

## CARACTERIZACIÓN DE UNA MÁQUINA PARA REALIZAR ENSAYOS DE FRETTEING FATIGA

Luis Artillo, Carlos Navarro, Jaime Domínguez

Universidad de Sevilla

Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales

Escuela Superior de Ingenieros, c/ Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla

**Resumen.** Descripción de un montaje para la realización de ensayos de fretting fatiga con contacto esférico. Se analiza el contacto y las tensiones que aparecen en él. Se describe todo el sistema, las cargas que se aplican y cómo (fuerzas normales, tangenciales y axiales), sistema de control de las cargas, probetas y elementos de contacto empleados. Se describen distintos aspectos de la puesta a punto de esta máquina (frecuencias naturales, alineamiento, pulido de probetas), así como la medida del rozamiento y rango de cargas que pueden ser aplicadas.

**Abstract.** Description of a test rig designed for fretting fatigue tests with spherical contact. This type of contact and the stresses associated to it are analyzed. The system is described including the loads and how they are applied and controlled, the specimens and contact pads. Different aspects for the set up of the machine are described (natural frequencies, alignment, polishing of specimens), the measurement of the coefficient of friction and the range of loads that can be applied.

### 1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno llamado fretting es un tipo especial de fatiga en el que las principales tensiones son debidas a que hay dos piezas en contacto que tienden a deslizarse una sobre la otra. Si además de las tensiones generadas en el contacto, se le añade una carga cíclica a una de las dos piezas, se le llama fretting fatiga. Este tipo de fatiga es más perjudicial al unirse los dos efectos, provocando un estado tensional similar al debido a un concentrador de tensiones. En la zona de contacto entre los dos cuerpos se generan una serie de grietas que pueden crecer hasta provocar la rotura del material o simplemente deteriorar la superficie por desprendimiento de lascas y desgaste. El fenómeno del fretting puede ser observado en servicio en piezas tales como uniones atornilladas y roblonadas, acoplamientos con ajuste en caliente, cadenas, etc.[1].

La iniciación es mucho más rápida que si no existe contacto y sólo se debe a la fatiga. En la fatiga a alto número de ciclos el fretting toma gran importancia. Este fenómeno es el causante de muchos fallos de componentes de máquinas que trabajan en una situación, como la explicada, de rozamiento y movimiento cíclico.

Los factores que intervienen en el fretting son la presión en el contacto, la amplitud del deslizamiento relativo, las tensiones tangenciales en el contacto, la tensión global de la pieza, el tipo de material, el coeficiente de

rozamiento, el estado y geometría de la superficie y las condiciones ambientales.

Según sea la geometría de los cuerpos que se encuentren en contacto, así será la zona de contacto. Éste es uno de los factores que determinan la distribución de presiones en dicha zona. La búsqueda de generalidad de los ensayos lleva a experimentar con contactos cilíndricos o esféricos.

Para el caso que ocupa este estudio (contacto esfera-plano) se tiene una forma circular en el contacto cuyo radio viene dado por la teoría de Hertz. [2].

$$a = \left( \frac{3NR}{4E^*} \right)^{1/3} \quad (1)$$

donde

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}, \quad (2)$$

$N$  es la fuerza normal aplicada y  $R$  es el radio de la esfera. Al aplicar una fuerza normal y otra tangencial se distinguen dos zonas diferentes, con forma de círculos concéntricos. En la parte interior se establece una zona de no deslizamiento, mientras que en la parte exterior se produce deslizamiento relativo. Esto es así mientras la fuerza tangencial no sea lo suficientemente grande como para que se produzca deslizamiento global.

Normalmente se utilizan los dos cuerpos del mismo material porque así se desacoplan las tensiones tangenciales de las normales en el contacto y el modelo es más sencillo.

