

**CICLOS DE FUERZAS Y TENSIONES EN FRETTING FATIGA****J. Domínguez y C. Vallellano****Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales  
Universidad de Sevilla****E.T.S. Ingenieros Industriales, Avda. Reina Mercedes s/n, 41012 Sevilla**

**Resumen.** En este artículo se analiza la evolución de las cargas y tensiones producidas en la zona de contacto en probetas sometidas a cargas axiales mientras tienen aplicado un puente de compresión que produce el efecto de fretting. En particular se analizan las cargas en el caso en que se produce deslizamiento global entre las superficies de contacto. Se analiza también la evolución de las componentes de las tensiones en los puntos próximos a la superficie de contacto en el caso de fretting con contacto puntual. Pueden destacarse dos aspectos fundamentales que diferencian el comportamiento de las tensiones en comparación a otros casos de fatiga. En primer lugar, se ha comprobado que se produce un desfase importante entre las componentes de la tensión durante el proceso de variación de las mismas. Por otro lado, cuando se produce deslizamiento global entre las superficies de contacto y éste es suficientemente grande, la amplitud de varias componentes de la tensión se reduce al incrementar la amplitud del deslizamiento. Estos aspectos pueden tener una influencia apreciable en el comportamiento a fatiga del elemento en cuestión y por tanto deben ser tenidos en cuenta al considerar diferentes criterios de análisis del daño en procesos de fatiga debidos a fretting.

**Abstract.** This paper analyses the loads and stresses variations during fretting fatigue tests of specimens with fretting bridges. Three different aspects are considered: (i) the relation between the axial load applied to the specimen and the friction forces when the contact surfaces slide globally; (ii) the non proportionality of some of the stresses produced close to the contact surfaces during fretting; (iii) and, in case of global sliding between the surfaces, the reduction of the amplitude of some stress components when the relative displacement amplitude increases. These effects may have influence on the fatigue behavior and must be considered in the damage analysis of fretting fatigue processes.

**1. INTRODUCCIÓN**

En sistemas mecánicos existen frecuentemente situaciones en las que las cargas de servicio producen movimiento relativo de muy pequeña amplitud entre superficies en contacto. La repetición de estos movimientos bajo carga puede llegar a producir iniciación y posterior crecimiento de grietas hasta el fallo. El fenómeno de iniciación y crecimiento de una grieta bajo estas condiciones de carga con superficies en contacto se denomina normalmente "fretting fatigue". Ejemplos de este tipo de fallo se presentan en conexiones con pasadores, colas de milano de unión entre álabes y rotores de turbinas, ajustes a presión entre ejes y cubos, etc.

Para estudiar este problema se emplean normalmente métodos experimentales basados en la aplicación de una carga axial variable a probetas sobre las que presionan unos elementos de contacto. Estos elementos están unidos a un puente de compresión que los mantiene a una distancia fija entre ellos o en relación a una

estructura soporte [1], como se muestra en la figura 1. Los elementos de contacto suelen tener forma plana, cilíndrica o esférica. A partir de los resultados de esos ensayos, se han propuesto diversas aproximaciones para determinar la seguridad ante el fallo o la vida de un sistema. Unos criterios se basan en los conceptos de la mecánica de la fractura [2], otros hacen uso de las aproximaciones clásicas a la fatiga, basadas en las tensiones producidas [3] y otros emplean las deformaciones como parámetros característicos [4]. En cualquier caso, la aplicación de esos criterios exige la determinación de las fuerzas producidas en la zona de contacto como resultado del proceso de carga repetida. A partir de estas fuerzas puede conocerse la variación de los parámetros que controlan el proceso de fallo, bien sean las tensiones o las deformaciones, en las proximidades de las superficies de contacto, o el factor de intensidad de tensiones debido a grietas pequeñas emanando de la zona de contacto.

Para determinar las fuerzas de fricción, y las tensiones a partir de ellas, es fundamental un análisis detallado

de la interacción entre las superficies de contacto, ya que, dependiendo de las condiciones de funcionamiento, pueden producirse desfases entre las fuerzas de fricción,  $F$ , y las axiales,  $P$ , aplicadas a la probeta; igualmente, pueden producirse valores del coeficiente de asimetría  $R_F = F_{min}/F_{max}$  diferentes a los de  $R_P = P_{min}/P_{max}$ . Rooke y Edwards [6] y Rooke y Courtney [7] analizaron el comportamiento de las fuerzas que entran en juego en un proceso de fretting como el indicado y determinaron el efecto que dicho desfase puede tener sobre el factor de intensidad de tensiones en grietas pequeñas en las proximidades de la superficie de contacto.

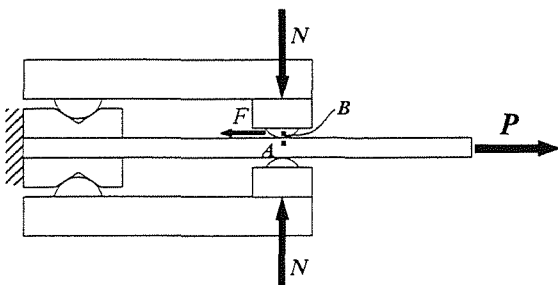


Fig. 1. Esquema de probeta con un puente de compresión.

La importancia de las fuerzas de fricción durante el proceso de fretting radica en su efecto sobre las tensiones producidas en las zonas próximas al contacto. El efecto de estas tensiones será apreciable durante el periodo de iniciación de la grieta y en la fase inicial de crecimiento, mientras la grieta tiene una longitud comparable con la dimensión de la zona de altas tensiones bajo la superficie de contacto. Por ello, tanto durante la iniciación como en el periodo inicial de crecimiento, es importante conocer lo más precisamente posible la variación de las tensiones durante los ciclos de carga. En el caso de fretting, y concretamente en ensayos con puentes de compresión, la evolución de las tensiones tiene algunas características especiales originadas por el carácter no lineal del rozamiento.

En este trabajo se analiza la evolución de las fuerzas de fricción en los casos de fuerza normal de contacto proporcional a la axial aplicada a la probeta, y se presenta una alternativa a la propuesta por Rooke y Edwards [6], antes mencionada. Posteriormente se estudia la variación de las tensiones en las proximidades de la zona de inicio de grieta en función de la carga axial aplicada. Se distinguen dos casos de movimiento entre las superficies en contacto: deslizamiento parcial, y global. Se entiende por deslizamiento parcial o microdeslizamiento, aquella situación en la que hay unas zonas de las superficies de

contacto con movimiento relativo de deslizamiento y otras pegadas, en las que no existe deslizamiento alguno. Se dice que hay deslizamiento global o macrodeslizamiento, cuando todos los puntos de las superficies de contacto están en condiciones de deslizamiento.

## 2. VARIACIÓN DE $F$ EN FUNCIÓN DE $P$

El análisis de la relación entre las fuerzas  $F$  y  $P$  es necesario como paso previo para caracterizar las tensiones producidas durante el proceso de fretting. Varios autores [5-7] han analizado la relación entre estas fuerzas en un sistema similar al de la figura 1. Han estudiado los casos en que la fuerza normal entre superficies de contacto,  $N$ , es constante y aquellos en que es proporcional a  $P$ . En estos casos han determinado los valores límites de  $F$  ( $F_{max}$  y  $F_{min}$ ) y su desfase con  $P$  para diferentes condiciones de carga y han analizado las consecuencias que esos valores límites y el desfase pueden tener sobre el daño a fatiga.

