

## MEDICION DE TENSIONES RESIDUALES EN UN TORNILLO FISURADO: APLICACION AL CALCULO DEL FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES

Campos, J.M., Toribio, J., Sánchez-Gálvez, V., Astiz, M.A.

Departamento de Ciencia de Materiales  
E.T.S. Ingenieros de Caminos (Universidad Politécnica de Madrid)  
Ciudad Universitaria, s/n  
28040 MADRID

**Resumen.**- En el presente artículo se describe la medición de tensiones residuales en el fondo de rosca de un tornillo de métrica M30. Los resultados se emplean para calcular numéricamente el factor de intensidad de tensiones -en el tornillo fisurado- producido por las primitivas tensiones residuales. Se han elegido cuidadosamente los parámetros óptimos de medida: posición relativa entre el haz de rayos X y la muestra, así como el tamaño de la zona irradiada o *spot*. La medición arroja como resultado tracciones en la superficie del tornillo, lo que contradice los escasos datos existentes en la literatura. Se ha realizado un test de contrastación para comprobar el signo de las tensiones residuales cuando el tornillo es sometido a carga externa. Dicho test confirma los resultados de la primera medición. El cálculo tensional se lleva a cabo mediante el Método de los Elementos Finitos. El factor de intensidad de tensiones se obtiene utilizando el Método de la Rigidez Diferencial, basado en el cálculo de la tasa de liberación de energía.

**Abstract.**- This paper deals with the measurement of the residual stresses on the thread root of a M30 bolt. The results are used in the computation of the stress intensity factor -on the cracked bolt- generated by the prior residual stresses. The optimum measurement parameters have been carefully chosen: relative position between the X-ray beam and the sample, and the irradiated spot size. The results are tensions in the bolt surface, what is opposite to the few existing bibliographic data. A checking test has been performed in order to check the sign of these residual stresses on the externally loaded bolt. Such a test confirms the results of the first measurement. The stress computation is carried out by using the Finite Element Method. The Stiffness Derivative Method has been employed in order to obtain the energy release rate and so the stress intensity factor.

## 1. INTRODUCCION

El presente artículo describe un procedimiento de medida original e innovador cuyos resultados constituyen los primeros valores experimentales de las tensiones residuales en el fondo de rosca de un tornillo conformado por laminación. Las medidas se han realizado sobre un perno roscado M30 facilitado por la compañía alemana ERNO-MBB y forman parte de las investigaciones que el Departamento de Ciencia de Materiales realiza para la Agencia Espacial Europea dentro del programa "Damage Tolerance of Metallic Structures".

En primer lugar se ha realizado una exhaustiva búsqueda bibliográfica en la bases de datos europea (METADDEX) y americana (NASA), con el fin de conocer el estado del arte. Tan sólo se han encontrado cinco referencias [1-5] de las cuales cuatro [1,2,4 y 5] muestran el efecto que las tensiones residuales producen sobre diversos comportamientos mecánicos de los materiales, pero sin evaluar su magnitud.

Únicamente Vassilaros [3] presenta cálculos de las tensiones residuales en el fondo de una rosca conformada por laminación utilizando el método de los elementos finitos junto a la teoría de las líneas de deslizamiento. En cualquier caso no se ha encontrado ningún valor experimental de las tensiones residuales en el fondo de rosca.

Ante esta situación se ha considerado la capacidad de diversas técnicas experimentales para la medida de tensiones residuales en dichos fondos de rosca cuya compleja geometría ha limitado la utilización de una técnica no destructiva que permite acceder a los puntos de medida sin contacto íntimo con el material. Esta técnica ha sido la difracción de rayos X y se han obtenido los valores de tensiones residuales en dichos puntos con la exactitud y fiabilidad requeridas en esta investigación.

Se han medido tensiones residuales en las direcciones axial ( $\sigma_{zz}$ ) y circunferencial

( $\sigma_{\theta\theta}$ ) bien sobre un único fondo de rosca o sobre varios consecutivos. Para eliminar interferencias entre la óptica de rayos X y los puntos de medida se han limitado las direcciones espaciales de posicionamiento relativo entre ambos, eligiendo diferentes métodos operativos y montajes experimentales para las direcciones de medida de tensiones residuales axiales y circunferenciales.

Para asegurar la difracción de rayos X únicamente sobre la superficie de los fondos de rosca ha sido necesario recubrir el perfil restante del tornillo (flancos y crestas) con un material absorbente de radiación cuya elección y colocación ha necesitado una investigación paralela que ha aportado un procedimiento original de enmascarado.

