

INFLUENCIA DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO EN FRETTING

Sergio Muñoz, Carlos Navarro, Jaime Domínguez

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Escuela Superior de Ingenieros
Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092-Sevilla, España

Resumen. En este artículo se analiza el efecto que una modificación del coeficiente de rozamiento tiene sobre la vida a fatiga en un ensayo de fretting. Para ello se ha realizado una serie de ensayos de fretting con contacto esfera-plano. El material empleado ha sido la aleación de aluminio 7075-T651. En estos ensayos se ha medido el coeficiente de rozamiento usando dos métodos distintos. Los ensayos se han realizado a distintas frecuencias y se ha estudiado cómo afecta dicho parámetro al coeficiente de rozamiento. A raíz de los resultados obtenidos, se ha analizado la influencia del coeficiente de rozamiento en las tensiones en la zona de contacto en varias situaciones distintas: (i) variando el tamaño de la zona de contacto (ii) variando la relación entre las cargas tangencial y normal. Este estudio se realiza tanto para condiciones de deslizamiento parcial como global. Por último, mediante un modelo analítico, se estudia la influencia de dichas variaciones del coeficiente de rozamiento en la vida a fatiga estimada.

Abstract This paper analyses the effect that a variation in the value of the friction coefficient has on the fatigue lifetime in a fretting test. In this way, systematic and controlled experiments have been carried out with a spherical-tip contact pad against a flat surface. The pad and specimen materials were both 7075-T651 aluminium alloy. The value of the friction coefficient has been measured using two different methods. The experiments have been carried out at different frequencies, studying the influence of this parameter on the value of the friction coefficient. From the results obtained, the influence of the friction coefficient on the stress near the contact zone has been analysed in different situations: (i) varying the size of the contact zone (ii) varying the relationship between tangential and normal forces. This study has been carried out in both partial and total slip conditions. Finally, using an analytic model, the influence of the friction coefficient on the fatigue lifetime predictions has been investigated.

1. INTRODUCCIÓN

La fatiga por fretting es un fenómeno que puede aparecer en multitud de componentes de máquinas y estructuras como uniones atornilladas y roblonadas, acoplamientos con ajuste a presión, cadenas, etc. [1]. En estos casos, en la interfase entre dos piezas en contacto bajo presión, se producen movimientos relativos oscilatorios de pequeña amplitud que generan en la zona de contacto unas tensiones tangenciales asociadas a las normales en la superficie. Estas tensiones locales se suman a las tensiones globales de todo el componente, produciendo un efecto similar al de los concentradores de tensión. El resultado es la iniciación de numerosas grietas en la zona de contacto, una de las cuales continúa creciendo hasta producir el fallo final. Debido a que la fatiga por fretting es un problema de fatiga por contacto en el que existe transmisión de cargas tangenciales entre dos superficies, un parámetro fundamental es el coeficiente de rozamiento, μ

El objetivo principal de este artículo es profundizar en el conocimiento de la variabilidad del coeficiente de rozamiento en los ensayos de fretting y de la influencia que una variación de dicho coeficiente puede producir sobre la resistencia a fatiga por fretting. Para ello se analiza cómo afecta una variación del valor del

coeficiente de rozamiento en la vida a fatiga en un ensayo de fretting, o cómo afecta un error en la medida de dicho coeficiente en la predicción de la vida producida. Con este fin, se ha realizado una serie de ensayos de fretting con contacto esfera-plano en los que se han medido el coeficiente de rozamiento para tres frecuencias de ensayo distintas. Se ha comprobado que las medidas del coeficiente de rozamiento presentan bastante dispersión y que su valor medio varía con la frecuencia. A partir de estos resultados, se han analizado tres series de ensayos en los que se estudia el efecto del coeficiente de rozamiento sobre las tensiones en la zona de contacto y sobre la estimación de la vida a fatiga.

