

FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES EN UN DETALLE CONSTRUCTIVO PARA ESTRUCTURAS METALICAS

A. Valiente y M. Elices

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

Resumen. Este trabajo tiene como finalidad evaluar el margen de seguridad frente a la rotura frágil que ofrece un detalle constructivo típico de estructuras metálicas en celosía. El detalle se emplea para resolver las uniones de las barras a los nudos cuando aquellas son de sección tubular, y por tanto transmite los esfuerzos de tracción a que están sometidas las barras. La magnitud empleada para evaluar el margen de seguridad ha sido el factor de intensidad de tensiones correspondiente a la fisura cuya formación es propiciada en mayor medida por la tipología del detalle. El factor de intensidad de tensiones ha sido determinado mediante aproximaciones ingenieriles y métodos analíticos modelizando para ello la transmisión de fuerzas en el detalle. Los resultados obtenidos no sólo reflejan los efectos del detalle sobre el coeficiente de seguridad frente a la rotura frágil, sino que también permiten conocer la influencia de los distintos parámetros de diseño.

Abstract. The aim of this paper is to evaluate the safety margin against brittle fracture for a constructional detail usual in truss steel structures. The function of the detail is to connect truss members having hollow circular cross section, so it transfers tensile forces from a tubular member to the joint at which the member is connected. Safety margin has been evaluated through the stress intensity factor corresponding to the type of crack more likely to appear according to the configuration of the detail. Stress intensity factor values were determined on the basis of engineering approaches and analytical methods, as well as the force distribution due to the detail which was derived by modelling its mechanical action on the structural member. The results not only show the effects of the detail on the safety against the brittle fracture, but they also give the quantitative influence of the different design parameters.

1. INTRODUCCION

El bajo número de fallos por rotura frágil en estructuras metálicas se debe fundamentalmente a la alta tenacidad de los aceros empleados. Dados los procedimientos de ejecución que se emplean en la construcción metálica, por mucho que se cuide el proyecto, sería materialmente imposible asegurar la integridad estructural frente a esa clase de fallo si los aceros utilizados fuesen de tenacidad media o baja. Las medidas de seguridad a adoptar con tales aceros se basan en evitar las concentraciones de tensión y en eliminar los defectos que pudieran llegar a convertirse en fisuras y actuar como desencadenantes de una rotura frágil, lo que las hace virtualmente incompatibles con una parte esencial de la construcción metálica como son los detalles constructivos. Las concentraciones de tensión y los defectos que los detalles llevan aparejados, además de inevitables, son difícilmente controlables en la práctica, porque la ejecución in situ, unida a la cantidad y complejidad de los detalles, da lugar a desviaciones del proyecto y a la aparición de acciones parásitas que pueden alterar cualquier previsión.

Estas limitaciones de la construcción metálica para ase-

gurar la integridad estructural contra la rotura frágil se compensan empleando aceros de alta tenacidad y ductilidad, capaces de deformarse plásticamente para diluir las concentraciones de tensión y de desgarrarse dúctilmente si se alcanza la condición de rotura. Por ello, no suele valorarse el efecto que la tipología de un detalle pueda tener sobre la posibilidad de una rotura frágil, y aunque los códigos y normas recomiendan genéricamente evitar formas que provoquen fuertes concentraciones de tensión, no aportan criterios para poder valorar ese tipo de efectos. No obstante, las cualidades del acero estructural pueden resultar insuficiente contra la rotura frágil si los factores que la propician se unen. Así lo reconoce el eurocódigo EC3 [1], que limita los espesores utilizables en función de la temperatura mínima de servicio, la velocidad de deformación, el nivel de sollicitación y las consecuencias de una eventual rotura.