En el caso de la fuerza  $N$  variando proporcionalmente a  $P$ , Rooke y Edwards [6], basados en trabajos previos de Edwards [8] con elementos de contacto planos, hacen la hipótesis de existencia de una carga límite  $P_c$ , independiente de  $N$ , a partir de la cual se produce deslizamiento. Como parte de este trabajo, se han analizado los datos de Edwards, obtenidos con diferentes valores de  $N$  y distancia entre elementos de contacto, y no se ha apreciado este comportamiento. Una hipótesis aceptada normalmente [5] es que si en un ensayo se va incrementando la amplitud de la carga cíclica  $P$ , la amplitud de  $F$  aumentará también hasta que se alcanza un valor máximo, a partir del cual comienza a producirse deslizamiento. A partir de ese punto, un incremento de la amplitud de la carga axial, no genera incremento alguno de  $F$ ; si acaso, se produce una pequeña reducción. Asumiendo la hipótesis anterior, a partir de las gráficas de amplitud de  $F$  versus  $P$  obtenidas por Edwards para distintas distancias entre elementos de contacto y fuerzas  $N$ , se puede concluir que el deslizamiento comienza para valores aproximadamente constantes de  $F/N$ . Es decir, los valores del coeficiente de rozamiento ( $\mu$ ) cuando comienza el deslizamiento son aproximadamente constantes e independientes de  $N$  y  $P$ , lo que está en contradicción con la hipótesis de existencia de la carga  $P_c$  antes citada.

Sin entrar a valorar la posible validez de la hipótesis de Rooke y Edwards para el caso de superficies de contacto planas, cuando éstas son cilíndricas o esféricas, es más aproximado considerar que el deslizamiento se produce cuando  $F$  alcanza un valor igual a  $\mu N$ , con  $\mu$  independiente de  $N$  y  $P$ .

A continuación se analiza, para puentes de compresión con contacto puntual como el de la figura 1, la evolución de las fuerzas de fricción ante ciclos de carga  $P$ , con  $N$  proporcional a ésta ( $N=\eta P$ ). Para ello se hará uso de los resultados del análisis de las condiciones de deslizamiento global o parcial realizados por Mindlin y Deresiewicz [9]. Estos autores estudiaron el comportamiento de superficies de contacto esférico con distintas relaciones entre las fuerzas  $N$  y  $P$ . Los casos de fuerzas  $N$  proporcionales a  $P$  han sido analizados posteriormente por Johnson [10], para contactos puntuales y por Hills y Nowell [11], para contactos lineales. Para el caso de carga  $P$  creciendo desde cero, ambos llegan a la conclusión de que se producirá deslizamiento o no, dependiendo de que  $\eta$  sea mayor o menor que  $\mu$ : si  $\eta$  es mayor que  $\mu$ , para una carga  $P$  creciendo desde cero no habrá deslizamiento local ni global en ningún instante; si  $\eta$  es menor que  $\mu$ , para la misma forma de variación de  $P$  se producirá deslizamiento desde el principio.

En general puede decirse que ante un incremento de carga,  $\Delta P$ , puede aparecer deslizamiento global o parcial entre las superficies de contacto. En cualquier caso, antes del deslizamiento global, comenzará un proceso de deslizamiento parcial entre las superficies, con zonas de éstas en las que existe deslizamiento y zonas en las que no se produce. Al ir incrementando la carga, el área de la zona sin deslizamiento irá reduciéndose. Esta zona se hace nula cuando  $F$  alcanza el valor  $\pm\mu N$ , comenzando el deslizamiento global en ese instante.

Para el análisis de las condiciones de las fuerzas en el contacto, en la figura 1 se representan mediante A y B dos puntos, uno en cada superficie, situados en la zona que permanece sin deslizar hasta el último instante, antes de comenzar el deslizamiento global.

Suponiendo comportamiento lineal antes del deslizamiento global, el cambio de posición del punto A ( $\Delta\delta_A$ ) ante un incremento de fuerza ( $\Delta P$ ) puede representarse mediante la expresión:

$$\Delta\delta_A = C \Delta P \quad (1)$$

Donde  $C$  es la flexibilidad del conjunto probeta-puente e  $\Delta P$  es un incremento de la carga axial tal que no produce deslizamiento global. En las superficies de contacto se producirá una fuerza de fricción  $F \leq \mu N = \mu\eta P$  y el desplazamiento del punto B se puede representar:

$$\Delta\delta_B = D \Delta F \quad (2)$$

Donde  $D$  es la flexibilidad del puente de compresión. Si no hay deslizamiento,  $\Delta\delta_B$  será igual a  $\Delta\delta_A$  y, por tanto, de las ecuaciones (1) y (2) se puede obtener:

$$\Delta F = \frac{C}{D} \Delta P \quad (3)$$

Donde  $C/D$  se puede determinar experimentalmente durante la carga, antes del deslizamiento.

Si hay deslizamiento,  $\Delta\delta_A$  será mayor que  $\Delta\delta_B$ . Durante todo el periodo que dure el mismo, el incremento de  $F$  y el desplazamiento  $\Delta\delta_B$  se pueden representar mediante las expresiones:

$$\Delta F = \mu \eta \Delta P \quad (4)$$

$$\Delta\delta_B = D \mu \eta \Delta P = k \Delta P \quad (5)$$

Donde  $k/D$  puede determinarse experimentalmente como la relación entre  $\Delta F$  e  $\Delta P$  durante el deslizamiento. El desplazamiento de A mientras hay deslizamiento será,

$$\Delta\delta_A > C \Delta P \quad (6)$$

ya que la fuerza de fricción, que se opone a  $P$ , y por tanto al desplazamiento del punto A, será menor que si no hubiera deslizamiento, en cuyo caso sería aplicable la ecuación (1).

Empleando las expresiones anteriores, se van a analizar dos casos de evolución de la carga  $P$ : (i) incremento desde cero; (ii) aplicación de carga cíclica comenzando con carga nula.

### 2.1 Incremento desde cero

Cuando se incrementa  $P$  desde cero, se producirá deslizamiento global si

$$\frac{C}{D} > \mu \eta \quad (7)$$

es decir, si

$$\frac{C}{k} > 1 \quad (8)$$

Si  $C/k < 1$ , no habrá deslizamiento en ningún instante durante el incremento de la carga. La figura 2 representa un gráfico de  $F$  versus  $P$  en dos casos distintos: cuando  $C/D$  es mayor que  $\mu\eta$  (figura 2a), en cuyo caso  $\Delta F$  estará definida mediante la ecuación (4) y habrá deslizamiento durante todo el intervalo de incremento de carga; y cuando  $C/D$  es menor que  $\mu\eta$  (figura 2b), en cuyo caso no habrá deslizamiento en ningún instante, estando  $\Delta F$  definida mediante la ecuación (3). En ambos casos se ha sombreado la zona

de posibles valores de  $F$  en función de  $P$ .

2.2 Aplicación de carga cíclica

Si  $k > C$ , la pendiente de la recta que representa el valor máximo admisible de  $F$  ( $F = \pm k/D P$ ) (figura 2b) será mayor que la que representa el incremento real de  $F$  sin deslizamiento ( $\Delta F = C/D \Delta P$ ). Por tanto, nunca se producirá deslizamiento durante el proceso de carga. En la descarga tampoco se producirá, si el proceso de carga cíclica comenzó con  $P=0$  y no se alcanzan valores menores que éste. Si por alguna razón, en un instante de un semiciclo de descarga se produce deslizamiento, éste no volverá a producirse en ciclos subsiguientes, a condición de que no se alcancen mínimos de  $P$  inferiores al último que produjo deslizamiento. En la figura 2b se representan dos ciclos en los que se produce deslizamiento partiendo de diferentes condiciones iniciales de  $F$  pero con las mismas variaciones de  $P$  (A-D y A'-D'). Una vez alcanzados los puntos D o D', no habrá nuevo deslizamiento a no ser que la carga  $P$  alcance valores inferiores a  $P_C$  (figura 2c).