2. MEDIDA DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO

Para la medida del coeficiente de rozamiento se han realizado un total de 31 ensayos de fretting con contacto esfera-plano, usando tres frecuencias distintas de aplicación de cargas: 1, 3 y 5 Hz. Las propiedades mecánicas del material empleado se muestran en la Tabla 1, donde S_{TS} es la tensión de rotura, ν el coeficiente de Poisson, E el módulo de elasticidad y t_f el límite de fatiga a torsión para 10^6 ciclos.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del Al 7075-T651.

s_{TS} (Mpa)	n	E (Gpa)	t_l (Mpa)
572	0.33	71	86

Para medir el coeficiente de rozamiento se ha utilizado un montaje como el esquematizado en la Fig. 1.

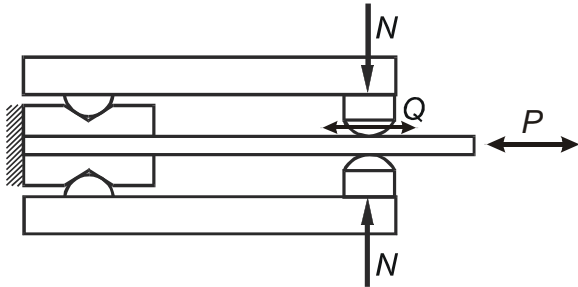


Fig. 1. Esquema de la disposición de los ensayos.

Para ello, se han usado dos métodos distintos [2], que se explican brevemente a continuación:

1) Manteniendo constante la carga normal (N), se aumenta lentamente la amplitud de la carga axial (P), y con ello la de la carga tangencial (Q), de forma que no se produzca el deslizamiento global. De esta forma los puntos del contacto que se encuentran en deslizamiento parcial van aumentando progresivamente su coeficiente de rozamiento. Durante el ensayo a veces se produce el deslizamiento global temporal, aunque rápidamente se recupera el estado de deslizamiento parcial. Esto ocurre hasta que se llega al máximo valor de m a partir del cuál se produce el deslizamiento global permanente. Por lo tanto, el valor del coeficiente de rozamiento en la zona de deslizamiento vendrá dado por el cociente $m = Q/N$ justo antes del deslizamiento global definitivo.

2) Manteniendo constante la carga normal (N), se aplica una carga axial (P) de amplitud constante que da lugar a una carga tangencial (Q) de amplitud constante, de forma que la relación Q/mN sea próxima a la unidad. De esta forma, el contacto estará cerca del deslizamiento global. Después de 10000 ciclos se para el ensayo y se incrementa la carga axial lentamente en forma de rampa hasta que se produce el deslizamiento global. En este momento el valor de la carga tangencial es Q^* . A partir de los valores de N , Q y Q^* se halla el valor de m [2].

Los resultados de estos ensayos se muestran en la Fig.2. De estos resultados se obtienen unos valores medios del coeficiente de rozamiento de 1.33, 1.43 y 1.54 para unas frecuencias de 1, 3 y 5 Hz, respectivamente. Las desviaciones estándar de las medidas a cada frecuencia son 0.1, 0.15 y 0.13 respectivamente. Con estos resultados se pueden sacar dos conclusiones importantes: por un lado, existe bastante dispersión en los valores de m medidos a cualquiera de las frecuencias de ensayo. Por otro lado, el valor medio de m aumenta al aumentar la frecuencia de aplicación de las cargas.

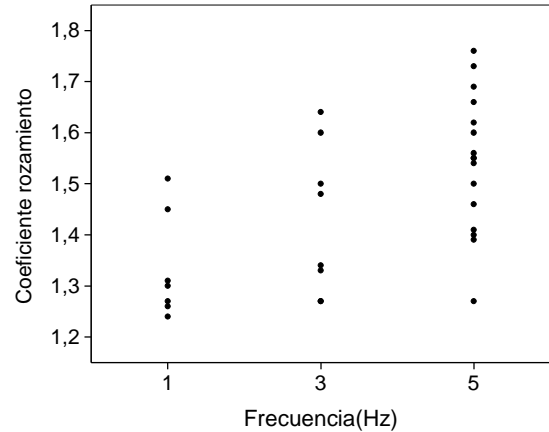


Fig. 2. Resultado de los ensayos experimentales.