Este trabajo está dedicado a un detalle constructivo típico de estructuras metálicas y tiene por objeto analizar las características del detalle que pueden incidir sobre su integridad respecto a la rotura frágil, así como valorar cuantitativamente la influencia de cada una. El análisis consiste en: a) establecer el tipo y tamaño de fisura cuya

formación es más probable por verse favorecida tanto por la concepción como por la ejecución del detalle, y b) determinar el factor de intensidad de tensiones correspondiente para los esfuerzos a transmitir por el detalle, según el proyecto. En esta segunda parte del análisis se ha evitado la modelización numérica del detalle en beneficio de los modelos analíticos, porque aparte de la mayor generalidad de los resultados, el coste y la complejidad de la modelización numérica en un detalle constructivo constituyen un freno casi insuperable para extender y fomentar el uso de la Mecánica de Fractura como medio de asegurar la integridad estructural frente a la rotura frágil en la construcción metálica.

2. DESCRIPCION DEL DETALLE

El detalle constructivo objeto de este trabajo se emplea para materializar nudos de unión en estructuras metálicas de celosía cuando entre las barras que confluyen en el nudo las hay con sección tubular con pared delgada. Como elemento de conexión entre las barras se usan cartelas metálicas que en el caso de los tubos penetran en ellos a lo largo de dos ranuras paralelas cortadas según dos generatrices diametralmente opuestas. Cada cara de la ranura se une a la cara de la cartela enfrentada a ella mediante una soldadura en ángulo. Por lo tanto, la unión entre las barras tubulares y las cartelas queda asegurada con cuatro cordones longitudinales de soldadura. La figura 1 muestra el detalle constructivo y en ella aparecen las dimensiones más relevantes: el radio R y el espesor e del tubo, y la anchura $2a$ y la longitud s de la ranura.

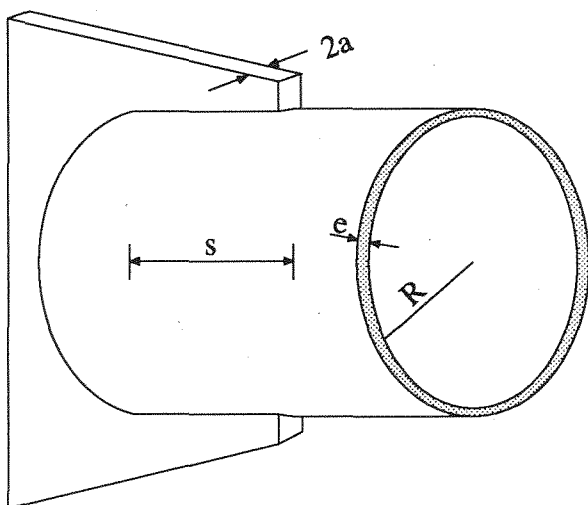


Fig. 1. Tipología del detalle.

La misión del detalle es transmitir al nudo los esfuerzos a que se encuentran sometido el tubo, principalmente esfuerzos axiales y excepcionalmente momentos flectores. Por ello, como se indica en la figura 2, se ha considerado que el tubo sólo transmite al nudo una fuerza de tracción N_0 aplicada sobre el eje de revolución, y que lo hace a través de la cartela.

En un detalle con esta tipología, aunque la cartela no suele estar en contacto con el plano de fondo de las ranuras porque se deja deliberadamente un pequeño espacio entre ambos, hay varias razones relacionadas con la ejecución del detalle, por las cuales dicho fondo puede llegar a actuar como una fisura:

- El corte de las ranuras puede hacerse en taller suavizando los cambios de plano entre los bordes y el fondo mediante acuerdos curvos, pero la celosía ha de montarse in situ y la precisión con que puede hacerse el montaje es limitada. En caso de estructuras diseñadas para salvar grandes luces, las celosías pueden medir decenas de metros y las distancias que separan los nudos entre los cuales hay que encajar las barras pueden ser de varios metros. Dado que el espesor de las cartelas y la anchura de las ranuras es de milímetros es casi inevitable tener que retocar las ranuras para montar las barras. Esto supone efectuar cortes en condiciones que hacen muy difícil el control, tanto de la geometría como del estado superficial en que queda el material, por lo cual no es infrecuente observar ángulos de corte en arista viva y superficies de corte muy fragilizadas. Estas condiciones propician que el fondo de la ranura acabe convertido en una fisura metalúrgica.
- En ocasiones, con el fin de hacer inaccesible el interior de los tubos, y quizás para evitar la concentración de tensiones que ocasiona un orificio rectangular, el espacio dejado entre las cartelas y el fondo de las ranuras se rellena con soldadura. Frecuentemente el relleno se fisura al contraerse durante el enfriamiento y las fisuras así formadas cruzan la ranura de un lado a otro.