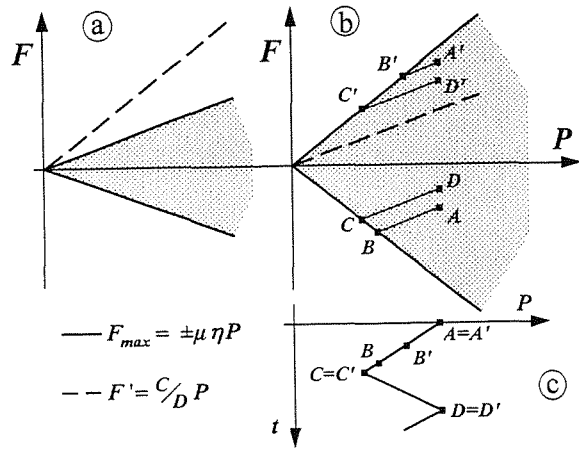


Fig. 2. Relación entre  $F$  y  $P$  en probeta con puente de compresión: (a)  $C/D > \mu\eta$ ; (b)  $C/D < \mu\eta$ ; (c) esquema de variación de  $P$ .

Si  $k < C$ , ante una carga como la de la figura 3a, las fuerzas de rozamiento evolucionarán como se muestra en las figuras 3b y 3c: la 3b representa la evolución de  $F$  en función de  $P$ ; la 3c su variación en el tiempo, obtenida a partir de la 3a y la 3b. Durante el primer incremento de carga habrá deslizamiento hasta  $P_{max}$  (figura 3b). Posteriormente, habrá deslizamiento si en la descarga se produce una variación tal que,

$$C \Delta P > k(P_{max} + P_{min}) \tag{9}$$

o, escrito de otra forma,

De la figura, teniendo en cuenta que en caso de deslizamiento debe cumplirse

$$\frac{1 - R_P}{1 + R_P} > \frac{k}{C} \tag{10}$$

$$F_{max} - F_{min} = (P_{max} - P_{min}) \frac{C}{D} = \frac{C}{k} (F_{max} - F_{min}) \tag{11}$$

puede deducirse también que el valor mínimo de  $F$  en caso de deslizamiento será:

$$F_{min} = F_{max} \frac{\frac{k}{C} - 1}{\frac{k}{C} + 1} = -k P_{max} \frac{C - k}{C + k} \tag{12}$$

y el coeficiente de asimetría  $R_F$ :

$$R_F = \frac{F_{min}}{F_{max}} = \frac{k - C}{k + C} \tag{13}$$

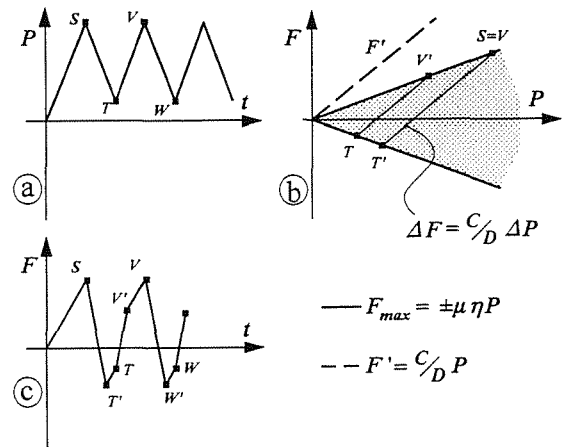


Fig. 3. Relación entre  $F$  y  $P$  cuando  $\mu\eta < C/D$  y  $P$  varía cíclicamente.

El deslizamiento se producirá en descarga desde  $T'$ , con  $P_{T'} = -F_{min} D/k$  (fig. 3b), hasta  $T$ , con  $P_T = P_{min}$ . En el semiciclo de carga, el deslizamiento comenzará en  $V'$ , donde  $P_{V'} = P_{min} (C+k)/(C-k)$ . El desfase existente entre  $P_{min}$  y  $F_{min}$  podrá determinarse a partir de las expresiones anteriores.

3. CICLO DE TENSIONES

Los ensayos de fretting fatigue con puente de compresión realizados con más frecuencia son aquellos en los que se mantiene constante la fuerza normal,  $N$ . Con esas condiciones de carga, si no se produce deslizamiento global en algún instante de cada ciclo, las fuerzas  $F$  están en fase con las  $P$  aplicadas a la probeta. Si desde el inicio del proceso de carga cíclica no se

produce deslizamiento global en ningún momento,  $R_f$  será igual a  $R_p$ ; en caso contrario será distinto [6]. Aunque las fuerzas  $F$  y  $P$  se mantengan en fase, las tensiones producidas por dichas fuerzas en las proximidades de la superficie de contacto no están en fase.

A continuación se analiza la evolución de las tensiones en distintos puntos de la superficie de contacto y sus proximidades, para un caso de contacto esférico, con ambos elementos del mismo material. El análisis está basado en los resultados de Cattaneo [12] y Mindlin [13], que estudiaron las distribuciones de presiones en el contacto ante cargas normales y transversales en condiciones de deslizamiento global y parcial. Para el análisis del campo de tensiones generado por  $F$  y  $N$  se ha empleado la solución obtenida por Hamilton y Goodman [14]. Las expresiones empleadas para este análisis de tensiones son las obtenidas posteriormente por Hamilton [15] y por Hills y Sackfield [16], que presentaron expresiones más fácilmente tratables. El efecto de la fuerza  $P$  se ha obtenido mediante superposición de la tensión producida por dicha fuerza a la solución de las tensiones generadas por las fuerzas de contacto  $F$  y  $N$ .

La solución obtenida con la aproximación anterior no es exacta por diversas razones, como son: el espesor finito de la probeta [17]; los microdeslizamientos producidos en dirección distinta a la de aplicación de  $F$  [18]; la rugosidad superficial [11]; o el efecto de las tensiones axiales sobre la posición de la zona sin deslizamiento en caso de deslizamiento parcial [19]. Sin embargo, en los casos usuales en fretting con contacto puntual, con espesores de probeta suficientemente grandes en comparación al tamaño de la zona de contacto, buenos acabados superficiales, tensiones axiales máximas en el instante de inicio del deslizamiento global del orden de las presiones máximas de contacto  $p_o$  o menores, y valores de  $\mu$  del orden de 0.5 o superiores, la aproximación obtenida con esta solución es suficiente para el análisis, tanto del desfase de las tensiones durante los ciclos de fretting como del efecto del deslizamiento sobre las amplitudes de las tensiones producidas.

En el análisis que sigue se distinguen dos casos diferentes: cuando, una vez estabilizado el ciclo de fretting, la fuerza  $F$  es menor que  $\mu N$ , produciéndose una situación de deslizamiento parcial; y cuando en algún instante de cada ciclo de fretting se producen fuerzas  $F$  iguales a  $\mu N$ , con lo que se llega a situaciones de deslizamiento global.

### 3.1 Deslizamiento parcial

Cuando en un contacto entre superficies esféricas sometido a una fuerza normal  $N$  (fig. 4) se aplica una fuerza tangencial  $F < \mu N$ , se produce deslizamiento relativo entre las superficies de contacto en una zona anular B-A de la zona de contacto. En el centro de esta zona habrá una zona circular, B-B, en la que las superficies permanecen sin deslizar. El valor del radio  $b$  de esta zona se puede obtener mediante la expresión [10]

$$\frac{b}{a} = \left(1 - \frac{F}{\mu P}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

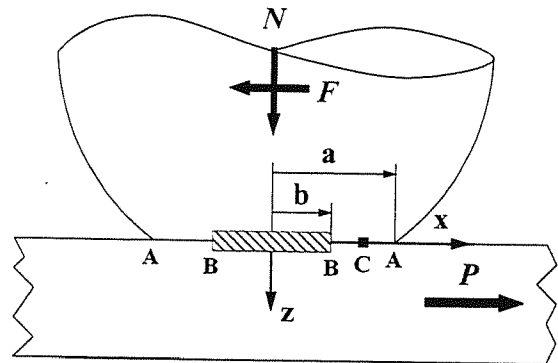


Fig. 4. Esquema de la zona de contacto en el plano  $y=0$ .