3. ANÁLISIS DE TENSIONES

Debido a la variabilidad en la medida del coeficiente de rozamiento y a su dependencia de la frecuencia de aplicación de las cargas, es interesante estudiar cómo influye el valor de μ sobre las tensiones en la zona de contacto. Posteriormente se verá el efecto que estas tensiones tienen sobre los procesos de iniciación y propagación de grieta. Para ello se estudian tres casos con distintos valores de m : 1.35, 1.45 y 1.55. Igualmente se podría hacer con los valores extremos de m obtenidos en los ensayos: 1.25 y 1.75.

Por un lado, para el estudio del proceso de iniciación se ha usado el criterio multiaxial de McDiarmid [3]. Este criterio está relacionado con la iniciación de grietas dominada por las deformaciones tangenciales. El parámetro característico de tensión equivalente se define:

$$F_{MD} = \frac{\Delta t_{max}}{2} + \frac{t_l}{2s_{TS}} s_{max} \quad (1)$$

donde Δt_{max} es el incremento de las tensiones tangenciales en el plano donde Δt es máxima, s_{max} es la tensión normal máxima en la dirección perpendicular a dicho plano, t_l es el límite de fatiga a torsión y s_{TS} es la tensión de rotura. Para comprobar la posible iniciación de una grieta se debe comparar el valor del parámetro con su valor en el límite de fatiga. Este valor es el límite de fatiga a torsión t_l . La Fig.3 muestra la variación de F_{MD}/t_l en el eje de simetría de la superficie de contacto para los tres valores de μ estudiados, en el ensayo 1. Las cargas del ensayo 1 son las siguientes: $N=26$ N, $Q=34.32$ N y $s_{ax}=75$ Mpa. El radio de la esfera es $R=100$ mm. El radio de la zona de contacto es $a=366$ μm , y la profundidad estimada a la que comienza la propagación $a_f=15$ μm , según el modelo analítico usado para predecir la vida a fatiga [4].

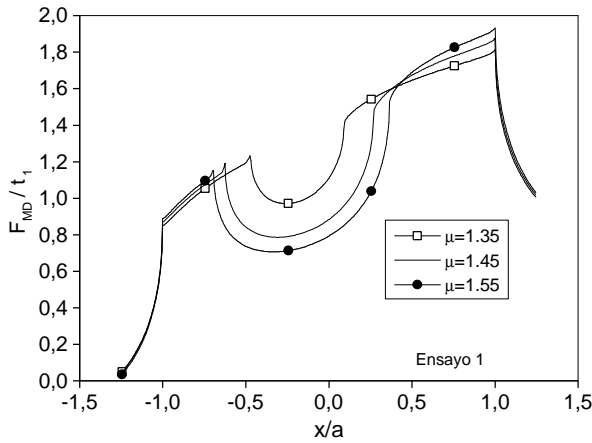
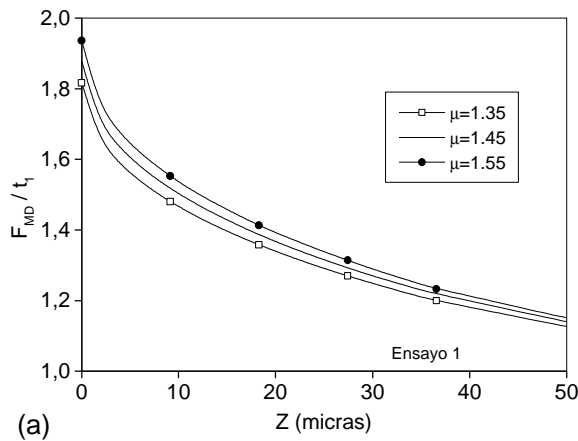
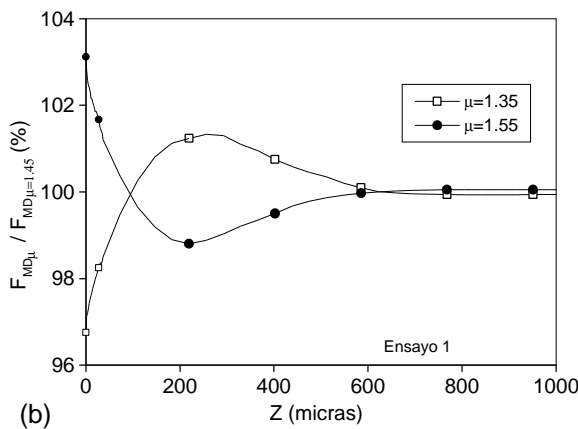


Fig. 3. Variación de F_{MD}/t_I en el eje de simetría de la superficie de contacto para distintos valores de m en el ensayo 1: $N=26N$, $Q=34.32N$, $s_{ax}=75$ Mpa, $R=100$ mm.