De acuerdo con estas consideraciones, la fisura postulada en el detalle constructivo es una fisura circunferencial pasante coincidente con el fondo de la ranura. Así pues, estaría situada en la sección transversal del tubo donde termina la ranura y tendría una longitud $2a$ igual a la anchura de ésta. Para el cálculo del factor de intensidad de tensiones es conveniente tener en cuenta este último dato, que representa una importante restricción en cuanto al tamaño de fisura. La presencia de las ranuras reduce la sección resistente del tubo y por ello la suma de sus anchuras siempre es un porcentaje reducido del perímetro del tubo. Esto justifica que sólo sea necesario considerar porcentajes menores del 10 %, con lo cual la longitud de la fisura será inferior a 0,05 veces el perímetro del tubo.

La figura 2 muestra el tubo con la fisura y las acciones a que estaría sometido: la fuerza de tracción N_0 y las fuerzas distribuidas linealmente con densidades $f(x)$ y $f'(x)$, que la cartela ejerce a través de los cordones de soldadura. Las fuerzas resultantes de las distribuciones $f(x)$ y $f'(x)$ se obtienen en función de N_0 imponiendo el equilibrio de fuerzas y momentos. Ambas son iguales a $N_0/2$.

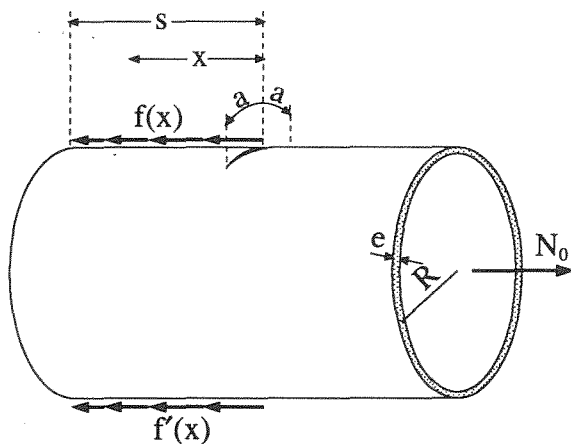


Fig. 2. Cargas y fisura en el detalle constructivo.

3. CALCULO DEL FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES

El principio de superposición permite demostrar que los factores de intensidad de tensiones correspondientes a las figuras 2 (estado de cargas 1) y 3 (estado de cargas 2) son iguales, y por tanto basta resolver el caso de la figura 4 para hallar la solución buscada.

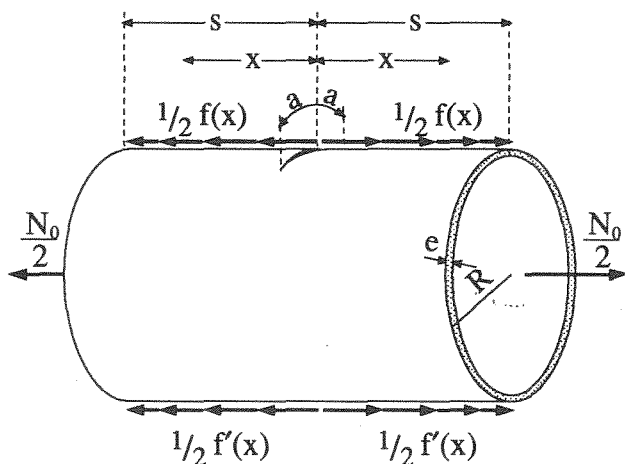


Fig. 3. Caso equivalente para determinar el factor de intensidad de tensiones.

En efecto, el estado 2 es el resultado de superponer el estado 1 y su simétrico respecto al plano de la fisura, ambos con las cargas divididas por dos. Ahora bien, el estado 1 y su simétrico son un mismo estado contemplado desde posiciones distintas y por tanto tienen el mismo factor de intensidad de tensiones. Como esta magnitud es aditiva respecto a las cargas que la originan, la superposición del estado 1 y su simétrico da lugar a un estado cuyo factor de intensidad de tensiones es dos veces el de 1 pero con las cargas divididas por dos, y por tanto es igual al del estado 1.

