

## TOLERANCIA AL DAÑO DE TUBERIAS DE HORMIGON PRETENSADO CON PERDIDA PARCIAL DE LA ARMADURA CIRCUNFERENCIAL

A. Valiente

Departamento de Ciencia de Materiales  
E.T.S. de Ingenieros de Caminos. Universidad Politécnica de Madrid

**Resumen.** En este trabajo se presenta un modelo teórico para evaluar la tolerancia al daño de una tubería de hormigón pretensado cuya armadura circunferencial sufre daños que la hacen inoperante en un tramo de la tubería. La tolerancia al daño se evalúa mediante el cociente de las presiones que resiste la tubería con y sin daño. El modelo permite predecir este cociente en función de la extensión del daño, medida en términos de la longitud de tubería sin pretensado circunferencial y en términos del número de espiras de la armadura circunferencial no operativas. La influencia de las variables de diseño y de las propiedades de los materiales en la tolerancia al daño es analizada mediante el modelo.

**Abstract.** A theoretical model is formulated to evaluate the damage tolerance of a prestressed concrete pipe whose circumferential prestressing vanishes on a length of the pipe due to damage consisting of local failures of the prestressing wire. The model predicts the failure pressure of the damaged pipe as a function of the number of inoperative coils. The ratio of this failure pressure to that of the undamaged pipe is used as the damage tolerance of the pipe. The influence of the design variables and the properties of the materials on damage tolerance is analyzed on the basis of the model.

### 1 INTRODUCCION

El diseño de elementos estructurales tolerantes al daño ha dejado de ser una atractiva idea con ámbito de aplicación muy alejado de la ingeniería civil para convertirse en un concepto de gran utilidad que va siendo gradualmente introducido en los códigos de proyecto estructural empleados en la construcción. Los criterios de seguridad son cada vez más amplios y obligan a contemplar hipótesis de carga extremas y poco probables, si no para que la estructura las resista indemne, sí para que sufra daños de consecuencias controladas. El planteamiento más usual de los códigos es establecer los límites de carga que permitan no sobrepasar la tolerancia al daño del elemento estructural para una tipología y extensión del daño postulados en función de las características, condiciones de servicio y responsabilidad del elemento. Una muestra reciente de esta tendencia son las limitaciones de espesor que establece el Eurocódigo 3 en función de la carga para los aceros de construcción [1]. Por razones de tolerancia al daño, el espesor del acero no puede superar un valor máximo dependiente de la temperatura y de la velocidad de deformación, aún cuando las tensiones que soporta sean perfectamente admisibles según los criterios de diseño clásicos.

La aplicación de criterios de diseño basados en la toleran-

cia al daño requiere disponer de modelos teóricos que permitan determinar el efecto del daño sobre la resistencia mecánica del elemento estructural. La Mecánica de Fractura Elástico-lineal y la Mecánica de Fractura Elastoplástica aportan instrumentos teóricos adecuados para abordar el problema cuando el daño es asimilable a una fisura de la cual depende la integridad global del elemento [2, 3], pero si el daño consiste en que una parte del elemento no asimilable a una fisura pierda su resistencia mecánica, las soluciones que proporciona la Mecánica de Fractura son limitadas.

Los elementos estructurales de hormigón pretensado son propicios a este tipo de daño por tratarse de elementos compuestos donde los excedentes de resistencia mecánica de un material se utilizan para compensar las carencias de resistencia o de rigidez de otro, combinando los dos materiales en un mismo elemento estructural con óptimo aprovechamiento de ambos. Esta forma de funcionamiento se consigue introduciendo en el elemento acciones internas de pretensado o postesado que se superponen a las acciones externas y producen un estado final de tensiones y deformaciones con las características deseadas. Por ello, el fallo de uno de los componentes reduce la capacidad resistente del elemento pero no la anula. En principio, el hormigón pretensado es un material tolerante al daño, cuya capacidad resistente en presencia de daño sería deseable

poder predecir, pero no se ha desarrollado una metodología teórica para determinarla.