Como se observa en la Fig. 3 los mayores valores del parámetro se alcanzan en el borde de la zona de contacto ($x=a$), que es donde se inician normalmente las grietas. Por lo tanto es interesante estudiar las tensiones en ese punto.



(a)

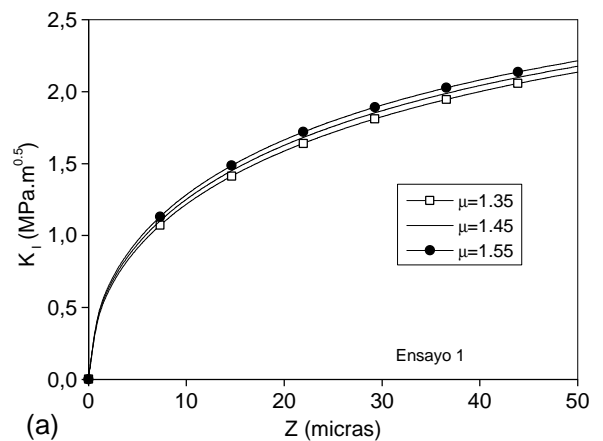


(b)

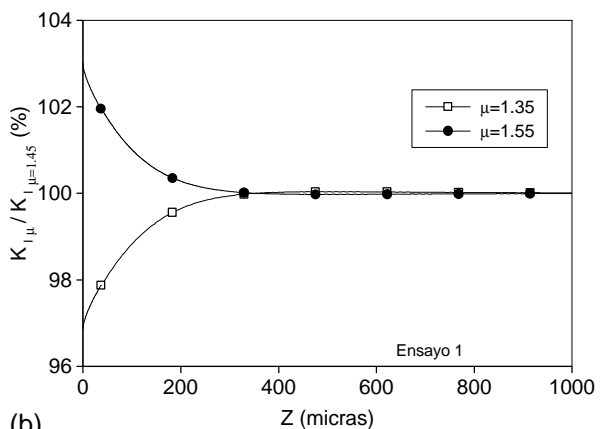
Fig. 4. Variación de F_{MD} con la profundidad en $x=a$, para distintos valores de m en el ensayo 1; (a) Valor de F_{MD}/t_I , (b) % respecto al caso con $m=1.45$.

La Fig. 4a muestra la evolución del parámetro F_{MD}/t_I con la profundidad en el borde de la zona de contacto ($x=a$), para los tres valores de m estudiados. En la Fig. 4b se muestra la relación en tanto por ciento de los valores de F_{MD} para $\mu=1.35$ y $\mu=1.55$ respecto al caso intermedio de $m=1.45$. En las Figs. 3 y 4a se puede comprobar que los picos del parámetro en la superficie aumentan con m . Sin embargo, bajo la superficie la situación es distinta, como se muestra en la Fig. 4b. Al aumentar la profundidad se invierte el efecto: valores menores de m producen picos mayores de tensión. A profundidades mayores al radio de la zona de contacto ($z>a=366$ μm) el efecto de las tensiones locales disminuye y los valores de F_{MD} para los distintos valores de m se parecen cada vez más, siendo prácticamente iguales a una profundidad $z=2a$.

Por otro lado, para el estudio de la propagación de grietas se usará el factor intensidad de tensiones K_I , que es el parámetro que gobierna este proceso. En la Fig. 5a se muestra cómo evoluciona este parámetro con la profundidad en el borde de la zona de contacto ($x=a$), para los distintos valores de m . En la Fig. 5b se relaciona en tanto por ciento los valores de K_I para $m=1.35$ y $m=1.55$ respecto al caso intermedio de $m=1.45$.



(a)



(b)

Fig. 5. Variación de K_I con la profundidad en $x=a$, para distintos valores de m en el ensayo 1; (a) Valor de K_I , (b) % respecto al caso con $m=1.45$.