Finalmente se han obtenido experimentalmente valores de las tensiones residuales en los fondos de rosca que contradicen, por su signo, a los calculados por Vassilaros [3]. Esta circunstancia ha obligado a diseñar un sofisticado dispositivo experimental que permite contrastar el signo de dichas tensiones cuando se somete el cuerpo del tornillo a un estado de compresión simple en una máquina universal de ensayos, midiéndose simultáneamente por difracción de rayos X las tensiones producidas en los fondos de rosca por dicho estado de carga. Los resultados obtenidos en este ensayo de contrastación validan satisfactoriamente las primeras medidas experimentales de tensiones residuales en los fondos de rosca de un tornillo conformado por laminación.

## 2. FUNDAMENTOS DE MEDIDA

El análisis de las tensiones residuales se fundamenta en el principio de difracción por apilados regulares y ordenados de átomos cuando son incididos por un haz de ondas planas. La relación entre las distancias interplanares  $d_{hkl}$  de las familias de planos de difracción (hkl), el ángulo de difracción ( $\theta$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la radiación incidente fué propuesta por Bragg [6]. Cuando el espectro de la radiación X alcanza el valor característico, su longitud de onda permanece casi-constante alcanzando una intensidad muy superior a la del espectro continuo de rayos X. Así, la diferenciación de la ley de Bragg alcanza la forma:

$$\Delta d/d_0 = -1/2 \Delta 2\theta \cdot \cotg\theta_0 \quad (1)$$

donde  $d_0$  y  $\theta_0$  son los valores teóricos para la situación de material no deformado. El primer término de (1) es la deformación normal  $\epsilon_n$  de la familia de planos que difractan [6,7 y 8]. La normal "n" a dicha familia de planos está relacionada con la normal "N" de la superficie de medida mediante los ángulos no coplanarios  $\phi$  y  $\psi$  respecto a un sistema de referencia elegido arbitrariamente.

Las deformaciones normales  $\epsilon_n$  son microscópicas pues afectan a determinadas familias de planos cuya posición es favorable para la difracción. Su promedio sobre un volumen más amplio de material, del tamaño de decenas de

granos, permite obtener las deformaciones de tipo macroscópico ( $\epsilon_{\phi\psi}$ ) para las direcciones estudiadas  $\phi$  y  $\psi$ . La teoría de medios continuos permite obtener la tensión macroscópica en el punto de medida a partir de la correspondiente deformación [6,7 y 8]. Las hipótesis realizadas sobre el material son:

- A nivel macroscópico, material continuo y homogéneo.
- Estado homogéneo de deformaciones y tensiones.
- Comportamiento elástico y lineal.
- Tamaño de grano suficientemente pequeño y de orientación aleatoria para considerar al material como un medio isótropo.

Así, para cada dirección  $\phi$ , la tensión  $\sigma_{\phi}$  se obtiene a partir de la medida de deformaciones  $\epsilon_{\phi\psi}$  para los sucesivos valores de  $\psi$  mediante el procedimiento de exposición múltiple y la denominada "ley del  $\text{sen}^2\psi$ " [6]:

$$\epsilon_{\phi\psi} = \sigma_{\phi} \text{sen}^2\psi + \omega/E (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2)$$

para materiales sin textura microscópica sometidos a estados de tensión plana. En (2)  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  son las componentes principales del tensor biaxial de tensiones,  $\omega$  y E son valores característicos del material. La pendiente de la recta (2) aporta el valor de  $\sigma_{\phi}$  y su coeficiente de correlación el error  $\Delta\sigma_{\phi}$ . El incumplimiento de cualquiera de las hipótesis establecidas origina la pérdida de linealidad entre los puntos experimentales y la expresión teórica (2), aumentando el valor de  $\Delta\sigma_{\phi}$ .

Para una dirección determinada por  $\phi$  y  $\psi$ , la deformación está interrelacionada con el desplazamiento (1) y con el ensanchamiento del pico difractado por un volumen de tamaño característico en el material. En la escala macroscópica la deformación  $\epsilon_{\phi\psi}$  se considera uniforme causando solamente un desplazamiento del pico de difracción ( $\Delta 2\theta$ ). En la escala microscópica la deformación se considera no uniforme originando un ensanchamiento del pico de difracción a mitad de altura ( $\Delta b$ ). La deformación producida en un material produce ambos efectos [7]. Estudiar la evolución de  $\Delta b$  con la deformación macroscópica determina cualitativa y cuantitativamente el nivel de microdeformación plástica.