Si se aumenta la fuerza  $F$  desde cero, inicialmente  $b$  será igual a  $a$ , y en un punto cualquiera C del eje  $y=0$  en la superficie de contacto no se producirá deslizamiento (Fig. 4). Al crecer  $F$ , la tensión  $\tau_{zx}$  comenzará a crecer hasta llegar a un máximo,  $|\tau_{zx}| = \mu |\sigma_{zz}|$ . A partir de ese instante, si continúa creciendo  $F$ , la tensión tangencial mantendrá su valor, comenzando a crecer la tensión normal  $\sigma_{xx}$  hasta llegar al máximo coincidiendo con el máximo de  $F$ . Al mismo tiempo que crece  $\sigma_{xx}$  también lo hará  $\sigma_{yy}$ , aunque en una proporción mucho menor. Un proceso similar ocurre después de cada máximo o mínimo de  $F$ , cuando se invierte el sentido de la carga en un ciclo de fretting.

La figura 5 muestra las tensiones  $\sigma'_{xx}$ ,  $\sigma'_{yy}$  y  $\tau'_{zx}$  producidas por una fuerza  $F=0.96\mu N$  en los puntos del eje  $y=0$  de la superficie de contacto de la probeta. El resto de las componentes del tensor de tensiones es nulo en dicho eje. El superíndice  $t$  indica que las tensiones son debidas a las fuerzas tangenciales,  $F$ . En esta figura y otras subsiguientes se han representado las tensiones y longitudes en forma adimensional. Las longitudes se han dividido por el radio  $a$  de la zona de contacto y las tensiones por la presión máxima de contacto,  $p_o$ , producida por la fuerza  $N$ . Las tensiones

debidas a la fuerza  $N$  son bien conocidas [15] y en un análisis general se superpondrán directamente a las anteriores, considerando desacoplados los efectos de  $F$  y  $N$ . Si las fuerzas  $F$  se producen en fase con una carga  $P$  (Fig. 6), las tensiones axiales  $\sigma_{xx}$  se incrementarán en una cantidad  $\sigma_{xx}^a = P/S$ , donde  $S$  es el área de la sección de la probeta. El superíndice  $a$  indica que la componente de tensión es debida a una fuerza axial. En geometrías como la considerada, las sollicitaciones máximas se producen en el plano  $y=0$ , por ello, en el análisis que sigue se considerará sólo la evolución de tensiones en dicho eje.

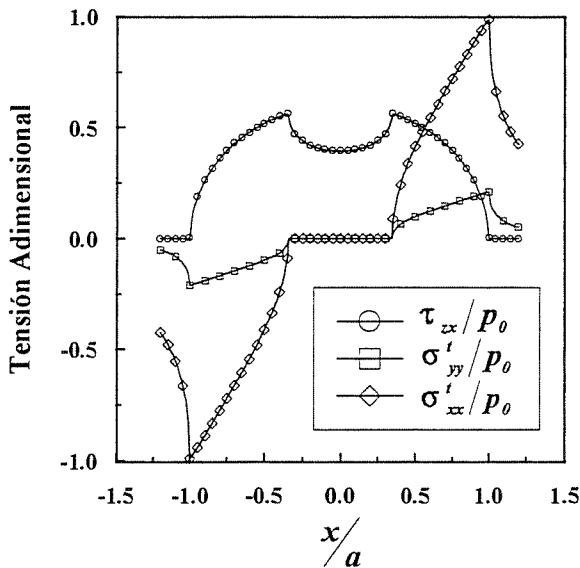


Fig. 5. Tensiones producidas por  $F=0.96\mu N$ , en el eje  $y=0, z=0$ .

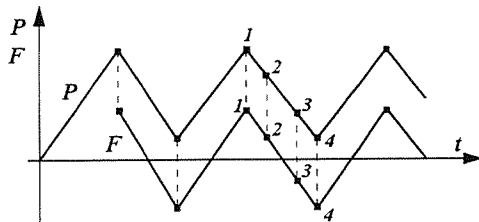


Fig. 6. Variación de  $F$  con  $P$  en caso de deslizamiento parcial.

Considérese una probeta con un puente de compresión sometido a una fuerza  $N$ , constante, sobre la que se aplica una carga variable como la de la figura 6, con  $F_{max} < \mu N$  y  $F_{min} > -\mu N$ . Suponiendo que debido a deslizamientos anteriores  $R_F = -I$  [7], las fuerzas  $F$  evolucionarán en fase con  $P$ , como se muestra en la figura, y las superficies de contacto no llegarán a estar sometidas a macrodeslizamiento. Las figuras 7a y b muestran la distribución de las tensiones  $\sigma_{xx}$  y  $\tau_{zx}$ ,

respectivamente, en el eje  $y=0$  de la superficie, en cuatro instantes del semiciclo 1-4 de la carga  $P$ . En este caso se ha considerado un valor máximo de  $P (P_1)$  tal que produce una tensión  $\sigma_{xx}^a = 0.5P_0$ , y una fuerza  $F$  que varía entre los límites  $\pm 0.96\mu N$ .

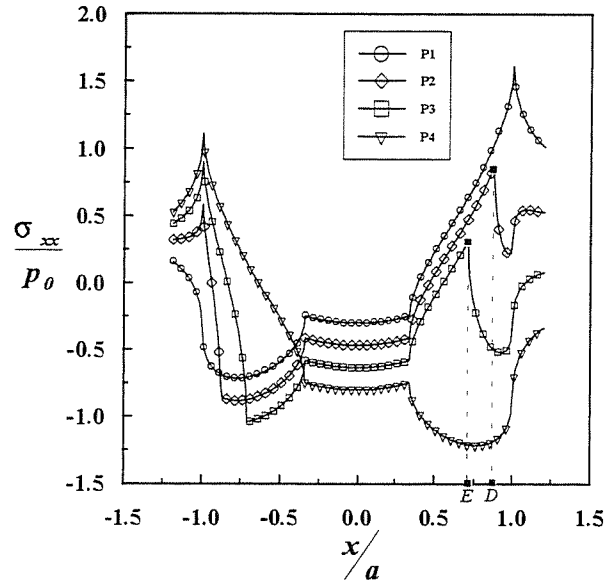


Fig. 7a. Distribución de  $\sigma_{xx}$  en el eje  $y=z=0$  en los instantes 1 a 4 (Fig. 6).

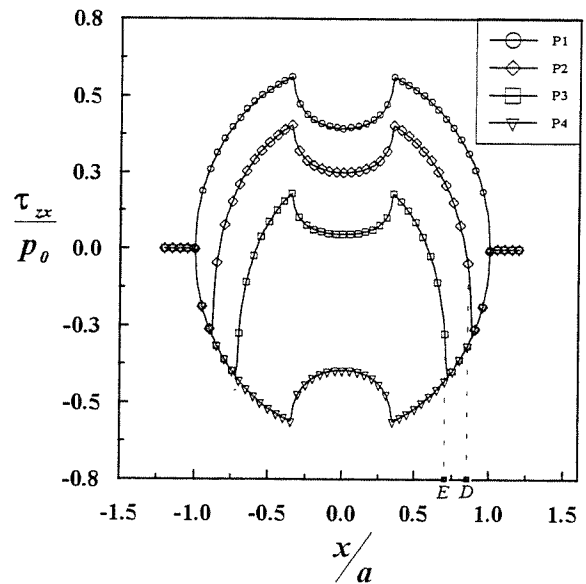


Fig. 7b. Distribución de  $\tau_{zx}$  en el eje  $y=z=0$  en los instantes 1 a 4.

