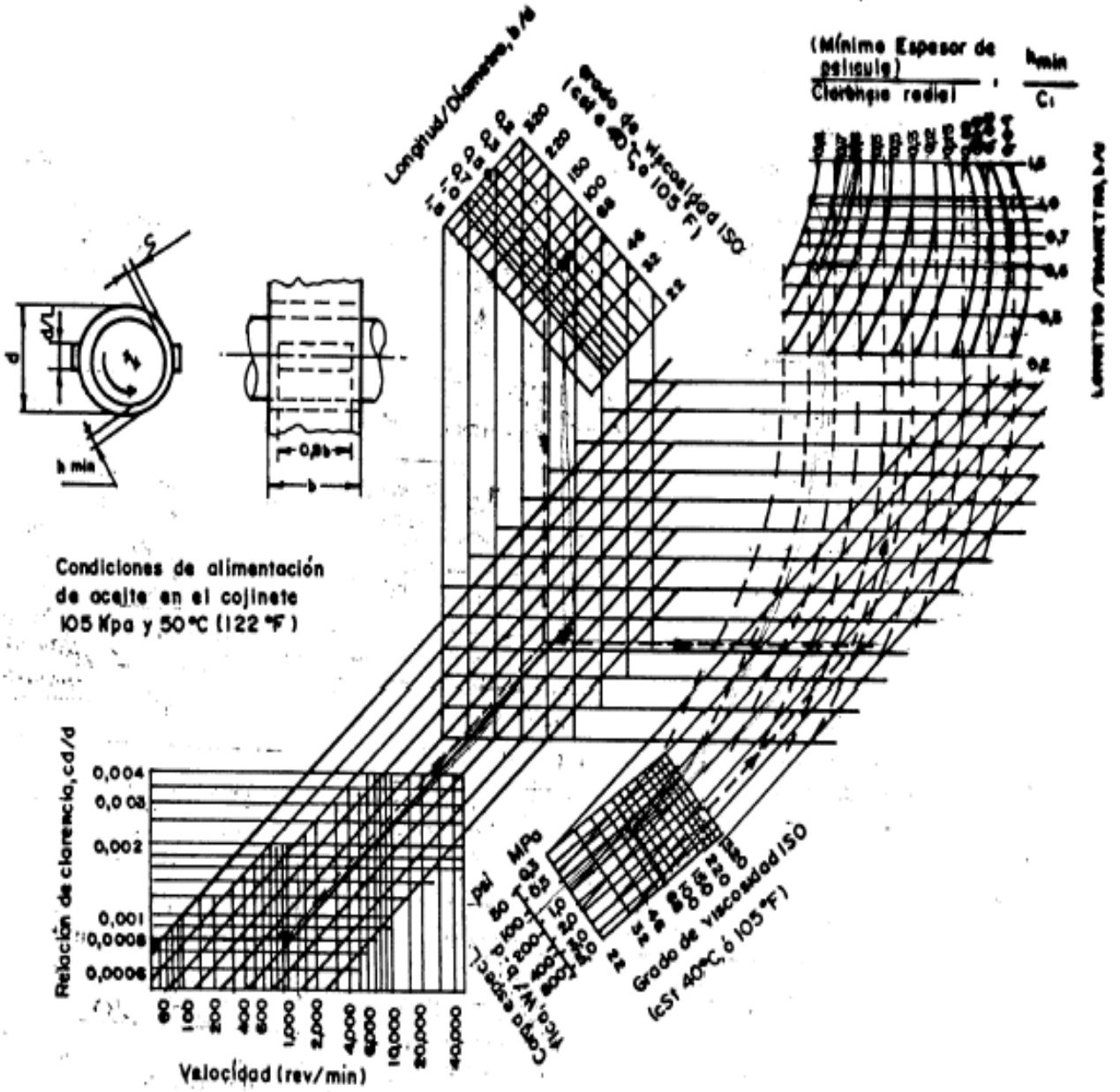


Fig. Nomograma para predecir el mínimo espesor de película de aceite en cojinetes con carga constante.

Fig. 2 Nomograma

CONCLUSIONES.

- 1) En el trabajo se ofrece un algoritmo que permite efectuar cálculos de desgaste a partir de discriminar en el tipo de desgaste que tiene lugar.
- 2) El algoritmo sintetiza las principales formulaciones para el cálculo del desgaste existente en la literatura especializada.

BIBLIOGRAFIA.

- [1] J Larsen-Basse. "Basic Theory of solid friction. , National Science Foundation, Friction, Lubrication and Wear Technology, Vol.18, ASM, 1992.
- [2] I.V. Kragelski, V.S Kombalov., "Fundamentos de los cálculos de fricción y desgaste", Mashinoestroyeniye, 1977.
- [3] D.A Tabor. "A simplified Account of Surface Topography and the contact between solids", Wear. Vol 32, 1975.
- [4] A.D Sarkar. "Friction and wear", Academic Press Inc., London,1980.
- [5] P.J., Alison, M.F. Stroud y H., Wilman Proc. Inst. Mech. Engineering 179, p246, 1964.
- [6] W . Johnson., "Impact strength of materials", , 1972
- [7] G.L Sheldon. y A., Kanhere Wear 21, p. 195, 1972
- [8] I., Finnie "Erosion of surfaces by solids particles", Wear, vol. 3, , p (87-103) 1960.
- [9] F.W., Gardner "The engineer", Edward Arnold, London 1932
- [10] E.A., Shtrauf "Fundamentos de la Física Molecular", Camajo, Barcelona, España, 1976.
- [11] T.F Quinn., "The role of oxidation in the mild wear steel", British Journal Applied Physics, vol.13,1962.
- [12] .F. Tao, "A study of oxidation phenomena in corrosive wear", ASLE Trans., vol.12, N12, 1969.
- [13] R. Reinoza "Desgaste en aceros inoxidable para la Industria petroquímica", Tesis para la defensa del grado de Dr. En Ciencias Técnicas, La Habana, Cuba, 1999.
- [14] P. Ron y J.M Conway Jones., "Friction and wear of sliding bearings", Glacur Vander Vell Inc., vol 18, ASM, 1992.
- [15] K.C Ludema. "Failures of sliding bearings. Failure analysis and prevention", vol. 18, Metals Handbook, American Society for metals, 1986.
- [16] H Christensen. "Some aspects of the functional influence of surface roughness in lubrication", Wear, vol. 17, p 149-162, 1971.