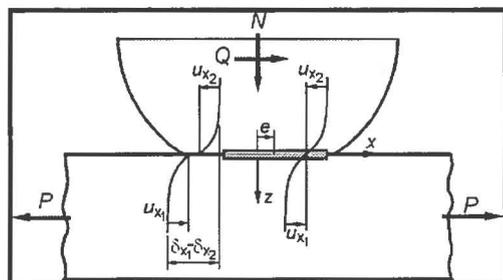


Fig. 1. Contacto esfera-plano.

Cuando al estado tensional descrito antes se le añade una fuerza global,  $P$ , a uno de los cuerpos, en el plano de contacto, se provoca un desplazamiento de la zona de no deslizamiento,  $e$ , (figura 1). El valor de la excentricidad se puede obtener igualando los valores de los desplazamientos en la dirección tangencial ( $u_{x1} = u_{x2}$ ) de los dos cuerpos, en el plano de contacto, en la zona de no deslizamiento. Si se impone la igualdad en el mismo plano, pero en dirección perpendicular ( $u_{y1} = u_{y2}$ ), para que se cumpla debe existir cierta tensión  $q_y$ , supuesta nula. Esta componente nueva hace que varíe la distribución de tensiones. Esta tensión  $q_y$  es muy pequeña respecto a la tangencial en la dirección perpendicular  $q_x$  cerca del eje  $x$ . Conforme se separa del eje,  $q_y$  aumenta hasta que, su unión a  $q_x$ , son suficientes para producir deslizamiento. De esta forma, la zona de no deslizamiento se reduce y deja de ser un círculo el contacto. El valor de esta tensión nueva  $q_y$  se puede considerar nulo, cometiendo errores muy pequeños. La forma de comprobar lo anterior es suponiendo que el deslizamiento relativo y las tensiones que aparecen para anularlas, son proporcionales en el límite de la zona de no deslizamiento. Con esta hipótesis, se comparan los deslizamientos en dirección  $y$  con el que se produciría en dirección  $x$  si todos los puntos deslizasen excepto el centro. Por tanto no es necesario tener en cuenta estas tensiones para los ensayos de fretting fatiga.

Si no se tiene en cuenta el desplazamiento de la zona de no deslizamiento las tensiones en dirección  $x$ , calculadas en el contacto, se infravaloran. Para ensayos en aluminio con esferas de 25.4mm de radio y cargas normales de 12 N, tangenciales  $\pm 9$  N y axial de  $\pm 83$  MPa se infravaloran en un 6% (figura 2). Si lo que se estudia es la tensión de Von Mises se encuentra que estas se incrementan un 8% si se tiene en cuenta el desplazamiento  $e$ . Analizando estas tensiones a cierta profundidad los incrementos son mayores, pero el valor total es menor. Para una profundidad de 0.1 veces el radio del contacto, el incremento es de un 9% (figura 3) y de un 12% para la tensión equivalente de Von Mises. Para cargas axiales mayores se tienen valores de  $e$

superiores, que pueden llevar a incrementos de tensiones de un 10%, [3].

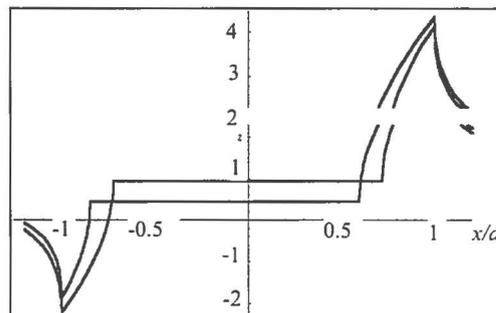


Fig. 2.  $\Delta\sigma_x$  en ejes  $y = 0, z = 0$ .

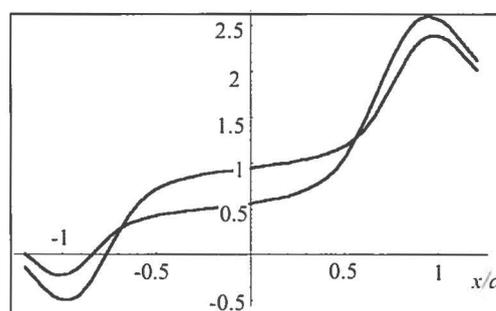


Fig. 3.  $\Delta\sigma_x$  en ejes  $y = 0, z = 0.1a$ .