La puesta en práctica de esta técnica pasa por la elección adecuada del sistema de colimación a interponer entre el elemento generador de rayos X y el punto de medida y entre éste y el elemento de detección. La colimación de rayos X selecciona su dirección, concentrando el haz emitido hacia el punto de medida y el haz difractado hacia el detector. Existen dos sistemas para realizar estas funciones. La colimación mediante haces focalizados limita el ángulo de dispersión de rayos X disminuyendo su tamaño (haces circulares en torno a  $\phi=1\text{mm}$ ) requiere una gran precisión en el posicionamiento relativo entre los elementos de generación y detección y el punto de medida (en torno a décimas de mm para divergencias inferiores a  $1^\circ$  [6]). La colimación mediante haces paralelos guiados por las fuentes de Soller permite irradiar con haces mucho más

amplios los puntos de medida (en torno a decenas de  $\text{mm}^2$ ). Las fuentes de Soller se componen de un elevado número de láminas paralelas que limitan el ángulo de dispersión a  $0.349$  y  $19$  [6]. Este sistema permite errores de posicionamiento relativo de hasta  $\pm 2$  mm y es mucho menos crítico que el anterior.

### 3. PROCEDIMIENTO OPERATIVO

#### 3.1 Material y probeta utilizada

La muestra utilizada es un perno roscado M30 (ISO) de 16 mm de longitud, extraído de otro de longitud muy superior. El perfil de rosca se conforma por laminación (presumiblemente en caliente dado su tamaño). Posteriormente se somete a un proceso de temple y revenido. Las cotas más representativas se han medido en un proyector de perfiles NIKON con óptica de 20 aumentos (Fig. 1a).

Debido al tamaño de la muestra, su seccionado para extraer probetas de ensayos de tracción originaría perturbaciones en las tensiones residuales de los fondos de rosca. Por ello, la caracterización mecánica del material se ha realizado mediante un ensayo de microdureza con una carga de indentación de 1 Kg sobre una punta Vickers. La dureza es muy alta (583 HV).

La estructura del material se ha obtenido sobre una de las secciones planas del tornillo cuyo acabado metalográfico fué atacado con Villela durante 6 min. La Fig. 2 muestra la micrografía obtenida en un microscopio óptico NIKON. Su aspecto es el de un acero inoxidable martensítico. Se observan gran cantidad de juntas de macla, presumiblemente originadas por el proceso de temple, las poligonales de los granos austeníticos primitivos y zonas blancas de austenita retenida.

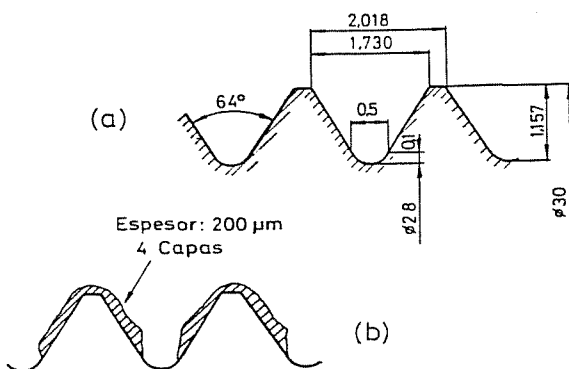


Fig. 1. Cotas geométricas (a) y recubrimiento del tornillo (b).

#### 3.2 Preparación de la muestra

La doble curvatura de los fondos de rosca hace que esta superficie alabeada alcance una anchura constante de  $500 \mu\text{m}$  y una altura de  $100 \mu\text{m}$  (Fig. 1a). En esta superficie alabeada se desean medir las tensiones residuales y es preciso aislarla de las superficies de flancos

y crestas cuya difracción de rayos X no interesa. Estos objetivos se alcanzan eligiendo un material para recubrimiento de flancos y crestas que absorba adecuadamente la radiación y que permita una colocación cómoda.

De los múltiples materiales de recubrimiento ensayados, se elige una pintura elastomérica comercializada por CIBA-GEIGY que se usa para el curado del hormigón. Se aplica mínimamente diluida para aumentar su relación adherencia/cohesión y su viscosidad. El espesor mínimo de pintura que absorbe la radiación es de  $150 \mu\text{m}$  aunque el espesor medio utilizado en este trabajo ha superado las  $200 \mu\text{m}$  (Fig. 1b).