En la Fig. 5 se observa cómo en la superficie el valor de K_I es mayor para valores mayores de m . Es en la superficie donde la diferencia entre los valores de K_I para los distintos valores de m es mayor. A medida que se profundiza esta diferencia se reduce, siendo prácticamente nula a una profundidad igual al radio de la zona de contacto. A esta profundidad desaparece el efecto de las tensiones locales, y por lo tanto, la influencia del coeficiente de rozamiento. La propagación queda gobernada únicamente por las tensiones globales.

4. EFECTO SOBRE LA VIDA A FATIGA

Una vez analizadas las tensiones producidas en la zona crítica del contacto ($x=a$), donde aparecen las grietas, para distintos valores de μ , se estudiará el efecto que tienen sobre la vida a fatiga.

Para la predicción de la vida a fatiga se utilizará un método analítico propuesto por Navarro et al.[4]. En este método se analizan por separado los mecanismos de iniciación y propagación. A lo largo del hipotético camino que seguiría la grieta, se calcula para cada punto el número de ciclos necesario para iniciar la grieta en ese punto, bajo las tensiones que soporta, N_i . Por otro lado, se calcula el número de ciclos necesario para propagar la grieta desde cada punto a lo largo de dicho camino hasta la rotura, N_p , usando la mecánica de fractura elástica lineal. Sumando N_i y N_p se obtiene para cada punto el número total de ciclos necesarios para iniciar una grieta y propagarla hasta la rotura. El mínimo de esa curva proporciona la vida a fatiga del componente y la longitud de iniciación de grieta, a_i .

Para analizar el efecto que tiene una variación del coeficiente de rozamiento en la vida a fatiga se han analizado tres series de ensayos en los que se han variado distintos parámetros. En todas ellas se comparan los casos de $m=1.35$, 1.45 y 1.55 .

Efecto del tamaño de la zona de contacto:

En la primera serie de ensayos se comparan tres casos, en régimen de deslizamiento parcial, en los que se ha variado el radio de la esfera, R , y de esta forma, el tamaño de la zona de contacto, $2a$. Se han mantenido constantes la tensión axial, s_{ax} , y la relación Q/N . Los valores de Q y N se han elegido de forma que los tres ensayos tengan la misma vida para el caso de referencia de $m=1.45$.

Con el fin de garantizar un valor adecuado de la relación entre el radio de la zona de contacto y el espesor de la probeta, se han usado distintos espesores de probetas según el radio de esfera elegido. De este modo, los espesores de las probetas son 10, 30 y 180 mm para los radios de esfera de 100, 1000 y 10000 mm respectivamente. Los resultados de esta serie de ensayos están reflejados en la Tabla 2. En ella se muestran: el radio de esfera, los valores de las cargas normal (N) y tangencial (Q), el radio de la zona de contacto (a), la longitud de iniciación de grieta (a_i), y el parámetro F_{MD} (en la superficie, para $x=a$), la vida estimada y el porcentaje ocupado en iniciación para el caso de $m=1.45$. Además se ha calculado la variación en tanto por ciento de vida a fatiga y del parámetro F_{MD} (en la superficie, para $x=a$), provocado por una variación del coeficiente de rozamiento entre los valores de $m=1.35$ y $m=1.55$ (un 13.8 %). Para ello se ha tomado como referencia el caso intermedio de $m=1.45$. En la Fig. 6 se representa la variación de vida a fatiga debida a la variación de m para los tres radios de esfera elegidos.

En la Tabla 2 se observa que para los tres radios elegidos la variación del parámetro F_{MD} en la superficie es parecido (alrededor de un 6%). Sin embargo, la variación en la vida es bastante distinta en los tres casos: 8.06, 20.08 y 26.47 % respectivamente. Esto se debe al factor de escala, ya que los tamaños de la zona de contacto son muy diferentes para los tres casos. La zona de influencia de las tensiones locales es igual al radio de la zona de contacto. Por lo tanto, mientras que en el ensayo 1 la influencia de las tensiones locales afecta sólo a la primera parte de la propagación, en los ensayos