## 2. DISPOSITIVO DE ENSAYOS

El dispositivo diseñado para realizar los ensayos de fretting fatiga se compone de una serie de equipos que pueden ser clasificados en cinco grupos. Estos son: sistema de control y medida de fuerzas en el contacto, máquina servohidráulica uniaxial, sistema de adquisición, especímenes y útiles auxiliares. Una máquina similar a ésta fue descrita en [4].

### 2.1. Sistema de control y medida de fuerzas en el contacto

En la figura 4 se muestra un esquema del sistema de cargas que se aplican en este ensayo. La probeta tiene cierta flexibilidad,  $C_p$ , está fija en su parte superior y en la inferior se le aplica una carga  $P$ . En contacto con la probeta hay dos elementos con forma esférica a los que se le aplica una carga normal  $N$ . Estos elementos de contacto se apoyan sobre unos soportes flexibles,  $C_q$ . Al deformarse la probeta con la aplicación de la carga intenta arrastrar consigo los elementos de contacto, generando así una carga tangencial. Variando esta rigidez se pueden conseguir distintas cargas tangenciales sobre la probeta,  $Q$ .

La figura 5 muestra cómo es la máquina real montada en el laboratorio. Ésta se compone de una base rígida sobre la que se atornillan las placas flexibles. Las placas flexibles se pueden empotrar a distintas distancias, con lo cual se pueden conseguir distintas relaciones de carga

axial,  $P$ , con la fuerza tangencial,  $Q$ , que se obtiene en el contacto, i.e., distintas  $C_q$ . Conforme se disminuye la longitud libre de las placas, más rígido se hace el sistema, y por tanto, para la misma carga axial se obtienen mayores fuerzas tangenciales.

Los valores deseados de  $P$  y  $Q$ , así como los desplazamientos verticales del sistema y frecuencias naturales en cada posición de empotramiento, determinan la elección de la longitud libre de placa flexible.

La *placa rígida* soporta el resto del sistema de forma que las fuerzas normales siempre sean perpendiculares en el contacto. Los *cilindros soportes* de esferas y *abrazaderas* transmiten las fuerzas normales, aplicadas con *muelles* a las esferas. Las *pletinas de fijación* de las placas flexibles sirven para empotrar las placas flexibles a la longitud requerida.

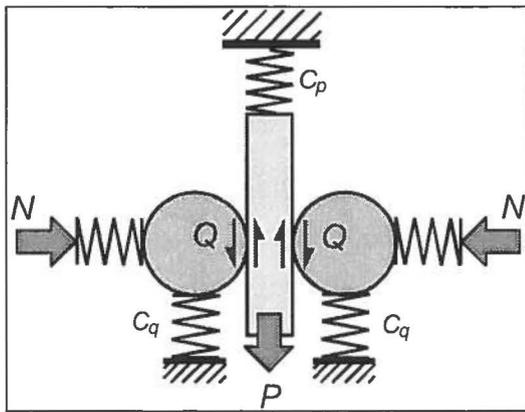


Fig. 4. Esquema del ensayo.

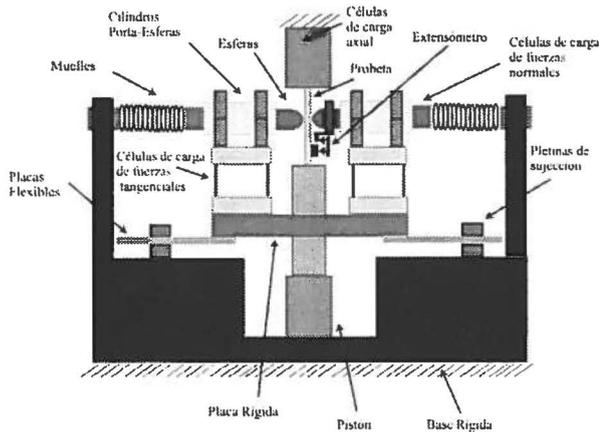


Fig. 5. Dispositivo de ensayos de fretting fatiga.