En este trabajo se presenta un método para determinar la capacidad resistente de una tubería de hormigón pretensado parte de cuya armadura circunferencial falla y deja de ejercer la acción de pretensado. Las tuberías de hormigón pretensado se utilizan como alternativa a las de acero para conducciones forzadas de abastecimiento de agua. En este tipo de aplicaciones las tuberías suelen estar enterradas y el hormigón pretensado está expuesto a la acción de ambientes agresivos difícilmente controlables. El acero de pretensar es sensible al fenómeno de corrosión bajo tensión, el cual puede producirse si la barrera que aísla a las armaduras se rompe localmente y acceden a ellas medios agresivos. En las tuberías de hormigón pretensado la armadura circunferencial es un alambre continuo y las fisuras que origina la corrosión bajo tensión acaban rompiéndolo por distintos puntos en cuyas inmediaciones el alambre se destensa (en la longitud requerida para que la adherencia con el hormigón equilibre la fuerza de tracción del alambre) y la acción de pretensado desaparece. La mayor o menor pérdida de capacidad resistente que experimenta la tubería con parte de su armadura circunferencial inoperante es la medida de su tolerancia a un tipo de daño que se produce con alguna frecuencia.

**2 CARACTERISTICAS DE LAS TUBERIAS DE HORMIGON PRETENSADO**

Los tubos de hormigón pretensado para conducciones forzadas alcanzan grandes diámetros y se fabrican en instalaciones con controles precisos siguiendo procedimientos de cálculo y diseño muy contrastados [4, 5]. Primeramente se hormigona y se cura al vapor el núcleo o capa interior del tubo. Luego el núcleo se pretensa longitudinalmente mediante alambres rectos embebidos en su interior a lo largo de lo que será la superficie media de la pared del tubo. El alambre del pretensado circunferencial se enrolla

tensado sobre la superficie exterior del núcleo, formando una hélice con las vueltas muy próximas. Después se deposita sobre el núcleo la capa exterior o recubrimiento hasta que la pared del tubo alcanza el espesor de proyecto. El alambre circunferencial queda también embebido dentro de la pared del tubo entre el núcleo y el recubrimiento, que representan su barrera de protección contra los agentes externos. La subsiguiente retracción y fluencia del núcleo hacen que la tensión del alambre circunferencial disminuya y que una parte de su acción de pretensado se transfiera al recubrimiento. Cuando este proceso concluye el tubo es sometido a una prueba de presión y queda listo para entrar en servicio. La figura 1 muestra la composición de un tubo de hormigón pretensado y las dimensiones más relevantes.

La aportación de la armadura circunferencial a la rigidez de un tubo de hormigón pretensado es mínima, porque, a pesar del alto módulo de elasticidad del acero en relación con el del hormigón, la espiral de alambre equivale a una capa de acero de décimas de milímetro frente a los centímetros de espesor del núcleo y del recubrimiento. Debido a ello, las cargas de servicio son absorbidas por el hormigón y apenas modifican la tensión de la armadura circunferencial. La misión de ésta es producir un estado interno de tensiones de compresión en el hormigón suficientemente intensas para evitar que se produzcan tensiones de tracción cuando se sumen las tensiones debidas a las cargas de servicio.

**3 MODELO TEORICO PARA EVALUACION DE LA TOLERANCIA AL DAÑO**

Indicador de tolerancia al daño. La condición límite de seguridad con que se proyectan las tuberías de hormigón pretensado es que el hormigón no entre en tracción. Esta condición límite se alcanza en la prueba de presión a que la tubería es sometida una vez puesta en obra, con las restantes cargas de servicio actuando sobre ella. La presión de