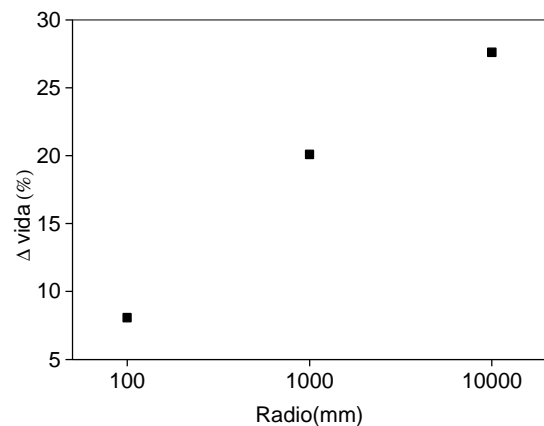


Fig. 6. Serie 1: Variación de vida a fatiga debida a una variación de m de 13.8 %, para distintos radios de esfera.

Tabla 2. Serie de ensayos 1: Variación del radio de la esfera, con $s_{ax}=75$ Mpa, $Q/N=1.32$.

Ensayo	Radio (mm)	N (N)	Q (N)	a (mm)	a_i (mm)	F_{MD} (Mpa) ($m=1.45$)	Vida (ciclos) ($m=1.45$)	% Iniciac. ($m=1.45$)	DVida (%)	$D F_{MD}$ (%)
1	100	26	34,32	366	15	161.2	547379	18.48	8.06	6.36
2	1000	625	825	2274	27	116.1	547290	49.74	20.08	6.06
3	10000	32500	42900	18290	62	101.6	543542	74.06	26.47	5.85

2 y 3 el efecto local permanece durante gran parte de la propagación. Por lo tanto, y debido a que el coeficiente de rozamiento afecta sólo al campo de tensiones locales, su efecto será mayor a medida que aumenta la zona de contacto.

Otro aspecto importante es que el porcentaje de vida ocupado en la iniciación de grieta aumenta con el tamaño de la zona de contacto (un 18.48 % para el ensayo 1, frente a un 74.06 % para el ensayo 3). Esto se debe a un doble efecto: por un lado, para radios mayores son necesarios menores niveles de tensión en la superficie para obtener la misma vida a fatiga (ver F_{MD} ($m=1.45$) en Tabla. 2). De este modo, los ciclos necesarios para iniciar la grieta serán mayores en el caso de mayor radio. Por otro lado, debido al efecto de escala, en el caso de mayor radio el efecto local afecta tanto a la iniciación como a la propagación, y no sólo a la iniciación como en el caso de menor radio. Por este motivo, la propagación será más corta para el caso de mayor radio. Como consecuencia de estos dos efectos, el caso con mayor radio (ensayo 3) tendrá el mayor porcentaje de vida ocupado en iniciación.

También es interesante resaltar que la variación del parámetro F_{MD} es menor en el caso de mayor radio. La explicación es la siguiente: el coeficiente de rozamiento afecta sólo a las tensiones derivadas de Q . Como en el caso de mayor radio tiene menor nivel de tensiones y, dado que la tensión axial es la misma en todos los casos, la relación de tensión debida a la carga tangencial con respecto a la debida a la axial será menor en el caso de mayor radio. De este modo, una variación de m afectará menos al parámetro F_{MD} en el caso de mayor radio.

Efecto de la relación Q/N en deslizamiento parcial:

En la segunda serie de ensayos se comparan tres casos, en condiciones de deslizamiento parcial, en los que se varía la relación Q/N (0.7, 1 y 1.32), manteniendo constantes el radio de la esfera y la tensión axial, s_{ax} . Esto se hace para dos radios de esfera distintos : 100 y 1000 mm. Al igual que en la serie anterior, se tomará el caso de $m=1.45$ como referencia y se calcularán los incrementos de vida y de F_{MD} en la superficie producidos por una variación de m entre 1.35 y 1.55.