Analizando la tensión en un punto D ( $x=0.87a$ ) de la superficie en los cuatro instantes indicados, se puede apreciar que durante la fase 1-2 varía apreciablemente  $\tau_{zx}$ , con muy pequeña variación de  $\sigma_{xx}$  ( $\Delta\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^a$ ). Posteriormente (fase 2-4) se mantienen sin variar las tensiones  $\tau_{zx}$ , variando  $\sigma_{xx}$  más rápidamente que en la

fase anterior. Esta variación está producida por la variación conjunta de  $\sigma_{xx}^a$  y  $\sigma_{xx}^i$ . En otro punto E ( $x=0.71a$ ), más hacia el centro de la zona de contacto, la tensión  $\tau_{zx}$  varía durante la fase 1-3, alcanzando un máximo mayor que en D (Fig. 7b). En este punto, la tensión  $\sigma_{xx}$  no comienza a variar rápidamente hasta la fase 3, en que el borde de la zona de deslizamiento llega a E, comenzando el microdeslizamiento en dicho punto (Fig. 7a). La figura 7c muestra la evolución de esas tensiones  $\sigma_{xx}$  y  $\tau_{zx}$  en el punto E a lo largo de un ciclo, comparadas con la evolución de la fuerza  $F$ . Nótese que  $F$  se representa esquemáticamente para conocer la forma de variación y la posición de picos y valles pero no sus valores reales.

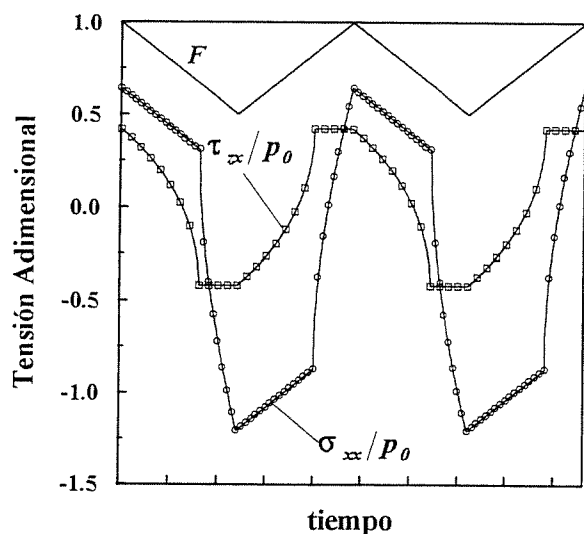


Fig. 7c. Variación temporal de  $\sigma_{xx}$  y  $\tau_{zx}$  en el punto  $y=z=0$ ,  $x=0.71a$ .

La figura 8 muestra la evolución de las tensiones  $\sigma_{xx}$  versus  $\tau_{zx}$  en los puntos D y E y en otro punto, G, situado debajo del E, a una distancia  $z=0.1a$  de la superficie. Puede apreciarse que la variación de  $\sigma_{xx}$  y  $\tau_{zx}$  en el plano  $z=0.1a$  es más suave que en la superficie, reduciéndose el desfase, aunque es aún importante. Aunque no se muestra en las figuras, se puede comprobar también, que a medida que se incrementa la distancia  $z$  a la superficie, las otras componentes del tensor de tensiones comienzan a tener mayor importancia en relación al total y su efecto sobre el daño a fatiga en esa zona puede comenzar a ser apreciable. En cualquier caso, a distancias de la superficie inferiores a  $0.1a$  el efecto de las otras componentes es pequeño.

### 3.2 Deslizamiento global

En condiciones de deslizamiento global y fuerza  $N$  constante, el ciclo de la fuerza  $F$  es simétrico, variando entre  $\pm \mu N$ . Su evolución en función de  $P$  será como la representada en la figura 9a [5,6]. Durante un ciclo cualquiera, a-e, de la fuerza  $P$ , la fuerza  $F$  tendrá una evolución a'-e', variando durante los períodos a'-b' y c'-d'. En los períodos b'-c' y d'-e', se mantiene aproximadamente constante. Durante los períodos de variación de  $F$  habrá una situación de deslizamiento parcial. Deslizamiento global habrá únicamente durante los períodos b'-c' y d'-e'. La evolución del desplazamiento relativo en la zona central de la superficie de contacto será aproximadamente como se representa en la figura 9b. La amplitud del deslizamiento dependerá de los valores de las fuerzas  $P$  y  $F$ , y de las rigideces de los elementos del sistema objeto de ensayo [5].

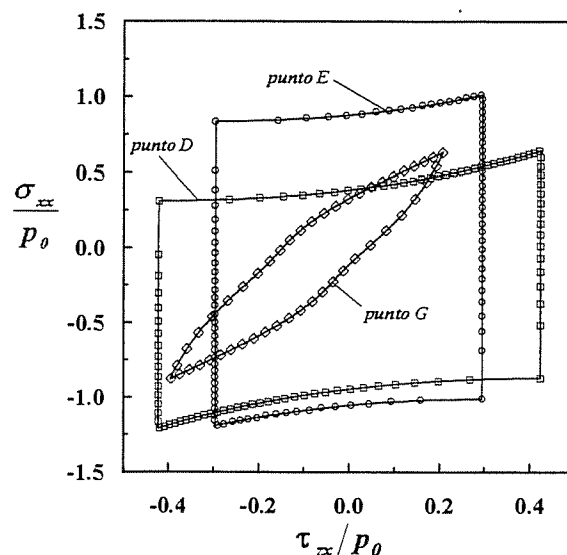


Fig. 8. Relación  $\sigma_{xx}$ - $\tau_{zx}$  en tres puntos: D ( $y=z=0$ ,  $x=0.87a$ ); E ( $y=z=0$ ,  $x=0.71a$ ); G ( $y=0$ ,  $z=0.1a$ ,  $x=0.71$ ).

En condiciones de deslizamiento global, todos los puntos de la probeta variarán su posición respecto a la superficie de contacto. Así, un punto  $m$  que esté en el borde de la zona de contacto durante el tramo a'-b', pasará a estar en el interior de dicha zona debido al movimiento relativo producido durante la fase b'-c'; y un punto  $n$ , situado en el exterior en la fase a'-b', pasará al borde de la zona, como se muestra en la figura 9c. Estos puntos volverán a la posición inicial durante la fase d'-e'.

La variación de las tensiones en un punto cualquiera  $m$  durante los períodos a-b y c-d será del mismo tipo a la descrita en el apartado anterior, y se puede determinar

de la misma forma. Durante los períodos de deslizamiento global, aunque no se produzca variación de la fuerza  $F$ , los puntos de la probeta sufrirán una variación de tensiones debido al cambio de posición respecto a la zona de contacto. Dicha variación será mayor o menor, dependiendo de la amplitud del deslizamiento. Además, mientras en las fases a-b y c-d la variación de las tensiones no depende directamente de las tensiones producidas por la fuerza normal  $N$ , en las fases de deslizamiento, el cambio de posición relativa de los puntos de la probeta respecto a la superficie de contacto, hará que se modifiquen todas las componentes de la tensión, tanto las debidas a las fuerzas  $P$  y  $F$ , como las debidas a la fuerza  $N$ . Dependiendo de los valores de  $\mu$  y  $N$  y de las flexibilidades de las distintas partes del sistema, la variación de  $P$  necesaria para que comience el deslizamiento ( $P_a - P_b = \Delta P_{ab}$ ) será mayor o menor. Así, teniendo en cuenta las ecuaciones (1) y (2), el deslizamiento comenzará cuando se cumpla la igualdad:

$$\Delta \delta_a = \Delta \delta_b = C \Delta P_{ab} = D \mu N \quad (15)$$

y por tanto, cuando

$$\Delta P_{ab} = \mu N \frac{D}{C} \quad (16)$$

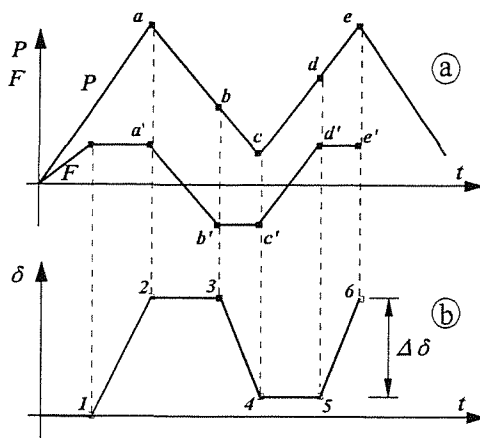


Fig. 9a,b. (a) Evolución de  $P$  y  $F$  en un caso de deslizamiento global. (b) Evolución del desplazamiento relativo.