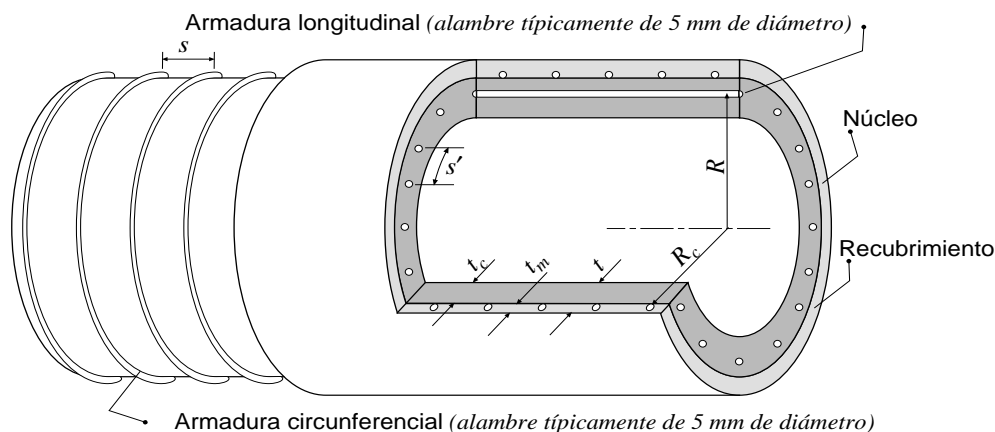


Fig. 1. Tubería de hormigón pretensado.

prueba señala el límite de carga aplicable a la tubería y por tanto constituye un excelente indicador cuantitativo de la tolerancia al daño. En consecuencia, la magnitud adoptada para evaluar la tolerancia al daño de una tubería de hormigón pretensado con parte del pretensado circunferencial no operativo es el cociente  $p/P$  entre las presiones que la tubería puede soportar sin que el hormigón entre en tracción estando dañado dicho pretensado circunferencial y estando indemne. La longitud  $Z$  de tubería sin pretensado circunferencial es la variable que mide la extensión del daño.

Tensiones en la tubería. Para imponer la condición de tensión nula en el hormigón es necesario determinar el campo de tensiones en la tubería. Se supondrá que el núcleo, el recubrimiento y el alambre de pretensar son materiales hookeanos, los dos primeros con módulo de elasticidad  $E_c$  y coeficiente de Poisson  $\nu$ , y el último con módulo de elasticidad  $E_s$ . Consecuentemente, se puede aplicar el principio de superposición y obtener cualquier tensión como suma de las producidas por la presión, las restantes cargas de servicio y la pérdida de la fuerza de pretensado circunferencial en una longitud  $2Z$  de tubo. Por lo que al hormigón se refiere, la tensión máxima es la tensión circunferencial en la cara externa del núcleo y dado que bajo la presión  $P$  y en ausencia de daño sería nula, las contribuciones debidas a  $P$ ,  $\sigma_c^P$ , y a las cargas restantes,  $\sigma_c^0$ , verifican:

$$0 = \sigma_c^0 + \sigma_c^P \quad (1)$$

Cuando la extensión del daño es  $Z$ , a las contribuciones  $\sigma_c^P$  de la presión y  $\sigma_c^0$  del resto de las cargas en ausencia de daño debe añadirse la del daño  $\sigma_c^Z$ , de manera que la presión  $p$  para la cual la tensión máxima en el hormigón se anula es la que satisface la igualdad:

$$0 = \sigma_c^0 + \sigma_c^P + \sigma_c^Z \quad (2)$$

Eliminando  $\sigma_c^0$  entre las ecuaciones (1) y (2) resulta:

$$\sigma_c^P = \sigma_c^P - \sigma_c^Z \quad (3)$$

La ecuación (3) relaciona las presiones  $P$  (carga límite de la tubería sin daño) y  $p$  (carga límite de la tubería dañada) con la extensión  $2Z$  del daño. Por tanto esta ecuación

permite determinar la tolerancia al daño  $p/P$  conociendo la tensión máxima en el hormigón debida a la presión y debida al daño. Los tipos de carga con solución de tensiones contemplados en los manuales son distribuciones de fuerzas uniformes a lo largo del tubo [6], entre las cuales la presión es el más simple por ser además una distribución axilsimétrica. La pérdida parcial del pretensado circunferencial es un caso de carga axilsimétrica no uniforme a lo largo del tubo cuya solución de tensiones no se encuentra en los manuales.