Los resultados de esta serie de ensayos se encuentran en la Tabla 3. En la Fig. 7 se representa la variación de vida a fatiga producida por una variación de m del 13.8%, para las tres relaciones Q/N elegidas y para los dos radios de esfera distintos. Se observa que la variación del parámetro F_{MD} en la superficie es parecido para cualquier relación Q/N (alrededor de un 6.3 % en el caso de $R=100$ mm). A pesar de ello, la variación de vida sí es apreciable. Ésta es mayor cuanto mayor es la relación Q/N . Esto se debe a que al aumentar la relación Q/N también lo hace la zona de deslizamiento del contacto, que es donde mayor es la influencia de m . Por otro lado, el porcentaje de vida de iniciación es mayor para relaciones Q/N mayores, ya que en este caso el valor de F_{MD} en la superficie es menor. Para el caso de $R=1000$ mm se tienen los mismos resultados pero con mayores variaciones de la vida y variaciones del parámetro F_{MD} algo menores, debido al efecto de escala comentado anteriormente. Los resultados de la Tabla 3 son debidos a una variación de m entre 1.35 y 1.55 (un 13.8%). Sin embargo, si el valor de m varía entre los valores extremos medidos en los ensayos 1.25 y 1.75 (un 33.33 %), las variaciones de la vida aumentan notablemente. Por ejemplo, para el ensayo 2, las variaciones de la vida pasan del 20.08 % al 49.33 %.

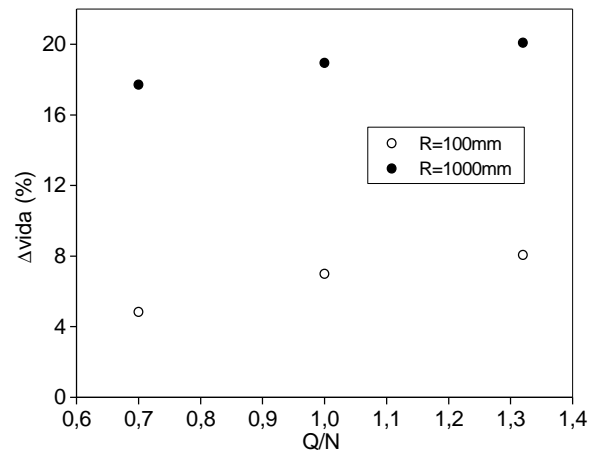


Fig. 7. Serie 2: Variación de vida a fatiga debida a una variación de m del 13.8 %, para distintas relaciones Q/N , en condiciones de deslizamiento parcial, y para dos radios de esfera distintos.

Tabla 3. Serie de ensayos 2: Variación de la relación Q/N en deslizamiento parcial, con $s_{ax}=75$ Mpa y para dos radios de esfera distintos.

Ensayo	N (N)	Q (N)	Q/N	a (mm)	a_f (mm)	F_{MD} (Mpa) ($m=1.45$)	Vida (ciclos) ($m=1.45$)	% Iniciac. ($m=1.45$)	D Vida (%)	D F_{MD} (%)
Radio=100mm										
4	78.57	55	0.7	529	15	178	542541	12.45	4.84	6.25
5	42	42	1	429	15	168.1	541748	15.33	7	6.28
1	26	34.32	1.32	366	15	161.2	547379	18.48	8.06	6.36
Radio=1000mm										
6	1240	868	0.7	2858	26	119.2	545519	45.21	17.71	5.89
7	850	850	1	2520	28	117.5	546172	48.55	18.95	5.97
2	625	825	1.32	2274	27	116.1	547290	49.74	20.08	6.06

Tabla 4. Serie de ensayos 3: Deslizamiento global ($Q=mN$), con $s_{ax}=75$ Mpa, para dos radios distintos.

Ensayo	Radio (mm)	N (N)	a (mm)	a_i (mm)	F_{MD} (Mpa) ($m=1.45$)	Vida (ciclos) ($m=1.45$)	% Iniciac. ($m=1.45$)	D Vida (%)	$D F_{MD}$ (%)
8	100	21	341	15	157	575461	19.62	28.05	10.17
9	1000	530	2153	28	114.2	580281	51.51	35.67	8.83

Efecto de m en deslizamiento global:

En la tercera serie de ensayos se analiza la variación de la vida a fatiga y de F_{MD} en la superficie producida por una variación de m entre 1.35 y 1.55, en condiciones de deslizamiento global ($Q=mN$). Se estudian dos casos con radios de esfera distintos : 100 y 1000 mm. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.