2.2. Máquina servohidráulica uniaxial

Está formada por un pórtico, un control del equipo (MTS) y una célula de carga.

2.3. Probetas y esferas

Las piezas usadas para crear el contacto esfera-plano son una probeta de sección cuadrada y una pieza con una superficie esférica en un extremo. El material del que están realizados es aluminio 7075 T651. Las dimensiones de estos elementos se pueden ver en las figuras 6 y 7.

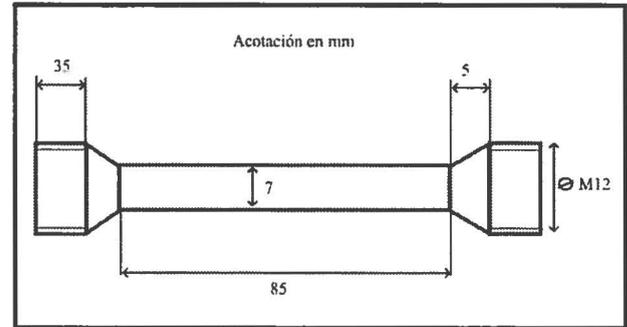


Fig. 6. Probeta.

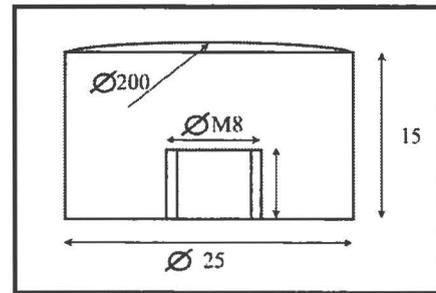


Fig. 7. Esfera.

2.4. Adquisición de datos

Los datos que se han de adquirir son varios de los parámetros que intervienen en un ensayo de fretting fatiga. Éstos son: las fuerzas normales y las tangenciales en el contacto (a cada lado de la probeta), la fuerza axial aplicada a la probeta, los desplazamientos producidos en el pistón y el deslizamiento relativo entre las superficies en contacto. Para estos parámetros se utilizan respectivamente células de carga para las fuerzas tangenciales y para las fuerzas normales en el contacto, la célula de carga propia de la máquina de ensayo, la LVDT propia de la máquina y un extensómetro.

Todas estas señales se filtran analógicamente para eliminar ruidos y evitar el fenómeno de aliasing y se digitalizan a través de una tarjeta de adquisición de datos de la marca National Instruments. La frecuencia de adquisición se fija en 50 veces la del ensayo, de esta forma el máximo error cometido en el registro de la señal es menor del 1%. El programa informático, realizado en LabView, además de grabar los datos en disco muestra en la pantalla en tiempo real la variación de los distintos parámetros y la variación de la carga axial frente a la tangencial. Esta gráfica es muy útil para

saber cuándo se produce el deslizamiento global, figuras 9 y 10.

### 2.5. Elementos auxiliares

Estos elementos se usan para el montaje del sistema. La finalidad de estos es conseguir que el dispositivo quede centrado. Estas piezas son un cilindro de neopreno que ajusta entre el dispositivo y el pistón y una pletina de acero para que la cara de la probeta sea perpendicular a la aplicación de la carga normal.