Se ha desarrollado un procedimiento original para la colocación del recubrimiento:

- Se limpia y desengrasa la muestra y un alambre calibrado de  $\phi 485 \mu\text{m}$ .
- Se enrolla y fija el alambre sobre el fondo de rosca.
- Se calienta el conjunto con aire caliente a  $45^\circ\text{C}$  durante 5 min. para favorecer el secado rápido de la primera película de pintura que contacta con el material, para elevar, aún más, su relación adherencia/cohesión.
- Se pinta el tornillo, retirando cuidadosamente el alambre antes del secado completo de la pintura.
- Se completa el secado con aire caliente, se mide el espesor de pintura y se comprueba su uniformidad con un proyector de perfiles. Este proceso se repite desde b) hasta alcanzar el espesor adecuado del recubrimiento (Fig. 1b).

Finalmente se realizan una serie de marcas indelebles sobre las superficies planas del tornillo que identifican a las generatrices más adecuadas para la medida de tensiones residuales (Fig. 3).

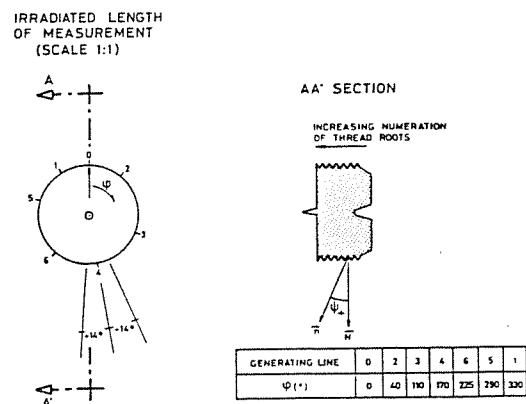


Fig. 3. Generatrices de medida.

#### 3.3 Optimización de las condiciones de medida

Para la medida de tensiones residuales se ha utilizado un equipo automático RIGAKU-Strainflex. Dada la geometría del fondo de rosca se ha utilizado un sistema colimador de haces paralelos mediante sendas fuentes de Soller con ángulo de dispersión de  $19$  interpuestas entre el emisor y la pieza y entre

ésta y el detector de rayos X. La ventana utilizada para la salida de rayos X es de  $4 \times 8 \text{ mm}^2$  proporcionando una superficie enfocada, perpendicular a la dirección incidente de rayos X, de  $7 \times 10 \text{ mm}^2$ . El error máximo de posicionamiento puede alcanzar  $\pm 2 \text{ mm}$ . Dicho tamaño de radiación focalizada permite la medida simultánea de tensiones residuales sobre cuatro fondos de rosca consecutivos.

La medida de tensiones residuales en dirección circunferencial ( $\psi=00$ ) se obtiene utilizando el procedimiento ordinario de posicionamiento y cálculo ISO-INCLINATION-PSF con montaje goniométrico  $\Omega$ . Las tensiones residuales en dirección axial ( $\psi=zz$ ) presentan, para su medida, problemas de interferencias entre los haces de rayos X emitidos y difractados con las condiciones de contorno impuestas por el recubrimiento de los flancos del tornillo. Por ello se limitan a 7 los ángulos  $\psi$ . En esta dirección de medida se utiliza el procedimiento SIDE-INCLINATION-MSF de posicionamiento y cálculo con montaje goniométrico  $\psi$ .

Las condiciones de medida utilizadas han sido:

- Radiación K $\alpha$  del Cromo de longitud de onda  $\lambda_{CrK\alpha}=2.291$  Angstroms y filtro de Vanadio.
- Tensión emisión: 30 kV. Intensidad: 10 mA.
- Máxima penetración en el material: 16  $\mu\text{m}$ .
- Familia de planos que difractan: (2,1,1). Fase  $\alpha$  del acero (martensita-BCC). Pico teórico de difracción:  $2\theta_{\alpha}=156^{\circ}$ .
- Superficie de medida:  $0.5 \times 7 \times t$  ("t": nº de fondos de rosca irradiados simultáneamente).
- En dirección  $00$ :  $\psi_{\alpha}=0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40$  y  $45^{\circ}$  (positivos y negativos).
- En dirección  $zz$ :  $\psi=0, 5, 10, 15, 20, 25$  y  $30^{\circ}$  (positivos excepto en las medidas sobre la generatriz nº 0 en la que también se eligen los valores negativos).

Se comprueba la linealidad (2) y se verifica la ausencia de triaxialidad, gradientes elevados de tensiones y tamaño grueso de grano. Se observa sólo una ligera textura en dirección axial para determinadas generatrices ( $\Delta\langle\Delta\sigma\rangle$ ).