En general, para idénticas flexibilidades, coeficiente de rozamiento y fuerzas normales, mientras mayor sea  $\Delta P_{ac}$  en relación  $\Delta P_{ab}$  mayor será la amplitud del deslizamiento.

La figura 10a muestra las distribuciones de las tensiones  $\sigma_{xx}^* = \sigma'_{xx} + \sigma_{xx}^n$  debidas a las fuerzas  $F$  y  $P$  en el eje  $y=0$  de la superficie de contacto, en las fases a, b, c y d de variación de  $P$ . Se representa un caso en el que  $\Delta P_{ab}$  es muy pequeño en comparación a  $\Delta P_{ac}$

( $\Delta P_{ab} \rightarrow 0$ ), con un desplazamiento relativo máximo  $\Delta \delta = 0.2a$  y una fuerza  $P$  variando entre 0 y el valor que produce una tensión axial  $\sigma_{xx}^n = 0.75 p_0$ . Puede apreciarse, que el rango de variación de  $\sigma_{xx}$  en el punto  $m$  entre las fases a y c,  $\Delta \sigma_1$ , es menor del que se produciría si no hubiera deslizamiento,  $\Delta \sigma_2$ . Se representa también, en línea de trazos, la evolución de las tensiones en  $m$  cuando  $\Delta \delta = 0.4a$ , pudiéndose comprobar que el rango de variación de esta tensión disminuirá a medida que aumenta el deslizamiento.

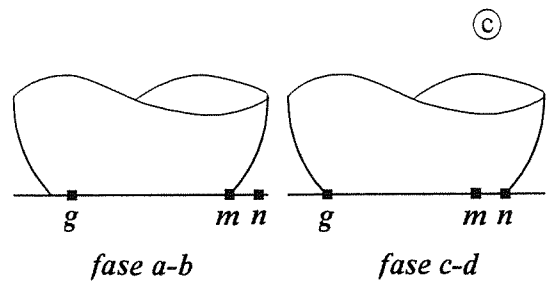


Fig. 9c. (c) Esquemas de la zona de contacto en dos posiciones.

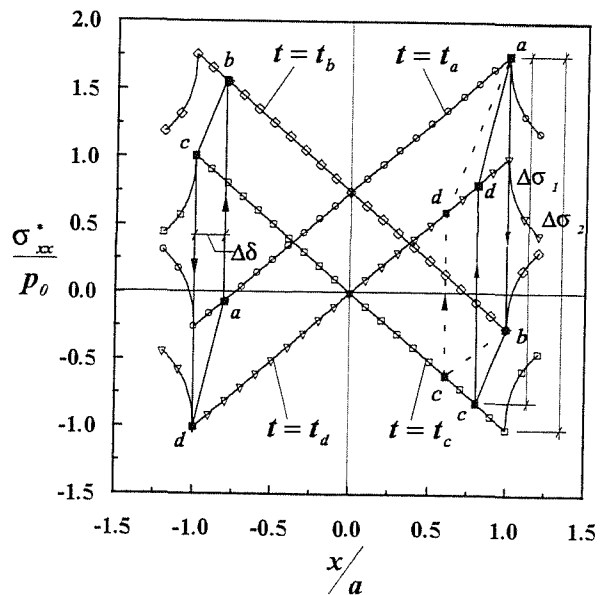


Fig. 10a. Distribución de tensiones  $\sigma_{xx}^*$  en los instantes a, b, c y d (Fig. 9) en el eje  $y=z=0$ .

Si se incluye también el efecto de las tensiones producidas por la fuerza normal  $N$ ,  $\sigma_{xx}^n$ , el rango de variación será mayor que en el caso anterior, como se muestra en la figura 10b, e incluso mayor que el producido si no hubiera deslizamiento. En este caso debe considerarse también el efecto de la variación de las otras componentes de la tensión,  $\Delta \sigma_{zz}$ ,  $\Delta \sigma_{yy}$ , etc. Para tener una idea de los desfases existentes entre las tensiones, la figura 11 muestra la variación de  $\sigma_{xx}$



versus  $\tau_{xz}$  en el punto  $m$  anterior (Fig. 9c) y en un punto  $v$  situado debajo de  $m$ , a una profundidad  $z=0.05a$ , cuando  $\Delta\delta=0.2a$ . También se representa, de trazos, el caso del punto  $g$  representado en la figura 9c. Puede apreciarse que el desfase es importante incluso a cierta profundidad, debajo de la superficie, como es el caso del punto  $v$ . En el punto  $g$  la evolución es aún más compleja, con dos bucles en un ciclo. No obstante este caso es menos significativo, ya que, siendo un punto de la superficie, como el  $m$ , el rango de variación de  $\sigma_{eq}$  es bastante menor que en éste.

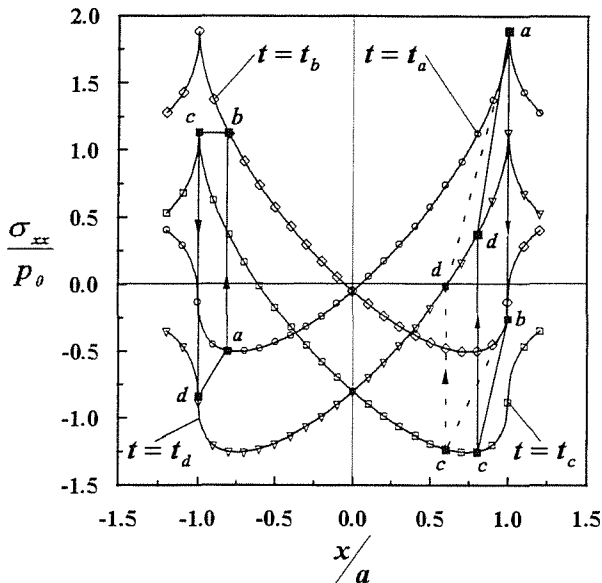


Fig. 10b. Distribución de tensiones  $\sigma_{xx}$  en los instantes  $a, b, c$  y  $d$  (Fig. 9) en el eje  $y=z=0$ .

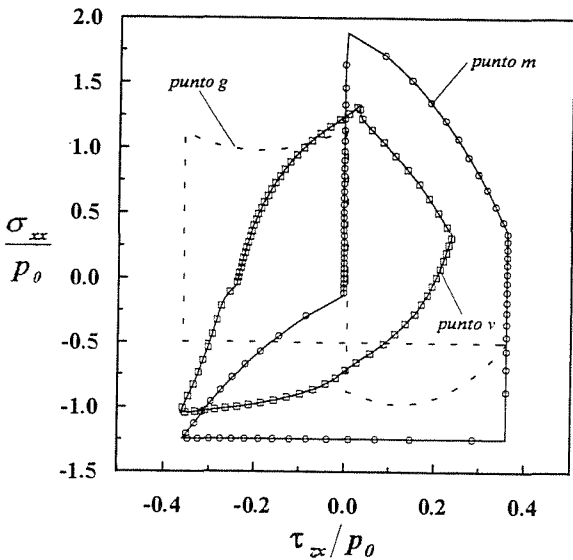


Fig. 11. Relación  $\sigma_{xx}-\tau_{xz}$  en tres puntos del plano  $y=0$ :  $m, g$  y  $v$  (Fig. 9c).  $x_v=x_m, z_v=0.05a$ .