## 3. PUESTA A PUNTO DEL DISPOSITIVO

### 3.1. Frecuencia natural del sistema

Idealmente las frecuencias naturales del sistema deben ser lo más altas posibles para poder usar frecuencias de ensayo mayores. El sistema se puede considerar lo suficientemente rígido como para que sólo influya en el movimiento cíclico vertical el modo 1 de vibración de las placas flexibles. Este modo se corresponde al movimiento provocado por la carga cíclica de tracción-compresión a la que se somete a la probeta en los ensayos de fretting fatiga. También se calcula la frecuencia natural correspondiente al modo de torsión del sistema (respecto al eje de simetría horizontal). Este puede ser problemático, si el contacto esfera-probeta no se encuentra perfectamente centrado.

La frecuencia natural depende de la masa y la rigidez del sistema. La variación de las longitudes de empotramiento de las placas provocan variaciones de rigidez, la longitud libre de la placa se considera por tanto una de las variables del problema. Respecto a la masa del sistema, sólo pueden ser sustituidos, sin tener que recomponer el sistema, los cilindros portadores de las esferas, que poseen una masa de 2.3 Kg entre los dos, y que pueden ser fabricados de materiales más ligeros, como el aluminio, de tal forma que se consiga aumentar la frecuencia natural.

La rigidez del sistema también varía si las esferas contactan con la probeta o si por el contrario no hay conexión. El caso en el que no hay contacto se considera para la situación, en la cual, se produce el deslizamiento global, en los ensayos de fretting fatiga. Se considera no deslizamiento global en el contacto con la probeta. Al ser proporcional la frecuencia con la raíz cuadrada de la rigidez es más problemático el caso en el cual no hay contacto pues es más flexible el sistema y la frecuencia por tanto es menor.

De los valores experimentales se obtienen unas expresiones de la frecuencia natural en función de la longitud entre empotramientos de las placas flexibles (figura 8). (De arriba abajo: 1ª = Teórico, 2ª = Vertical-Sin cilindros, 3ª = Vertical-Con cilindros, 4ª = Torsión-Sin cilindros, 5ª = Torsión-Con cilindros).

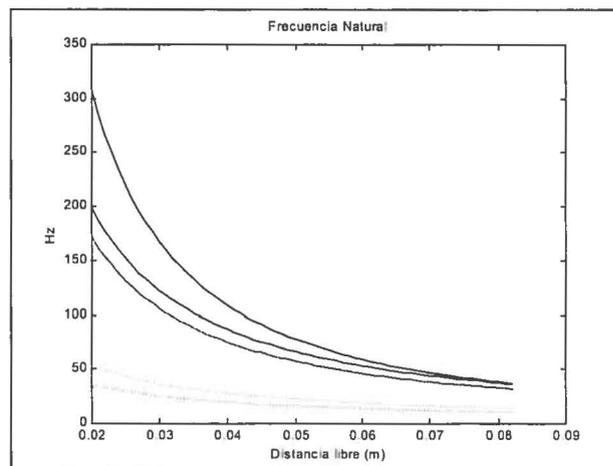


Fig. 8. Frecuencias naturales del sistema.

Reducir el peso, de los cilindros, no provoca un aumento tan considerable de la frecuencia, ya que, la curva mostrada es sin los cilindros, y la solución de reducción de peso, debe situarse entre las dos curvas.

### 3.2. Alineamiento de la máquina servohidráulica

En cualquier ensayo de este tipo es muy importante comprobar el alineamiento de la máquina por las tensiones de flexión que se pueden inducir con la falta del mismo. Para esta comprobación se utiliza un equipo comercial que consta de una probeta instrumentada con bandas extensométricas para detectar las tensiones de flexión y un aparato que acoplado al tren de carga consigue disminuir el desalineamiento.

Las tensiones de flexión que se producen por no existir un total alineamiento se encuentran entre 4 y -5 MPa para el rango de carga axial de 0 a 5000N. No obstante, si se tiene sólo en cuenta las que se producen en el plano en el que se aplican las cargas, estas tensiones se sitúan entre -1.75 y 1.75 MPa. Los valores de tensiones de flexión suponen un 4.2 % para 2000 N y un 1.7 % para 5000 N respecto a la tensión axial valores perfectamente admisibles.