#### 4. RESULTADOS

Una vez comprobada la bondad del método de cálculo se realizan medidas sobre las 7 generatrices estudiadas. El nivel de microplastificación es muy elevado como refleja el valor de  $\Delta b$ . Los resultados se muestran en la tabla I. En dirección circunferencial se observan fuertes compresiones con un grado de microplastificación superior al existente en dirección axial. Las tensiones residuales axiales muestran fuertes tracciones a lo largo de generatrices enfrentadas y tracciones medias en sendas generatrices enfrentadas perpendiculares a las anteriores (Fig. 4). Existe independencia entre la cantidad de fondos de rosca irradiados simultáneamente y la magnitud de tensiones residuales medidas.

Sin embargo el signo medido de  $\sigma_{zz}$  (tracción) se contradice con el signo calculado por Vassilaros [3] (compresión). Por esta razón se contrasta el signo de las tensiones residuales

TABLA I. Resultados experimentales.

Gen.	F.ros.	Dir.	$\sigma$ (*) (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta b$ ( $\mu$ )
0	2 a 5	$00(\psi+)$	-490	$\pm 18$	4.063
		$00(\psi-)$	-594	$\pm 27$	4.080
	2 a 5	$zz(\psi+)$	+218	$\pm 32$	4.000
		$zz(\psi-)$	+253	$\pm 34$	3.833
	3	$zz(\psi+)$	+215	$\pm 112$	3.768
2	2,3,4	$zz$	+308	$\pm 116$	3.843
		$zz$	+272	$\pm 113$	3.724
	3	$zz$	+298	$\pm 174$	3.620
3	4,5	$zz$	+795	$\pm 134$	3.713
		$zz$	+740	$\pm 138$	3.450
4	3,4,5	$zz$	+476	$\pm 42$	3.664
		$zz$	+420	$\pm 86$	3.864
	4	$zz$	+401	$\pm 116$	3.586
6	5	$zz$	+740	(**)	3.675
5	1,2	$zz$	+416	$\pm 72$	4.063
		$zz$	+382	(**)	3.649
1	3,4,5	$zz$	+346	$\pm 123$	3.866
		$zz$	+455	$\pm 98$	3.764
	4	$zz$	+308	$\pm 136$	3.789

\* +: tracciones, -: compresiones.

\*\* Se producen interferencias para  $\psi_{\alpha}(+)=30^{\circ}$ , debiéndose realizar manualmente el proceso de cálculo.

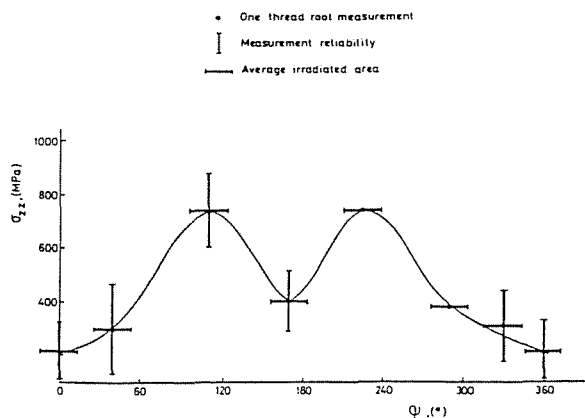


Fig. 4. Evolución de  $\sigma_{zz}$  a lo largo de las generatrices.

medidas por difracción de rayos X. Para ello se miden las tensiones en los fondos de rosca situados en determinadas generatrices antes y después de la aplicación de una carga axial de compresión en una máquina universal de ensayos mecánicos. Si las tensiones iniciales fueran de compresión, éstas deberían aumentar tras la aplicación de la carga, y si fueran de tracción, deberían disminuir. Se diseña un dispositivo especial de transmisión

de carga que intercala sendas pastillas de neopreno expandido que, a modo de rótula, aseguran el centrado de la carga (Fig. 5). El acoplamiento con la máquina de ensayos mecánicos durante la medida simultánea de las tensiones por rayos X se muestra en las Fig. 6 y 7. La tabla II muestra los resultados obtenidos que validan la magnitud y signo de las tensiones residuales medidas previamente. Se observa un aumento de microplastificación con la carga aplicada. Durante el ensayo de contrastación no pudo aumentarse más la carga debido a las limitaciones de capacidad de los dispositivos de transmisión. Pese a ello, se demuestra que las tensiones residuales medidas son reproducibles y de tracción (positivas).