En consecuencia, si K_N , K_f y K'_f son las contribuciones

al factor de intensidad de tensiones del estado 2 (figura 3), debidas respectivamente al esfuerzo axial $N_0/2$, a la fuerza lineal $f/2$ y a la fuerza lineal $f'/2$, dicho factor y el del estado 1 (figura 2) serán:

$$K = K_N + K_f + K'_f \tag{1}$$

Entre los factores de intensidad de tensiones publicados para tuberías de pared delgada con fisuras circunferenciales pasantes, se encuentran los debidos a tracción simple y a flexión pura [2]. Para el esfuerzo axial de la figura 3 la expresión correspondiente es:

$$K_N = \frac{N_0 \sqrt{\pi a}}{4\pi R e} H_N\left(\frac{a}{R}, \frac{e}{R}\right) \approx \frac{N_0 \sqrt{\pi a}}{4\pi R e} \tag{2}$$

donde $H_N(\cdot)$ es una función adimensional cuyo valor para el máximo tamaño de fisura considerado difiere de la unidad en menos de un 5 % si $e/R = 10$ y en menos de un 9 % si $e/R = 20$.

Para fuerzas distribuidas sobre el eje de la fisura como las que ejerce la cartela no se dispone del factor de intensidad de tensiones. No obstante, hay datos suficientes para calcularlo si se desprecia el efecto de la curvatura del tubo y se asimila a una placa de anchura $2\pi R$ y espesor e con una fisura en el centro de longitud $2a$. El error cometido con esta aproximación, que será tanto más pequeño cuanto menor sea la longitud de la fisura comparada con el radio del tubo, se puede estimar por analogía, comparando los factores de intensidad de tensiones del tubo y la placa en el caso de tracción simple. Para una placa de las dimensiones indicadas, con una fisura y una carga de tracción iguales a las del tubo, la expresión del factor de intensidad de tensiones que puede encontrarse en la referencia [3] sólo se diferencia de (2) en que la función $H_N(\cdot)$ es distinta. Sin embargo, al particularizar en ambas funciones las dimensiones máxima de la fisura, los valores que se obtienen difieren en menos del 5 %, una diferencia del mismo orden que el propio error de la función $H_N(\cdot)$ dada en la referencia [2]. En consecuencia, el factor de intensidad de tensiones K_f del tubo se ha sustituido por el de la placa representada en la figura 4.

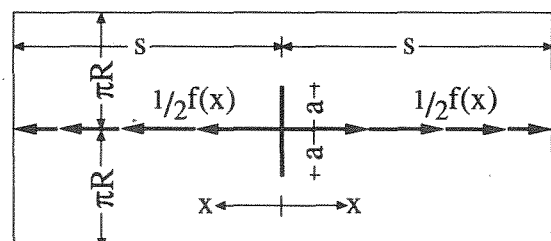


Fig. 4. Tubo asimilado a una placa.

La solución de este problema para una distribución de fuerzas lineales cualesquiera no aparece explícitamente entre las soluciones publicadas, pero puede calcularse por superposición a partir del caso en que la distribución se reduce a dos fuerzas puntuales opuestas, situadas a la

misma distancia y de la fisura pero a distinto lado, y con valor unidad por unidad de espesor. Si el factor de intensidad de tensiones para ese problema es k_f , el de la figura 4 sería:

$$K_f = \int_0^s \frac{f(x)}{2e} k_f dx \quad (3)$$

De acuerdo con la referencia [3], para fisuras inferiores al máximo tamaño supuesto, el factor k_f puede calcularse con un error menor del 1 % empleando una función adimensional $\kappa(\cdot)$, dependiente del coeficiente de Poisson del material, ν :

$$k_f = \frac{\sqrt{\pi a}}{2\pi R} \kappa\left(\frac{a}{R}, \frac{x}{2R}\right) \quad (4)$$

$$\kappa \equiv \frac{\text{Ch} \frac{x}{2R} \left(1 + \frac{1+\nu}{2} \frac{\frac{x}{2R} \text{Th} \frac{x}{2R} \cos^2 \frac{a}{2R}}{\text{Ch}^2 \frac{x}{2R} - \cos^2 \frac{a}{2R}} \right)}{\sqrt{\text{Ch}^2 \frac{x}{2R} - \cos^2 \frac{a}{2R}}} \quad (4')$$