### 3.3. Pulido de probetas y esferas

Las probetas y esferas se someten a un pulido con lijas que van de 500 a 4000 puntos seguido de unos paños impregnados de alúmina y otros con polvo de sílice. Se consiguen rugosidades medias (aritmética) menores de 0,2  $\mu\text{m}$  y rugosidades pico-valle menores de 1.8  $\mu\text{m}$ .

Las probetas presentan problemas como es la curvatura transversal provocada por unas mayores presiones en los bordes de la misma y por la flexibilidad de los elementos abrasivos. Esta pérdida de planitud provoca que la forma del contacto no sea un círculo y por tanto la presión máxima en el contacto no sea la supuesta en un contacto esfera-plano teórico. La solución a este

problema es colocar a cada lado de la probeta dos piezas de las mismas características de tal forma que sean éstas las que sufran el desgaste en los bordes quedando plana la zona central. Las pruebas realizadas así producen radios de curvatura de 11.2 m, provocando diferencias de presión máxima en el contacto, respecto al plano, de un 0.25%.

Las esferas tienen un problema con las mismas consecuencias sobre la presión máxima en el contacto. Al provocarles un movimiento circular, si la velocidad de giro es muy grande provoca una disminución del radio debido a que la velocidad lineal en el perímetro es mayor que en la zona central, produciéndose un mayor desgaste en el extremo. Por otro lado, si la velocidad es demasiado baja, se puede provocar un direccionamiento radial del pulido. Suponiendo una velocidad de pulido (movimiento de vaivén), aproximada, de 20 cm/s, se debe de girar la esfera a unas 15 rpm para conseguir la misma velocidad lineal en la periferia. Las pruebas realizadas entre 30 y 60 rpm no provocan disminuciones de radio importantes.

3.4. Coeficiente de rozamiento

El coeficiente de rozamiento,  $\mu$ , se calcula con un ensayo cíclico aumentando la carga axial progresivamente. Este aumento de carga es lo suficientemente lento como para que no se produzca deslizamiento global. De esta forma los puntos del contacto que se encuentran en deslizamiento parcial aumentan su coeficiente de rozamiento. Esto ocurre hasta que se llega al máximo valor de  $\mu$  a partir del cual se produce el deslizamiento global.

Durante el ensayo se representa la fuerza tangencial en el contacto respecto a la carga axial. Mientras hay deslizamiento parcial se observa una forma como la figura 9 mientras que al producirse el deslizamiento global se produce la forma representada en la figura 10.

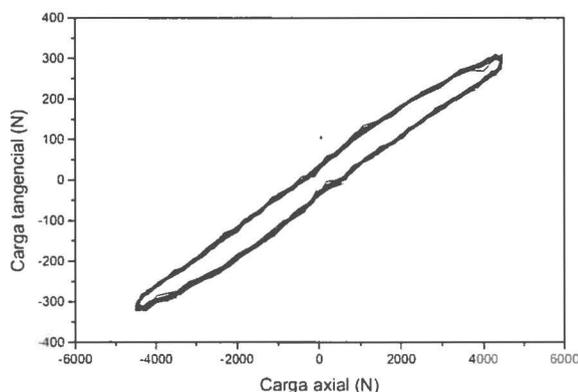


Fig. 9. Deslizamiento parcial.

La figura 11 muestra los máximos y mínimos de las cargas tangenciales a ambos lados de la probeta a lo largo de este ensayo. Se observa cómo van aumentando y cómo hay un momento en el que las cargas tangenciales caen bruscamente. En este momento se produce deslizamiento global, el coeficiente de rozamiento baja bruscamente y por lo tanto las cargas tangenciales también. A continuación el coeficiente sigue aumentando hasta que se produce otra vez un deslizamiento global. En este caso  $\mu$  ya se ha estabilizado y no aumenta más. Justo antes de este momento, siendo  $q_1$  la carga tangencial de una esfera y  $q_2$  la de la otra, se tiene un coeficiente de rozamiento de 1.52 siendo la fuerza normal en el contacto de 200 N. En un posterior ensayo con fuerzas normales de 100N se obtiene, de la misma forma, un coeficiente de 1.76.