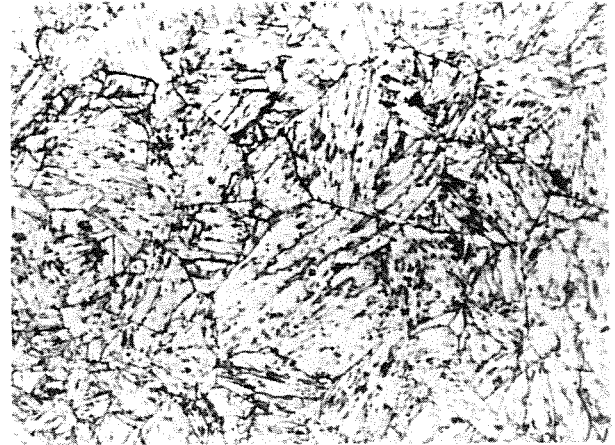


Fig. 2. Micrografía a 700 aumentos.

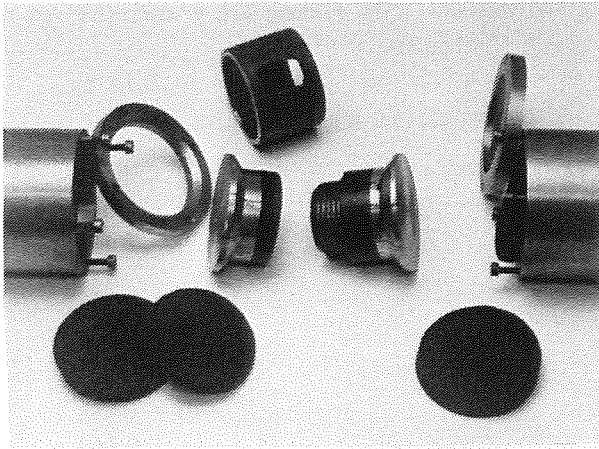


Fig. 5. Dispositivo centrador de carga.

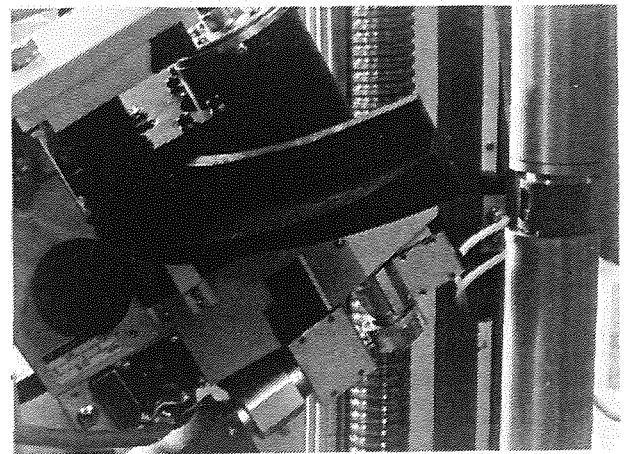


Fig. 7. Detalle del montaje experimental.

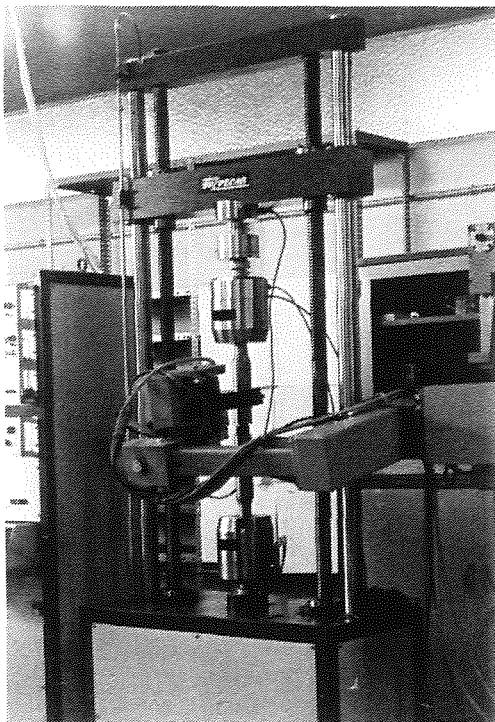


Fig. 6. Montaje experimental.

TABLA II. Resultados de contrastación.

Gen.	F.apl. (Kg)	$\sigma_{ap}$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\Delta\sigma_x$ (MPa)	$\Delta b$ ( $\varnothing$ )
0	0	0	+396	$\pm 28$	3.734
	-4000	-65	+370	$\pm 62$	3.817
	0	0	+410	$\pm 66$	3.787
2	0	0	+450	$\pm 71$	3.803
	-4000	-65	+400	$\pm 73$	3.945
4	0	0	+511	$\pm 100$	3.785
	-6400	-104	+404	$\pm 54$	4.030

5. APLICACION AL CALCULO NUMERICO DEL FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES (FIT).

Partiendo de las tensiones residuales medidas en el tornillo no fisurado, se calcula numéricamente el factor de intensidad de tensiones en el tornillo fisurado, para cuantificar su influencia respecto a la Mecánica de Fractura.