Para evaluar el daño a fatiga durante un proceso de fatiga multiaxial como ocurre en fretting, se ha propuesto la consideración de diversos parámetros, dependiendo del material, niveles de carga, etc. [20-22]. Uno de estos parámetros es la tensión equivalente de von Mises asociada a los incrementos de tensiones producidos durante un ciclo de fretting. El incremento de esta tensión se define:

$$\Delta\sigma_{eq} = \left[ \frac{1}{2} [(\Delta\sigma_{xx} - \Delta\sigma_{yy})^2 + (\Delta\sigma_{yy} - \Delta\sigma_{zz})^2 + (\Delta\sigma_{zz} - \Delta\sigma_{xx})^2] + 3(\Delta\tau_{xy}^2 + \Delta\tau_{yz}^2 + \Delta\tau_{zx}^2) \right]^{1/2} \quad (17)$$

Donde  $\Delta\sigma_{ij}$  es el incremento de la componente  $ij$  de tensión producida durante un semiciclo de variación de  $P$ .

El análisis de la evolución de este parámetro con la amplitud del deslizamiento puede emplearse como primera aproximación para conocer el posible efecto de la amplitud del deslizamiento global sobre el daño en un proceso de fretting fatigue. En un punto cualquiera de la superficie de contacto o de sus proximidades, el incremento de la tensión equivalente será función de diversos parámetros, como son la posición del punto relativa a la superficie de contacto, la geometría de las superficies, las fuerzas  $N$  y  $P$ , el coeficiente de rozamiento y la amplitud del deslizamiento producido.

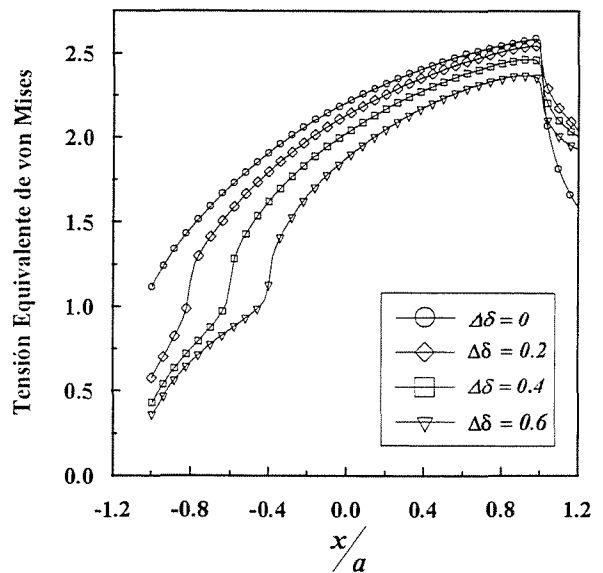


Fig. 12a. Distribución de  $\sigma_{eq}$  en dos ejes del plano  $y=0$  para varias amplitudes de desplazamiento y  $z=0$ .

Para conocer el efecto global del deslizamiento sobre el daño, puede analizarse la variación de la tensión de von Mises producida por el incremento de tensiones entre las fases  $a$  y  $c$  para los casos de existencia o no de

deslizamiento. La figura 12a muestra el incremento de la tensión de von Mises asociada al rango de variación de las tensiones en el eje  $y=0$  de la superficie de contacto, para un mismo  $\Delta P_{ac}$ , con varios valores de  $\Delta\delta$ :  $\Delta\delta=0$ , que corresponde a un caso en que  $\Delta P_{ab} \approx \Delta P_{ac}$ , o lo que es igual, deslizamiento global incipiente;  $\Delta\delta=0.2$ ;  $\Delta\delta=0.4$ ; y  $\Delta\delta=0.6$ . Los casos de  $\Delta\delta > 0$  corresponden a casos en que se considera  $\Delta P_{ab} \ll \Delta P_{ac}$ , es decir, suponiendo que el  $\Delta P_{ab}$  no produce prácticamente incremento de tensiones axiales. La figura 12b muestra el mismo parámetro en los mismos casos, pero en un eje  $y=0$ ,  $z=0.1a$ . Puede apreciarse que a una profundidad en la que el efecto de las tensiones producidas por el contacto es aún importante, los rangos de variación de la tensión de von Mises son menores cuando se produce el deslizamiento indicado. En general, la reducción del rango se hace mayor a medida que crece la amplitud del deslizamiento.

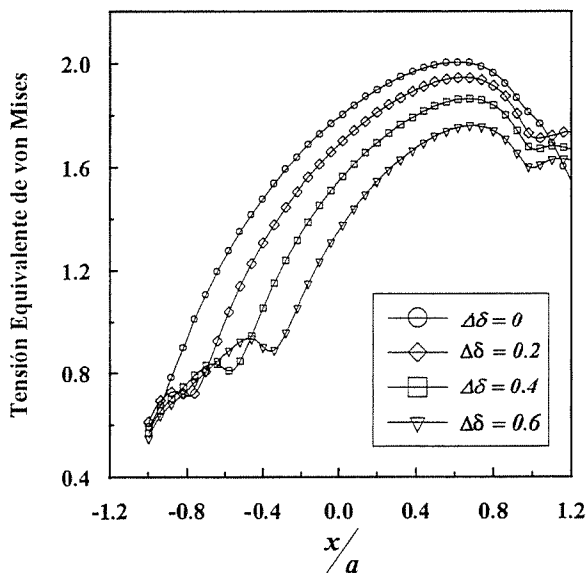


Fig. 12b. Distribución de  $\sigma_{eq}$  en dos ejes del plano  $y=0$  para varias amplitudes de deslizamiento y  $z=0.05a$ .

#### 4. DISCUSIÓN

Rooke y Edwards [6] analizaron el desfase producido entre las fuerzas  $F$  y  $P$  durante el proceso de fretting para diferentes condiciones de carga. Comprobaron que dicho desfase puede tener una influencia apreciable sobre la velocidad de crecimiento de la grieta en sus estados iniciales. En este trabajo se ha comprobado también que, además de producirse desfase entre las cargas, se produce desfase entre las distintas componentes de la tensión generada en las proximidades de la zona de contacto. Dicho desfase se produce tanto en condiciones de deslizamiento parcial como de deslizamiento global, y para cualquier relación

entre  $F$  y  $P$ . Este desfase se producirá en cualquier situación de fretting y tipo de contacto. Sus características serán distintas dependiendo sobre todo de la geometría de cada caso y de las condiciones de carga.

En el caso de puentes de compresión con contacto puntual, el desfase entre las componentes de la tensión será diferente para cada punto de la zona de contacto y sus proximidades. Dependerá también de los niveles de tensión, que harán que se produzca deslizamiento o no, modificando las características del mismo.

Diversos autores han comprobado para casos de fatiga multiaxial que el desfase entre componentes de tensión puede producir variaciones importantes en la vida a fatiga. La diferencia de comportamiento en relación al caso de variación proporcional de las tensiones será mayor o menor, dependiendo del tipo de desfase producido y de otros factores, como pueden ser material y nivel de tensiones. El citado efecto se ha comprobado tanto para alto número de ciclos [20,21] como para bajo número de ellos [22]. De acuerdo con estos resultados, cabe esperar que el desfase producido en procesos de fretting influya apreciablemente sobre la duración del proceso de fatiga. En el caso de contacto puntual, donde el incremento de tensiones equivalentes de von Mises, no es muy diferente en distintas zonas del área de contacto, el desfase puede influir también sobre la localización de la zona de inicio de la grieta que será finalmente dominante en el proceso de fatiga. En cualquier caso, de acuerdo con los estados de tensiones producidos en los procesos de fretting, para el análisis de la vida a fatiga será importante considerar criterios de fatiga multiaxial que sean capaces de incluir el efecto del desfase entre las tensiones producidas, tanto sobre la iniciación como sobre el crecimiento.