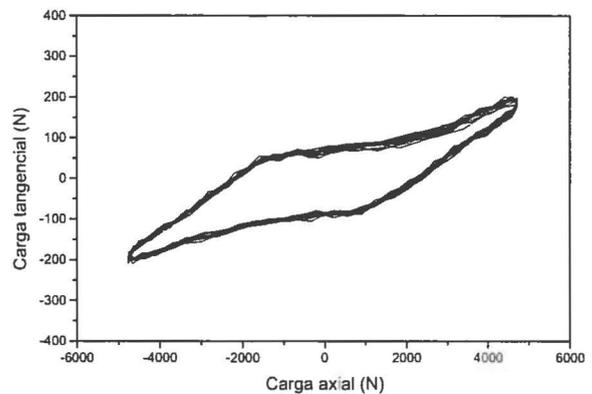


Fig. 10. Deslizamiento global.

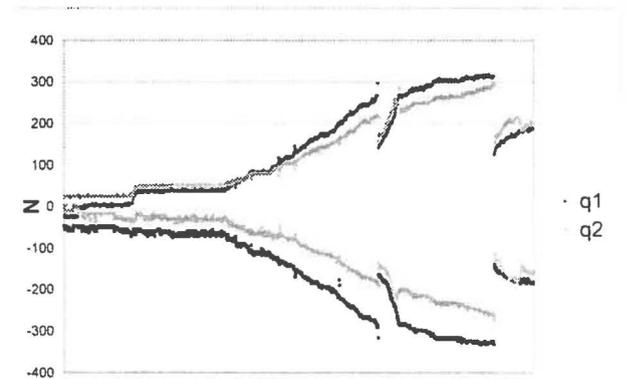


Fig. 11. Fuerzas tangenciales máximas y mínimas durante el ensayo.

3.5. Características del dispositivo

La máquina servohidráulica dispone de un grupo hidráulico capaz de aplicar una carga en el pistón de 50000N y un recorrido de este de  $\pm 125$ mm. Una vez realizado el alineado de la máquina no es posible superar los 10000 N ya que a esta carga se aprietan las contratueras del tren de carga para la cual queda fijo. De esta forma, dada la sección de la probeta, la tensión máxima aplicable es de 204 MPa pero las distintas

comprobaciones de puesta a punto se realizan con cargas máximas de 6000 N (122 MPa de tensión axial).

Respecto a las fuerzas normales en el contacto se tienen como máximas aplicables 1100 N por ser este el límite resistido por las células de carga, ya que los muelles acoplados permiten aplicar 1468 N.

Mientras no haya deslizamiento global, la carga tangencial se puede relacionar con la carga axial aplicada a la probeta dependiendo de la distancia a la que se sitúen los apoyos de la placa flexible. El máximo de la carga tangencial dependerá de la carga normal y del coeficiente de rozamiento.

Una prueba realizada para una distancia libre de placa flexible de 53 mm lleva a una relación carga axial-fuerza tangencial ( $P-Q$ ) en el contacto de  $Q = 0.015 P$ . Esta misma relación obtenida de forma experimental es  $Q = 0.01466 P$ , achacándose esa pequeña diferencia a deformaciones locales del sistema. Para esta distancia de placa flexible, el resto del sistema es más rígido que ésta, dependiendo la cantidad desplazada verticalmente de la flexibilidad de la placa. Para una distancia de 23 mm en los apoyos de la placa flexible la relación teórica se separa de la experimental ya que en este caso los cilindros que soportan las esferas giran, debido a que las células de carga de las fuerzas tangenciales se comprimen en un extremo y se traccionan en el otro. En este caso la suposición de que sólo las placas flexibles experimentan el desplazamiento vertical es falsa. Cálculos teóricos demuestran que para esa distancia el giro de los cilindros supone el 23 % del desplazamiento total (debido a giro y flexión de la placa), mientras que en el caso anterior (53 mm) sólo supone un 3 %. Para este último caso la relación experimental es  $Q = 0.067 P$ .