Asumiendo un material elástico-lineal, puede aplicarse el principio de superposición. En un sólido no fisurado, sometido a una distribución general de tensiones, el FIT es cero (Fig. 8a). Tal cuerpo es equivalente a otro fisurado en el que la acción del material se sustituye por una distribución de tensiones externas aplicadas sobre los labios de la fisura, opuesta a la anterior (Fig. 8b). En este caso el FIT también es cero. La descarga de los labios de fisura del cuerpo (b) es equivalente a añadir un tercer cuerpo (c) con una distribución de tensiones opuesta a la del cuerpo (b) que coincide precisamente -incluido el signo- con la distribución inicial de tensiones residuales. La superposición de (b) y (c) conduce a (d), objetivo del análisis: un cuerpo fisurado y descargado, con la fisura abierta por las tensiones residuales. Por ser  $K^{(b)}=0$ , resulta  $K^{(c)}=K^{(a)}$ . Por consiguiente, el FIT del cuerpo descargado y con la fisura abierta debido a las tensiones residuales se computa mediante un cuerpo fisurado y sometido, en los labios de fisura, a la distribución de tensiones residuales que existía en el fondo de rosca del sólido no fisurado.

Se han modelizado dos fisuras superficiales (Fig. 9a):

- Semiéptica:  $a/b = 0.2$
- Semicircular:  $a/b = 1$

La condición de carga es la máxima tensión residual medida en la superficie del fondo de rosca ( $\sigma_{res,1} = +800$  MPa) y en profundidad  $-x$  se ha adoptado una distribución triangular de tensiones, de acuerdo con la experiencia de los autores con alambres trefilados [7], con una profundidad máxima de 100 a 200  $\mu\text{m}$  (Fig. 9b). La magnitud  $\sigma_{res,2}$  se obtiene por consideraciones de equilibrio y es inferior al 3% de  $\sigma_{res,1}$  por lo que se ha despreciado en el cálculo. La distribución triangular de tensiones se ha introducido en los cálculos mediante cargas nodales aplicadas en la parte externa de los labios de la fisura, manteniendo constante la carga por unidad de longitud.

Los resultados del cálculo (tabla III), muestran el factor de corrección (Y) para las dos formas de fisura, tres profundidades y

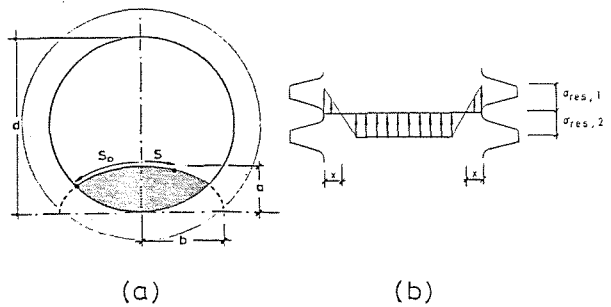


Fig. 9. Geometría de fisura (a) y distribución interna de cargas (b).

TABLA III. Resultados del cálculo.

a/b	a/d	s/s <sub>o</sub>	Y	
0.2	0.1	0	0.046	
		1/3	0.042	
		2/3	0.044	
	0.3	0	0.056	
		1/3	0.028	
		2/3	0.030	
	0.5	0	0.022	
		1/3	0.006	
		2/3	0.008	
1	0.1	0	0.006	
		1/3	0.013	
		2/3	0.027	
	0.3	0	0.008	
		1/3	0.014	
		2/3	0.035	
	0.5	0	0.004	
		1/3	0.009	
		2/3	0.018	
			1	0.035

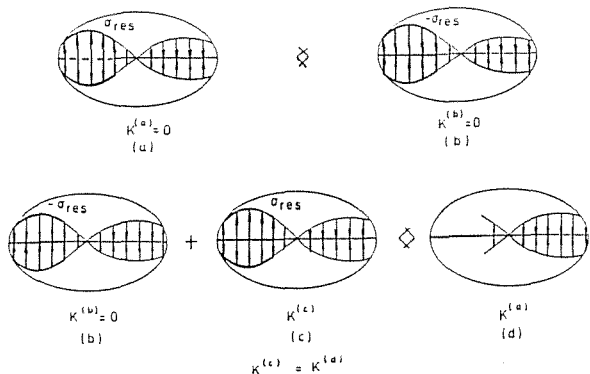


Fig. 8. Principio de superposición.

cuatro puntos a lo largo del borde de la misma. El factor de corrección corresponde a la tensión residual  $\sigma_{res,1}$ :

$$K_I = Y \cdot \sigma_{res,1} \cdot (\pi a)^{1/2} \quad (3)$$

Los resultados muestran que:

- Los FIT causados por las tensiones residuales son muy bajos, claramente inferiores a los producidos por una tracción uniforme semejante aplicada sobre la base del tornillo [10,11].