En cuanto al caso de deslizamiento global, se ha comprobado que los deslizamientos amplios asociados a cargas axiales en las probetas pueden hacer que se produzcan rangos de tensiones equivalentes menores que los calculados cuando no se tiene en cuenta la amplitud de este deslizamiento. Esta reducción en los rangos será mayor cuanto mayor sea la amplitud del deslizamiento. Este efecto hará que si no se considera la influencia del deslizamiento se predigan vidas menores que las reales. Esta variación de los rangos con el desplazamiento máximo puede ser una de las razones por las que los deslizamientos en el contacto influyen favorablemente sobre la vida a partir de que estos alcanzan determinados valores [23].

La influencia del deslizamiento sobre las tensiones ha sido analizada únicamente para el caso de contacto puntual. A la vista de la similitud entre el campo de tensiones en el eje  $y=0$ ,  $z=0$  de un contacto puntual y

el producido en un contacto con superficies cilíndricas, puede decirse que el efecto en este caso será similar al del contacto puntual. Con contactos planos, el efecto del deslizamiento debe analizarse a partir del análisis de tensiones en el contacto, de forma similar a lo realizado para el contacto puntual. En este tipo de contacto se producen grandes gradientes de tensiones en el borde de la zona de contacto, con una pequeña dimensión de la zona de altas tensiones en relación al tamaño de la zona de contacto [24]. Por ello, cabe esperar que en situación de deslizamiento global con cierta amplitud, los ciclos de tensión en los puntos más desfavorables de la probeta sean apreciablemente distintos a los ocurridos cuando no hay deslizamiento. La consecuencia será una variación en la vida del elemento en función de la amplitud del deslizamiento. Para predecir la forma de variación del daño con la amplitud, será necesario realizar un análisis de tensiones similar al aquí efectuado para contacto puntual. En cualquier caso, a la vista de la forma de las distribuciones de tensión, el efecto dependerá de la amplitud del deslizamiento normalizado al ancho de la zona de contacto.

## 5. CONCLUSIONES

A la vista de los análisis anteriores, cabe concluir:

1. En fretting fatigue se pueden producir desfases entre las cargas externas y las de rozamiento, dependiendo de la geometría del conjunto sometido a fretting y los niveles de carga.
2. Además de ese desfase entre cargas, durante un ciclo de variación de las fuerzas de fricción se produce un desfase entre las tensiones tangenciales y normales generadas por dichas fuerzas. Este desfase puede ser importante y tener influencia sobre la duración de los procesos de iniciación y crecimiento de grieta cuando ésta aún es pequeña en comparación a la dimensión de la zona de contacto.
3. En caso de cargas de fricción producidas por un elemento de contacto esférico, si existe deslizamiento global, las amplitudes de los ciclos de tensiones dependerán de la amplitud del deslizamiento cíclico producido, disminuyendo los rangos de tensiones equivalentes al incrementar el desplazamiento relativo cíclico.
4. Estos factores hacen que a la hora de aplicar algún criterio para determinar la vida a fatiga de un elemento sometido a fretting sea necesario conocer, no sólo las tensiones máximas y mínimas generadas por cada tipo de carga que interviene (normal a las superficies, de fricción y axial), sino

la también la forma de evolución entre ellas. Para ello será imprescindible realizar algún tipo de simulación del comportamiento durante los procesos de carga.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Hills, D. A. and Nowell, D., "The Development of a Fretting Fatigue Experiment with Well-Defined Characteristics, *Standardization of Fretting Fatigue Methods and Equipments*, M. H. Attia y R. B. Waterhouse, Eds., ASTM STP 1159, Amer. Soc. for Testing and Mater., 1992, 69-84.
- [2] Miller, G. R., Keer, L. M. y Cheng, H. S., "On the Mechanics of Crack Growth Due to Contact Loading", *Proc. R. Soc. London, A* 397 (1985), 197-209.
- [3] Petiot, C., Vincent, K., Dang Van, K., Maouche, N., Foulquier, J. y Journet, B., "An Analysis of Fretting-Fatigue Failure Combined with Numerical Calculations to Predict Crack Nucleation", *Wear*, 181-183 (1995), 101-111.
- [4] Kapoor, A., "A Re-evaluation of the Life Rupture of Ductile Metals by Cyclic Plastic Strain", *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, 17 (1994), 201-219.
- [5] Endo, K., Goto, H. y Fukunaga, T., "Behaviors of Frictional Force in Fretting Fatigue", *Bull. of the JSME*, 17 (1974), 647-654.
- [6] Rooke, D. P. y Edwards, P. R., "Waveforms in Fretting Fatigue", *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, 11 (1988), 447-465.
- [7] Rooke, D. P. y Courtney, T. J., "The Effect of Final Friction Coefficient on Fretting Fatigue Waveforms", *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, 12 (1989), 227-236.
- [8] Edwards, P. R., "The Application of Fracture Mechanics to Predicting Fretting Fatigue", *Fretting Fatigue*, R. B. Waterhouse, Ed., Applied Science Publ., 1981, 67-97.
- [9] Mindlin, R. D. y Deresiewicz, H., "Elastic Spheres in Contact Under Varying Oblique Forces", *J. of Appl. Mech.*, 75 (1953), 327-344.
- [10] Johnson, K. L., *Contact Mechanics*, Cambridge Univ. Press, 1985.
- [11] Hills, D. A. and Nowell, D., *Mechanics of Fretting Fatigue*, Kluwer Academic Publ., 1994.
- [12] Cattaneo, C., "Sul Contatto di Due Corpi Elastici: Distribuzione Locale Degli Sforzi", *Reconditi dell'Accademia Nazionale dei Lincei*, 27 (1938), 342-348, 434-436, 474-478.
- [13] Mindlin, R. D., "Compliance of Elastic Bodies in Contact", *J. of Appl. Mech.*, 75 (1949), 259-268.
- [14] Hamilton, G. M. y Goodman L. E., "The Stress Field Created by a Circular Sliding Contact", *J. Appl. Mech.*, 33 (1966), 371-376.

- [15] Hamilton, G. M., "Explicit Equations for the Stresses Beneath a Sliding Spherical Contact", Proc. I. Mech. E., 197C, 53-59.
- [16] Sackfield, A. y Hills, D., "A Note on the Hertz Contact Problem: a Correlation of Standard Formulae", J. Strain Anal., 18 (1983), 195-197.
- [17] Fellows, L. J., Nowell, D. y Hills, D. A., "Contact Stresse in a Moderately Thin Strip (with Particular Reference to Fretting Experiments)", Wear, 185 (1995), 235-238.
- [18] Munisamy, R. L., Hills, D. A., "Static Axisymmetric Hertzian Contacts Subject to Searing Forces", J. Appl. Mech., 61 (1994), 278-283.
- [19] Nowell, D. y Hills, D. A., "Hertzian Contact of Grund Surfaces", J. of Tribology, 111 (1989), 175-179.
- [20] Tipton, S. M. y Nelson, D. V., "Fatigue Life Predictions for a Notched Shaft in Combined Bending and Torsion", *Multiaxial Fatigue*, K. J. Miller y M. W. Brown, Eds., ASTM STP 853, Amer. Soc. for Testing and Mater., 1985, 514-550.
- [21] McDiarmid, D. L., "Mean Stress Effect in Biaxial Fatigue Where the Stresses are Out-of-Phase and at Different Frequencies", *Fatigue under Biaxial and Multiaxial Loading*, K. Kussmaul, D. McDiarmid y D. Socie, Eds.,ESIS10, Mech. Eng. Publ., 1991, 321-335.
- [22] Fatemi, A. y Socie, D., "A Critical Plane Approach to Multiaxial Fatigue Damage Including Out-of-phase Loading", *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, 11 (1988), 145-165.
- [23] Vingsbo, O. y Söderberg, S., "On Fretting Maps", *Wear*, 126 (1988), 131-147.
- [24] O'Connor, J. J., "The Role of Elastic Stress Analysis in the Interpretation of Fretting Fatigue Failure", *Fretting Fatigue*, R. B. Waterhouse, Ed., Applied Science Publ., 1981, 23-66.