Sustituyendo (4) en (3) e introduciendo la fuerza $N_0/2$ resultante de la distribución $f(x)$, la expresión del factor de intensidad de tensiones K_f adopta la forma:

$$K_f = \frac{N_0 \sqrt{\pi a}}{4\pi R e} H_f \quad (5)$$

$$H_f \equiv R \int_0^s \frac{2f}{N_0} \kappa\left(\frac{a}{R}, \bar{x}\right) d\bar{x} \quad (5')$$

La contribución K'_f que resta por determinar es la de las fuerzas lineales $f(x)/2$ ejercidas por la cartela sobre la generatriz del tubo diametralmente opuesta al eje de la fisura (figura 4). Teniendo en cuenta que es un sistema fuerzas alejadas de la fisura, su acción sobre ésta se puede estimar mediante la de otro sistema estáticamente equivalente. Un sistema que cumple esa condición es el formado por las dos fuerzas y los dos momentos de la figura 5. El factor de intensidad de tensiones correspondiente a la pareja de fuerzas es la mitad del dado por la ecuación (2), mientras que el debido a la pareja de momentos será negativo, y de acuerdo con la referencia [2] vendrá dado por:

$$K'_{f2} = -\frac{N_0 R \sqrt{\pi a}}{4\pi R^2 e} H_M\left(\frac{a}{R}, \frac{e}{R}\right) \approx -\frac{N_0 \sqrt{\pi a}}{4\pi R e} \quad (6)$$

ya que, como ocurriera con (2), el error que se comete haciendo $H_M(\cdot)$ igual a la unidad es muy pequeño, incluso para el tamaño de fisura máximo. Así pues:

$$K'_f = \frac{N_0 \sqrt{\pi a}}{8\pi R e} - \frac{N_0 \sqrt{\pi a}}{4\pi R e} = -\frac{N_0 \sqrt{\pi a}}{8\pi R e} \quad (7)$$

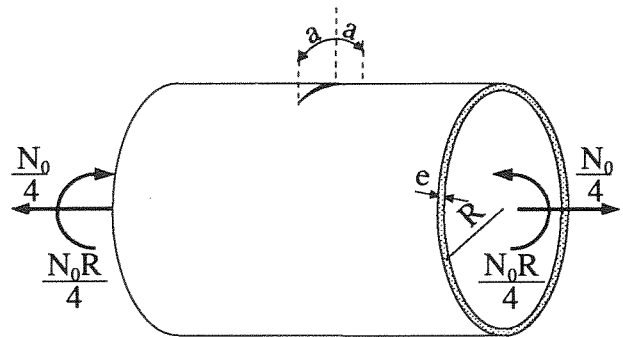


Fig. 5. Tercera contribución al factor de intensidad de tensiones del detalle constructivo.

$$K'_f = \frac{N_0 \sqrt{\pi a}}{8\pi R e} - \frac{N_0 \sqrt{\pi a}}{4\pi R e} = -\frac{N_0 \sqrt{\pi a}}{8\pi R e} \quad (7)$$

Sustituyendo (2), (5), y (7) en (1) se obtiene finalmente:

$$K = \frac{N_0 \sqrt{\pi a}}{4\pi R e} \left(\frac{1}{2} + H_f \right) \quad (8)$$

La influencia de la tipología del detalle sobre el factor de intensidad de tensiones se puede evaluar comparando el factor dado por (8) con el que ocasionaría la misma fisura si el tubo pudiera transmitir el esfuerzo axial N_0 sin necesidad de detalle. Puesto que dicho factor es el doble del dado por (2), se sigue que el detalle multiplica el factor de intensidad de tensiones por:

$$\frac{K}{K_0} = \frac{1}{4} + \frac{H_f}{2} \quad (9)$$

Tanto este factor multiplicativo como el propio factor de intensidad de tensiones (8) dependen de la distribución de fuerzas $f(x)$ a través de la función H_f . Es imprescindible pues conocer esa distribución.