Tensiones producidas por la pérdida parcial del pretensado circunferencial. Las fuerzas de pretensado ejercidas por la armadura circunferencial completa equivalen a una presión aplicada en todo el tubo y dirigida hacia el interior de valor  $p_s$  dado por:

$$p_s = \frac{\sigma'_s A_s}{s R_c} \quad (4)$$

donde  $\sigma'_s$  es la tensión del alambre de pretensado,  $A_s$  su sección transversal,  $s$  la separación entre las espiras de la armadura y  $R_c$  el radio del núcleo (ver Fig 1). Consecuentemente, en virtud del principio de superposición, la inoperatividad de la armadura en un tramo de tubo de longitud  $2Z$  produce el mismo efecto que la presión  $p_s$  aplicada en dicho tramo pero dirigida hacia el exterior (Fig.2).

Las tensiones producidas por este tipo de carga no figuran en los manuales de cálculo de tuberías, pero pueden determinarse mediante la teoría para tubos homogéneos de pared delgada con carga axilsimétrica sucintamente descrita por Timoshenko en su tratado clásico de Resistencia de Materiales [7]. Esta teoría, cuyo resultado fundamental es que el campo de tensiones en el tubo se obtiene directamente de la elástica de una viga rectangular apoyada en balasto, ha sido reconstruida en la referencia [8] para tener en cuenta la presencia de las armaduras de acero y la imposibilidad de alargamiento longitudinal de la tubería por estar enterrada.

La elástica  $u = u^Z(z)$  a determinar es la de la viga representada en la Figura 3, de anchura unidad, altura el espesor  $t$  del tubo, módulo de elasticidad:

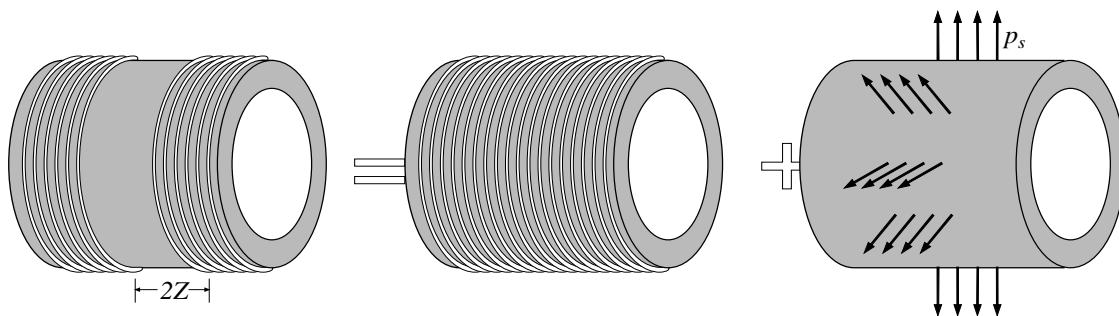


Fig 2. Carga producida por la inoperatividad del pretensado circunferencial en un tramo de tubo de longitud  $2Z$ .

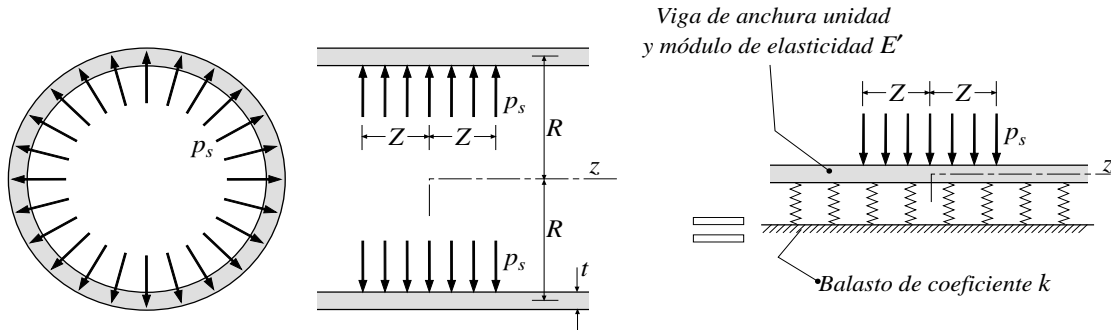


Fig 3. Viga cuya elástica proporciona las tensiones debidas a la pérdida parcial del pretensado circunferencial.