Para este caso, el efecto de μ es el mismo que en el caso de deslizamiento parcial pero mucho más acusado, obteniéndose variaciones de vida de 28.05 y 35.67 % para radios de esfera de 100 y 1000 mm respectivamente. Esto se debe a que en este caso, toda la zona de contacto se encuentra en situación de deslizamiento y el coeficiente de rozamiento influye directamente sobre el valor de la fuerza Q transmitida y, por tanto, sobre las tensiones en el contacto. En la Fig. 8 se representa la variación de F_{MD} y de la vida con el coeficiente de rozamiento, para ambos radios de esfera.

En este caso, si m varía entre los valores extremos medidos en los ensayos 1.25 y 1.75 (un 33.33 %), las variaciones de la vida en el ensayo 9 pasan del 35.67 % al 91.58 %.

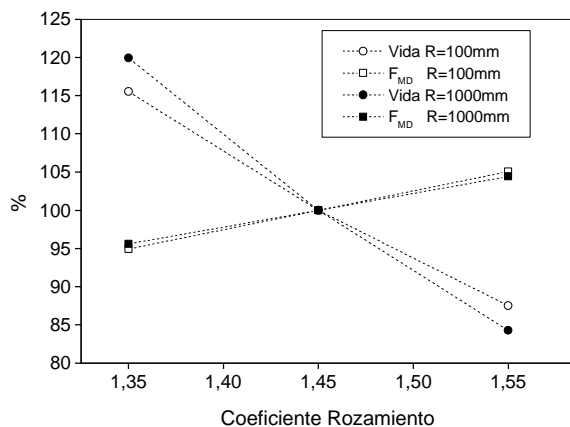


Fig. 8. Serie 3: Variación de F_{MD} y de la vida a fatiga con el coeficiente de rozamiento, en condiciones de deslizamiento global, para dos radios de esfera distintos.

5. CONCLUSIONES

Se han realizado una serie de ensayos de fretting con contacto esfera-plano en los que se ha medido el coeficiente de rozamiento para tres frecuencias distintas.

Se ha comprobado que las medidas del coeficiente de rozamiento presentan bastante dispersión y que su valor medio varía con la frecuencia. A raíz de estos resultados se han analizado tres series de ensayos en los que se han variado distintos parámetros, con el fin de estudiar la influencia que una variación del coeficiente de rozamiento tiene sobre las tensiones en la zona de contacto y sobre la estimación de la vida a fatiga. En todos los casos se obtiene que al aumentar el coeficiente de rozamiento disminuye la vida a fatiga.

Los resultados de la primera serie muestran que la variación de la vida a fatiga debida a una variación en el coeficiente de rozamiento es mayor cuanto mayor es el radio de la esfera y, por lo tanto, el tamaño de la zona de contacto. Igualmente, se comprueba que si el radio de la zona de contacto es pequeño, el efecto de la variación de m sobre la vida a fatiga puede ser menor incluso que la variabilidad usual de la vida en condiciones de fatiga normal. En la segunda serie se observa que al aumentar la relación Q/N , y con ello la zona de deslizamiento, aumenta la variación de la vida a fatiga debida a una variación del coeficiente de rozamiento. De la tercera serie se concluye que en condiciones de deslizamiento global, el efecto del coeficiente de rozamiento sobre la vida a fatiga es mucho más acusado que en el caso de deslizamiento parcial.

6. REFERENCIAS

- [1] Waterhouse, R.B. and Lindley, T.C., (1994). *Fretting Fatigue*, ESIS N° 18. Mechanical Engineering Publications.
- [2] Wittkowsky, B.U., Birch, P.R., Dominguez, J., y Suresh, S., (1999). "An Apparatus for Quantitative Fretting Fatigue Testing", *Fatigue Fracture Engng. Mater. Struct.* 22, 307.
- [3] McDiarmid, D. L., (1994). "A shear stress based critical-plane criterion of multiaxial fatigue failure for design and life prediction", *Fatigue Fracture Engng. Mater. Struct.* 17, 1475-1484.
- [4] Navarro, C, García, M, Domínguez, J (2003). "A procedure for estimating the total life in fretting fatigue", *Fatigue Fracture Engng. Mater. Struct.* 26, 459-468.