4. FUERZAS EN EL DETALLE

De acuerdo con (5), la función H_f depende del modo como la cartela distribuye la fuerza $N_0/2$ sobre el tubo a través de los cordones de soldadura, lo que permite acotar su valor bajo dos hipótesis límite: a) la unión tubo-cartela es infinitamente rígida y la fuerza $N_0/2$ se concentra al comienzo de la zona de transmisión, es decir, sobre la fisura, y b) la flexibilidad de la unión es suficiente para que la fuerza $N_0/2$ se distribuya uniformemente. La distribución real será una solución intermedia, pero sólo mediante un modelo que tenga en cuenta la deformabilidad de los elementos integrantes de la unión tubo-cartela es posible obtener una solución teórica. El modelo de este tipo que se ha desarrollado se basa en admitir que la cartela es infinitamente rígida, que en el tramo de unión con ella el tubo se deforma con arreglo a la hipótesis de Navier de Resistencia de Materiales, y que los cordones de soldadura trabajan a corte simple en régimen elástico.

Las fuerzas por unidad de longitud f y f' , transmitidas a lo largo de las dos generatrices de unión entre el tubo y la cartela (figura 2), hacen disminuir los esfuerzos en el tubo a lo largo del detalle hasta anularse en el extremo del tubo. Imponiendo la condición de equilibrio de fuerzas y momentos entre dos secciones del tubo separadas por una distancia elemental dx (figura 6), se deduce inmediatamente la relación existente:

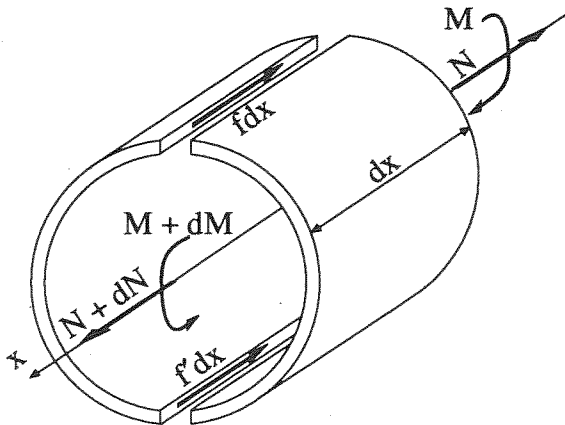


Fig. 6. Transmisión de esfuerzos en el detalle.

$$f = \frac{1}{2} \left(\frac{dN}{dx} + \frac{1}{R} \frac{dM}{dx} \right) \quad (10)$$

$$f' = \frac{1}{2} \left(\frac{dN}{dx} - \frac{1}{R} \frac{dM}{dx} \right) \quad (11)$$

Las deformaciones longitudinales del tubo ϵ y ϵ' en las generatrices de unión están relacionadas con los esfuerzos a través de las fórmulas de Resistencia de Materiales basadas en la hipótesis de Navier. Si el módulo de elasticidad del tubo es E , se tiene:

$$\epsilon = \frac{1}{E} \left(\frac{N}{2\pi Re} + \frac{M}{\pi R^2 e} \right) \quad (12)$$

$$\epsilon' = \frac{1}{E} \left(\frac{N}{2\pi Re} - \frac{M}{\pi R^2 e} \right) \quad (13)$$

La superficie de la soldadura en contacto con la cartela no se deforma, pero si lo hace la que está unida al tubo, y su deformación ha de ser la misma calculada a partir del tubo o de la soldadura. Si c representa la flexibilidad a cortante de las soldaduras por unidad de longitud, los elementos de longitud dx a través de los cuales se transmiten las fuerzas $f dx$ y $f' dx$ experimentan alargamientos de valor respectivo ϵdx y $\epsilon' dx$ o $c f dx$ y $c f' dx$, según que se consideren como efecto de la deformación angular de los cordones o de la deformación longitudinal de las generatrices del tubo unidas a la cartela:

$$\epsilon = c \frac{df}{dx} \quad (14)$$

$$\epsilon' = c \frac{df'}{dx} \quad (15)$$

Las igualdades (10) a (15) constituyen un sistema de seis ecuaciones diferenciales de primer orden que permiten determinar las seis funciones $\epsilon(x)$, $\epsilon'(x)$, $f(x)$, $f'(x)$, $N(x)$ y $M(x)$ al añadir las condiciones de contorno:

$$N(0) = N_0 \quad N(s) = M(0) = M(s) = 0 \quad (16)$$

La distribución de fuerzas $f(x)$ que se obtiene como solución del sistema es:

$$f = \frac{N_0 \lambda}{2s} \frac{\text{Ch}(\lambda - \lambda \frac{x}{s})}{\text{Sh} \lambda} \quad (17)$$

donde λ es una constante adimensional de valor:

$$\lambda \equiv \frac{s}{\sqrt{E c \pi R e}} \quad (18)$$

En la figura 7 se han representado las distribuciones correspondientes a dos valores típicos de la constante λ , junto con la distribución uniforme. Como puede verse la fuerza transmitida tiende a concentrarse en el comienzo de la unión, siendo más acusado ese efecto cuanto mayor es λ , esto es, cuanto más rígida es la unión tubo-cartela. En cualquier caso, la figura 7 pone de manifiesto que la hipótesis de distribución uniforme infravalora considerablemente el efecto de concentración de fuerzas.

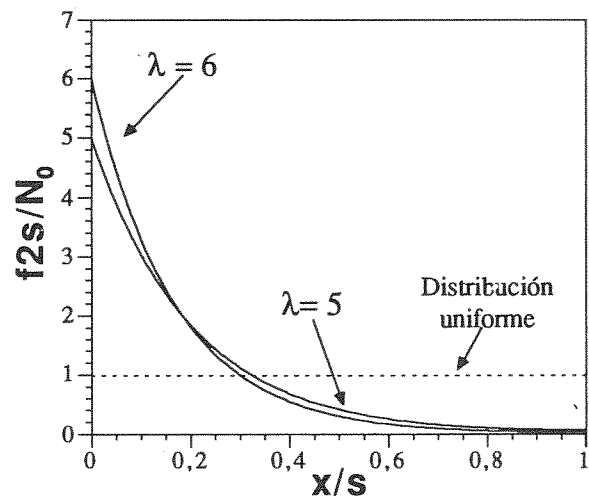


Fig. 7. Distribución de fuerzas en el detalle.

5. VALORES DEL FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES

Conocida la distribución de fuerzas $f(x)$, basta sustituirla en las ecuaciones (8) ó (9) para obtener finalmente la expresión buscada del factor de intensidad de tensiones:

$$\frac{K}{K_0} = \frac{1}{4} + \frac{\lambda R}{2s} \frac{\int_0^{s/2R} \text{Ch}\left(\lambda - 2\bar{x}\lambda\frac{R}{s}\right) \kappa\left(\frac{a}{R}, \bar{x}\right) d\bar{x}}{\text{Sh}\lambda} \quad (19)$$

De acuerdo con la ecuación (19), las variables adimensionales que determinan el factor de intensidad de tensiones son las relaciones a/R y s/R y la constante λ . En la figura 8 se ha representado gráficamente el factor adimensional K/K_0 en función de la relación s/R para valores particulares de las otras dos variables adimensionales. La integral de la ecuación (19) se ha calculado numéricamente.