$$E' = \frac{E_c}{\sqrt{1-\nu^2}} \quad (5)$$

y coeficiente de balasto:

$$k = \begin{cases} \frac{E't}{R^2} & |z| \leq Z \\ \frac{E't}{R^2} \left[ 1 + \frac{E_s A_s}{E' s t} \right] & |z| \geq Z \end{cases} \quad k \cong \frac{E't}{R^2} \quad (6)$$

La simplificación adoptada en (6) se justifica por la reducida contribución de la armadura transversal al coeficiente de balasto en el tramo sin daño. Resolviendo la ecuación diferencial de la elástica con la condición de simetría respecto al plano  $z=0$  y de finitud de los desplazamientos se obtiene:

$$u^z = \frac{p_s R^2}{2E't} [2 - e^{\beta(|z|-Z)} \cos\beta(|z|-Z) - e^{-\beta(|z|+Z)} \cos\beta(|z|+Z)] \quad \text{para } |z| \leq Z \quad (7)$$

$$u^z = \frac{p_s R^2}{2E't} [e^{-\beta(|z|-Z)} \cos\beta(|z|-Z) - e^{-\beta(|z|+Z)} \cos\beta(|z|+Z)] \quad \text{para } |z| \geq Z \quad (8)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3k}{E't^3}} \cong \sqrt{\frac{\sqrt{3}}{Rt}} \quad (9)$$

El estado tensional en el hormigón es biaxial en las direcciones anular y longitudinal del tubo. Las tensiones co-respondientes  $\sigma_\theta^z$  y  $\sigma_z^z$  se deducen de  $u^z(z)$  mediante:

$$\begin{aligned} \sigma_\theta^z &= E' \left[ \frac{u^z}{R} - \nu(r-R) \frac{d^2 u^z}{dz^2} \right] \\ \sigma_z^z &= E' \left[ (r-R) \frac{d^2 u^z}{dz^2} - \nu \frac{u^z}{R} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

donde  $r$  es la distancia al eje del tubo. La tensión  $\sigma_s^z$  en el alambre de la armadura cicunferencial viene dada por:

$$\sigma_s^z = E_s \frac{u^z}{R} \quad (11)$$

Dentro de una sección transversal del tubo, la tensión máxima en el hormigón es la tensión anular  $\sigma_\theta^z$  de la cara externa del núcleo. De acuerdo con las ecuaciones (7), (8) y (10),  $\sigma_\theta^z$  es máxima en la sección central del tubo, ya que en esa sección la función  $u^z(z)$  es máxima y su derivada segunda es mínima. Por tanto, la máxima tensión en el hormigón  $\sigma_c^z$  debida a la pérdida parcial del pretensado circunferencial se obtiene sustituyendo la ecuación (7) en la primera de las ecuaciones (10) y particularizando el resultado para  $z=0$  y  $r=R_c = R + t_c - t/2$ :

$$\sigma_c^z = p_s \frac{R}{t} [1 - e^{-\beta Z} (\cos\beta Z - (2t_c - t)\nu R \beta^2 \sin\beta Z)] \quad (12)$$

Tensiones producidas por la presión en ausencia de daño. Las tensiones producidas por la presión con la armadura circunferencial completa también pueden deducirse a través de la elástica de una viga apoyada en balasto (Fig. 4).

La solución  $u^p(z)$  de la ecuación diferencial de la elástica es trivial en este caso:

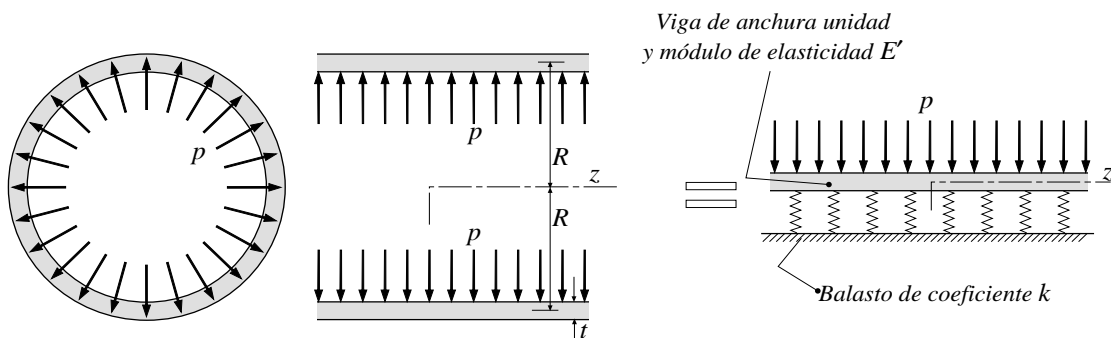


Fig 4. Viga cuya elástica proporciona las tensiones debidas a la presión en ausencia de daño.