La diferencia principal de esta máquina comparada con la descrita en [4] es que ésta permite la aplicación de mayores cargas en el ensayo

### 3.6. Zona de contacto

Además de ensayos para medir el coeficiente de rozamiento se han realizados ensayos en los que se ha estudiado la zona de contacto y comparado sus dimensiones con los cálculos teóricos. La figura 12 muestra la huella dejada sobre una probeta. Esta huella tiene una zona más oscura que es donde se ha producido el deslizamiento y otra más clara en el interior que es la zona no deslizante y que por lo tanto se ha deteriorado menos. En el ensayo en cuestión se aplicaron solamente 10000 ciclos de carga con el objetivo de que la huella no quedara muy deteriorada. Sobre la foto se han dibujado dos circunferencias blancas. La exterior tiene un diámetro de 1.31 mm, que es el diámetro teórico que debería tener la zona de contacto calculado con la teoría de Herz (ecuación 1) y para las cargas aplicadas en este ensayo. Dentro se ha dibujado otro círculo que se

corresponde con la zona no deslizante. Este círculo tiene el diámetro teórico de esta zona y además se ha introducido la excentricidad debida a la tensión axial. Se puede comprobar la exactitud de los resultados teóricos.

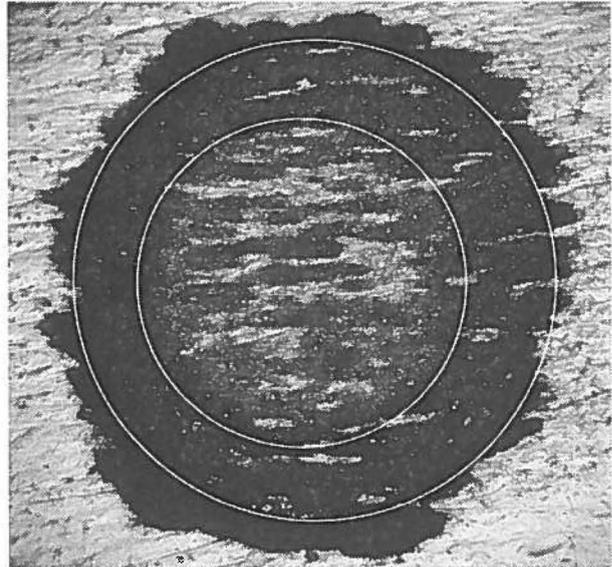


Fig. 12. Huella sobre una probeta.

## 4. CONCLUSIONES

Se ha descrito una máquina diseñada para realizar ensayos de fretting fatiga con contacto esférico. El aparato permite la fácil colocación de distintas geometrías en el contacto y un control y medición independiente de los distintos parámetros que intervienen en este tipo de ensayo. Se ha descrito y medido el coeficiente de rozamiento y se ha comprobado a través de la huella dejada en uno de los ensayos la bondad de las soluciones teóricas sobre sus dimensiones.

## 5. REFERENCIAS

- [1] Waterhouse R B and Lindley T C (Eds.). Fretting Fatigue,ESIS Publication 18, Mech. Eng. Publ, (1994).
- [2] Johnson K.L., Contact Mechanics, Cambridge University Press, (1985).
- [3] Navarro, C. y Domínguez J., "Contact conditions and stresses induced during fretting fatigue", Computational Methods in Contact Mechanics IV, 453-462, (1999).
- [4] Wittkowsky B U, Birch P R, Domínguez J y Suresh S., "An apparatus for quantitative fretting-fatigue testing", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 22, 307-320, (1999).