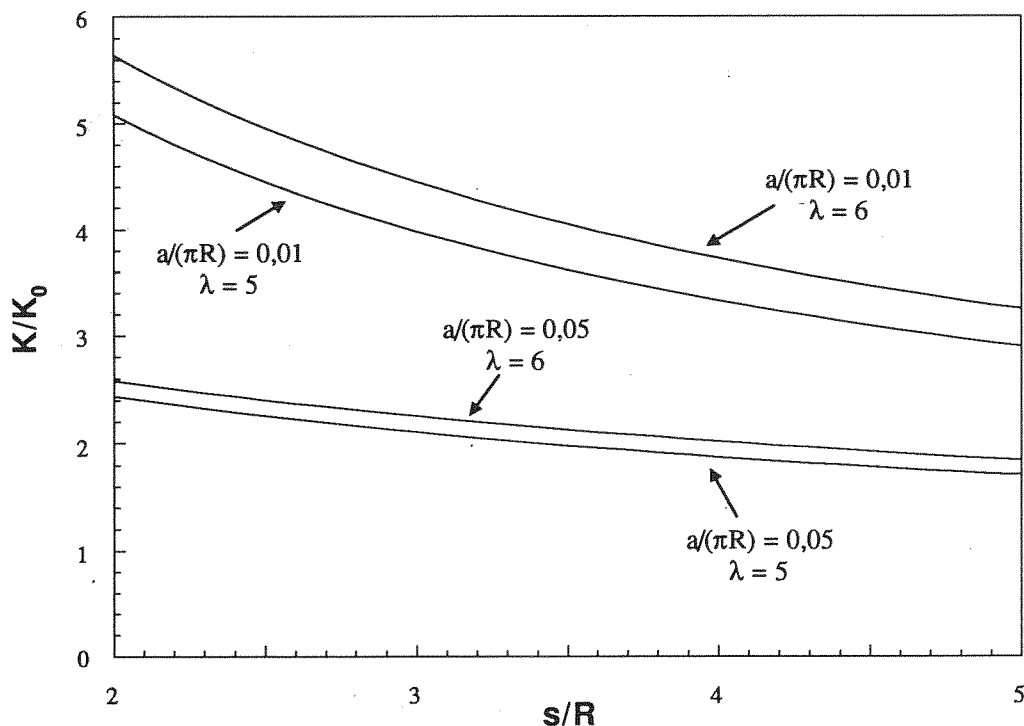


Fig 8. Valores del factor de intensidad de tensiones del detalle constructivo

Las curvas de la figura 8 revelan ante todo que el detalle ejerce un importante efecto amplificador sobre el factor de intensidad de tensiones. Comparado con el que produciría el mismo esfuerzo axial transmitido sin detalle, inmediatamente se duplica y puede llegar a cuadruplicarse o quintuplicarse para valores de los parámetros de diseño del detalle que no son en absoluto inusuales. La influencia de cada uno de dichos parámetros también queda establecida en las curvas de la figura 8. La tendencia decreciente del cociente K/K_0 con s/R indica que, como era de esperar, el efecto amplificador es menos acusado cuanto mayor es la longitud del detalle, ya que al aumentar la longitud de las soldaduras para transmitir una fuerza dada, ésta se concentra más débilmente en las proximidades de la fisura. Como también era de esperar por la misma razón, el efecto amplificador crece con la rigidez de los cordones (representada por el parámetro λ), pero en cambio disminuye con la anchura de la ranura, sin que esto signifique que con el propio factor K suceda lo mismo, ya que K_0 depende de la anchura de la ranura. Este efecto es típico en placas cuando hay fuerzas concentradas o li-

neales sobre el eje de la fisura [3].

6. CONCLUSIONES

El análisis fractomecánico de un detalle constructivo típico para transmisión de esfuerzos entre elementos de estructuras metálicas ha permitido evaluar la influencia de su tipología y de los parámetros de diseño sobre el riesgo de una rotura frágil. Los resultados obtenidos ponen de relieve a través del factor de intensidad de tensiones que el coeficiente de seguridad es al menos la mitad, pero puede ser varias veces inferior, al que se estimaría te-

niendo en cuenta únicamente el esfuerzo transmitido y no el modo de transmitirlo por parte del detalle.

7. REFERENCIAS

- [1] Eurocode 3 Editorial Group, "Eurocode 3: Design of Steel Structures", Commission of the European Communities, Bruselas (1990)
- [2] A. Zahoor, "Closed Form Expressions for Fracture Mechanics Analysis of Cracked Pipes", ASME Journal of Pressure Vessel Technology, **107**, pp 203-205, (1985)
- [3] H. Tada, P. Paris y G. Irwin "The Stress Analysis of Cracks Handbook". Paris Productions Inc., St. Louis (1985)