$$u^p = \frac{p}{k} = \frac{pR^2}{E't} \quad (13)$$

y las tensiones que resultan tanto en el hormigón, ( $\sigma_\theta^p$  en dirección anular y  $\sigma_z^p$  en dirección longitudinal) como en la armadura circunferencial ( $\sigma_s^p$ ) son las tensiones uniformes de la solución elemental:

$$\sigma_\theta^p = E' \left[ \frac{u^p}{R} - \nu(r-R) \frac{d^2 u^p}{dz^2} \right] = \frac{pR}{t} \quad (14)$$

$$\sigma_z^p = E' \left[ (r-R) \frac{d^2 u^p}{dz^2} - \nu \frac{u^p}{R} \right] = -\nu \frac{pR}{t}$$

$$\sigma_s^p = E_s \frac{u^p}{R} = p \frac{E_s R}{E't} \quad (15)$$

La tensión máxima en el hormigón  $\sigma_c^p$  se produce en dirección anular y es uniforme en todo el tubo:

$$\sigma_c^p = \frac{pR}{t} \quad (16)$$

Evaluación de la tolerancia al daño. La ecuación (16) puede particularizarse para las presiones de prueba  $p$  y  $P$  de la ecuación (3). Sustituyendo en dicha ecuación los valores resultantes junto con el de  $\sigma_c^Z$  dado por la ecuación (12) y simplificando se obtiene la tolerancia al daño evaluada en términos del cociente  $p/P$  como función de la extensión  $Z$  del daño:

$$\frac{p}{P} = 1 - \frac{p_s}{P} [1 - e^{-\beta Z} (\cos \beta Z - (2t_c - t) \nu R \beta^2 \sin \beta Z)] \quad (17)$$

#### 4 ANALISIS DE RESULTADOS

De acuerdo con la ecuación (17), para un tubo de hormigón pretensado con la armadura circunferencial dañada e inoperativa en parte del tubo, la tolerancia al daño depende paramétricamente del dato de diseño  $p_s/P$  y de las constantes del tubo  $\beta$  y  $\lambda$ , esta última dada por:

$$\lambda = (2t_c - t) \nu R \beta^2 = (2t_c - t) \nu R \frac{\sqrt{3}}{Rt} = \nu \sqrt{3} \left( 2 \frac{t_c}{t} - 1 \right) \quad (18)$$

En la práctica el valor del cociente  $p_s/P$  es siempre muy próximo a la unidad porque la presión  $p_s$  del pretensado se establece con la condición de que para la presión límite el hormigón se descomprima sin entrar en tracción, y dado que el resto de las cargas de servicio apenas contribuyen a descomprimir el hormigón, la condición se verifica si las presiones  $p_s$  y  $P$  se anulan mutuamente. El parámetro  $\lambda$  depende del coeficiente de Poisson  $\nu$  del hormigón (del orden de 0,3) y del cociente  $t_c/t$  entre los espesores del núcleo y del tubo, que difieren en el espesor del revestimiento. La función protectora de éste obliga a fijar un espesor mínimo, y como también el espesor del núcleo debe superar un valor mínimo, en la práctica  $\lambda$  oscila entre 0,25 y 0,5. Para  $p_s/P = 1$  la tolerancia al daño dada por la ecuación (17) es:

$$\frac{p}{P} = e^{-\beta Z} (\cos \beta Z - \lambda \sin \beta Z) \quad (19)$$

En la Figura 5 se ha representado esta función para los intervalos de valores prácticos del parámetro  $\lambda$ .