- El FIT aumenta próximo a la superficie. Así, el principal efecto de las tensiones residuales de tracción es la tendencia a aumentar la excentricidad de la fisura.

- La influencia de las tensiones residuales en la propagación de fisuras por fatiga es despreciable, pues no incrementan el rango de variación del FIT ( $\Delta K$ ). Este efecto se limita a un pequeño incremento de la relación de tensiones ( $R$ ), que tiene una influencia mínima en la propagación de fisuras por fatiga.

- Las tensiones residuales influirían más en la iniciación de fisuras por fatiga (100 ó 200  $\mu\text{m}$ ) pero, en este caso, la aproximación elástico-lineal no sería válida y necesitaría un amplio desarrollo futuro en este campo.

## 6. CONCLUSIONES

1) Por primera vez se han medido las tensiones residuales en el fondo de una rosca utilizando la difracción de rayos X. Las tensiones son de compresión en dirección circunferencial y de tracción en dirección axial.

2) El método empleado es válido para la dirección circunferencial. En dirección axial aparece un ligerísimo efecto de textura, no verificándose con total exactitud la "ley del  $\text{sen}^2\psi$ ". No obstante la precisión obtenida es buena por la repetitibilidad de los resultados sobre los distintos fondos de rosca en una misma generatriz.

3) La forma peculiar de la curva de las tensiones residuales axiales a lo largo de las distintas generatrices es consecuencia de la simetría del proceso de laminación del tornillo.

4) La anchura del pico de difracción indica que el material está fuertemente microplastificado. Las generatrices con mayores tensiones residuales de tracción son aquellas en las que la microplastificación es más reducida.

5) Los factores de intensidad de tensiones debidos a las tensiones residuales son muy bajos, incrementándose cerca de la superficie. Su influencia en propagación de fisuras por fatiga es despreciable; no así en iniciación, pero en este caso la aproximación elástico-lineal no es válida.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Kudriautsev, I.V. y Timonin, V.M., (1975), "Fatigue strength of large threaded joints in nonsymmetrical bending", Strength of Materials and Structures, Kiev, Izdatelstvo Naukova Dumka. NASA.
- [2] Koutski, I.A., Pokorny, R. y Vanecek, V., (1980), "Low-alloy steels for bolts", Metal Science and Heat Treatment, Vol. 21, nº 11-12, pp. 896-900. NASA.

- [3] Vassilaros, M.G., (1980), "Analysis of residual stresses resulting from cold rolling of notches and their effect on fatigue behavior", Naval Ship Research and Development Center, Bethesda, Md. Ship Materials Engineering Dept.. NASA.
- [4] Freidin, E.I., (1980), "Residual stresses in bolt threads", Vestn. Mashinostr., Vol. 11, pp.34-34. METADEX.
- [5] Freidin, E.I., Ivanov, S.I., Krasota, V.K., Shatunov, M.P. y Trofinov, N.G., (1983), "Residual stresses and fatigue resistance of threaded connections", Problemy Prochnosti, Vol. 12, pp. 22-23. METADEX.
- [6] Castex, L. et al., (1981), "Determination des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X", ENSAM, Publications Scientifiques et Techniques, Vol. 22. Paris.
- [7] Campos, J.M. y Elices, M., (1987), "Tensiones residuales internas en alambres trefilados", Anales de Mecánica de la Fractura, Vol. 4.
- [8] Maeder, G., (1986), Ann. Chim. Fr., Vol. 11, pp. 159-175.
- [9] Maeder, G. (1986) Chemica Scripta, Vol. 26A, pp. 23-31.
- [10] Sánchez-Gálvez, V., Astiz, M.A., Toribio, J., Campos, J.M. (1988). "Stress intensity factors in cracked bolts". European Space Agency Report.
- [11] Toribio, J., Sánchez-Gálvez, V., Astiz, M.A., Campos, J.M. (1989). "Factor de intensidad de tensiones en un tornillo fisurado sometido a tracción y flexión". VI Encuentro del Grupo Español de Fractura. Sevilla (España).