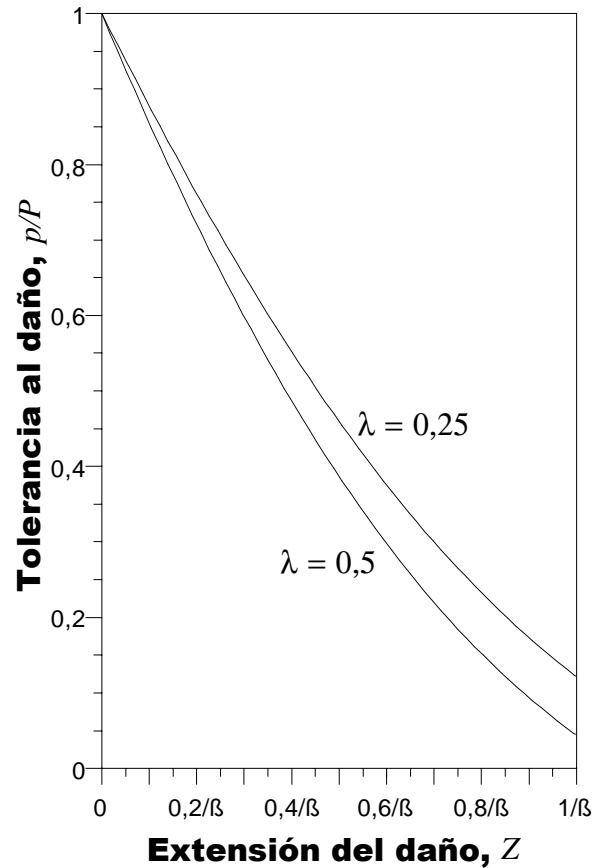


Fig. 5. Tolerancia al daño de una tubería de hormigón pretensado con parte de la armadura circunferencial dañada.

La medida de la extensión del daño en términos de la longitud de tubería sin pretensado circunferencial es poco expresiva para analizar la influencia de las variables de diseño de la tubería sobre su tolerancia al daño. En particular, la comparación de tuberías por su tolerancia al daño debe limitarse a las que permitan satisfacer iguales condiciones de servicio. Una medida más indicativa de la extensión del daño es el número  $N$  de espiras del alambre circunferencial no operativas. La relación entre  $N$  y la semilongitud  $Z$  de tubería sin pretensado circunferencial viene dada trivialmente por el espaciamiento  $s$  entre las espiras; introduciendo además el valor de  $\beta$  dado por (9), se tiene:

$$N = \frac{2Z}{s} = \frac{2}{3^{1/4}} Z \beta \frac{\sqrt{Rt}}{s} \quad (19)$$

De acuerdo con la ecuación (17), para un valor dado del parámetro  $\lambda$  la tolerancia al daño  $p/P$  es una función biunívoca de  $\beta Z$ , y por tanto el máximo número de espiras inoperantes que aseguran un nivel dado de tolerancia al daño es proporcional al cociente adimensional  $\sqrt{Rt}/s$ . Cuan-

to mayor sea dicho cociente, mayor es la tolerancia al daño. Así lo confirma la figura 6, que muestra la tolerancia al daño en función del número de espiras dañadas para dos valores de dicho cociente.

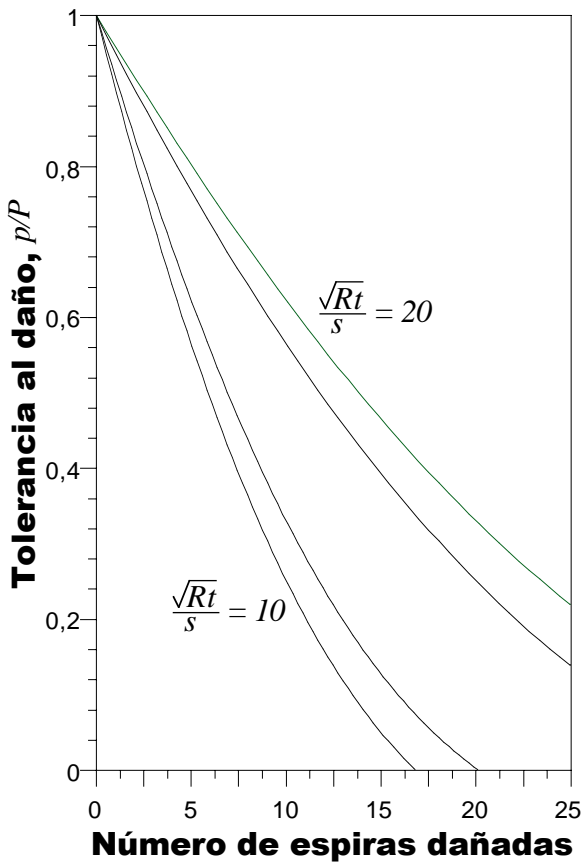


Fig.6. Tolerancia al daño de una tubería de hormigón pretensado con parte de la armadura circunferencial dañada.

La comparación de tuberías por su tolerancia al daño debe hacerse pues a través del cociente  $\sqrt{Rt}/s$ . Las condiciones de servicio que se fijan como prerequisites de proyecto son básicamente la presión límite  $P$  y el radio  $R$ , una de las tres variables que determinan el valor de  $\sqrt{Rt}/s$ . Las otras dos,  $s$  y  $t$ , están condicionadas por  $P$  al ser esta presión, en primera aproximación, la presión  $p_s$  del pretensado circunferencial. El valor de  $s$  debe ser tal que la tensión  $\sigma'_s$  del alambre deducida de la ecuación (4) sea admisible. Asimismo, el espesor de hormigón debe ser suficiente para admitir la máxima tensión de compresión  $\sigma'_c$  que se produce en este material, lo cual ocurre cuando la tubería está despresurizada. De nuevo en primera aproximación, dicha tensión estaría producida por la presión de pretensado  $p_s$ , y aplicando la ecuación (16) resulta:

$$\sigma'_c = \frac{p_s R}{t} \quad (20)$$

Las igualdades (4) y (20) permiten eliminar  $s$  y  $t$  del cociente  $\sqrt{Rt}/s$ ; si se prescinde además de la diferencia entre los radios de la tubería y del núcleo, resulta:

$$\frac{\sqrt{Rt}}{s} = \sqrt{R} \sqrt{\frac{p_s R}{\sigma'_c} \frac{p_s R_c}{\sigma'_s A_s}} \cong \frac{R^2}{A_s} \frac{P^{1.5}}{\sigma'_s \sqrt{\sigma'_c}} \quad (21)$$

Se concluye que el uso de alambre de pretensado de mayor sección y el aceros y hormigones de mayor resistencia perjudica la tolerancia al daño de la tubería.

### 5 CONCLUSIONES

El modelo teórico formulado para evaluar la tolerancia al daño de tuberías de hormigón pretensado con pérdida parcial de la armadura circunferencial permite predecir la capacidad resistente de la tubería en función del número de espiras no operativas. La influencia de la resistencia de los materiales en la tolerancia al daño es puesta de manifiesto por el modelo y confirma el principio general de que las altas resistencias perjudican la tolerancia al daño.

### 6 REFERENCIAS

- [1] Comité Europeo de Normalización (CEN), 'European Prestandard ENV 1993-1-1/A1: Eurocode 3: Design of Steel Structures', Comité Europeo de Normalización, Bruselas (1994).
- [2] Elices, M. "Mecánica de la Fractura Elástico-lineal" Publicaciones de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid, Madrid (2001).
- [3] Elices, M., Guinea, G. y Valiente A. "Mecánica de la Fractura Elastoplástica" Publicaciones de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid, Madrid (1998).
- [4] Turazza, G. "Tuyaux de grand diamètre en béton armé et précontraint", Dunod, París (1962).
- [5] Stephenson, D. "Pipeline Design for Water Engineers" Elsevier Scientific Publishing Company, Oxford (1976).
- [6] Departamento técnico de Uralita "Manual General de Uralita", Paraninfo, Madrid (1992).
- [7] Timoshenko, S. "Resistencia de Materiales", Tomo II, pp 170-171, Espasa-Calpe, Madrid (1975).
- [8] Valiente, A. "Stress corrosion failure of large diameter pressure pipelines of prestressed concrete", Engineering Failure Analysis (en prensa).

### AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología por la financiación recibida a través del proyecto MAT99-0921.