

EVALUACIONES DE FISURAS EN GASODUCTOS

José E. Stuardi, Alejandro J. Giudici, Leonardo J. Cocco y Guillermo D. Chiappero

Departamento de Estructuras, Facultad de C. E. F. y N., Universidad Nacional de Córdoba, Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina, jstuardi@gmail.com, <http://www.efn.uncor.edu>

Resumen: La presencia de defectos es un aspecto fundamental a tener en cuenta en el control de la seguridad y en la estimación de la vida útil de un gasoducto. El presente trabajo resume los estudios sobre fractura mecánica realizados en la cañería de un gasoducto próximo a la Ciudad de Córdoba (Argentina) que presenta tramos con defectos internos en la zona de soldadura por falta de penetración y fisuras. Se aborda el problema mediante elementos finitos utilizando modelos tridimensionales y se compara con soluciones analíticas de modelos sencillos, para verificar la validez de las hipótesis realizadas. Además, se realizan análisis paramétricos que ayudan a comprender la relevancia relativa de la gran cantidad de factores involucrados. El estudio constituye una herramienta que permite la toma de decisiones respecto de la factibilidad de propagación de fracturas.

Palabras claves: *fisuras, gasoducto, fractura, elementos finitos.*

1. INTRODUCCIÓN

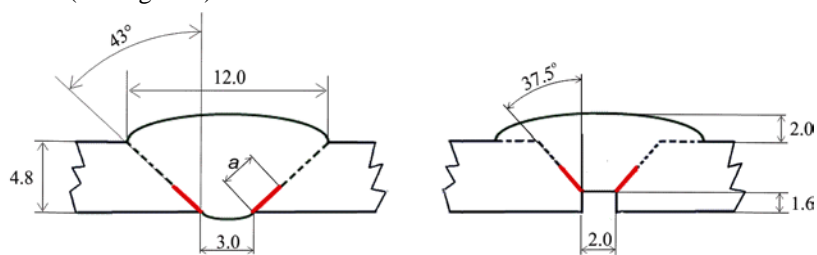
La presencia de defectos es un aspecto fundamental a tener en cuenta en el control de la seguridad y de la vida útil de un gasoducto. Los procedimientos de evaluación de defectos disminuyen las probabilidades de eventos no deseados, tales como: pérdidas o rupturas [1] [2].

El presente artículo resume los estudios sobre fractura mecánica realizados en sectores de la cañería de un gasoducto próximo a la Ciudad de Córdoba; la cual presenta tramos con defectos internos en la zona de soldadura por falta de penetración y fisuras. El objetivo de este trabajo es cuantificar el efecto de los defectos observados sobre la seguridad de la cañería. Para ello se efectúa un análisis de falla por fractura mecánica de la cañería considerando los defectos encontrados en las muestras extraídas.

Los datos con los que se realizó este trabajo se obtuvieron de relevamiento y ensayos mecánicos a partir de muestras obtenidas en la zona crítica de la soldadura y en distintos tramos de cañería, a saber: 1) Cañería: diámetro exterior 273 mm, espesor 4,8 mm, material acero API 5L G°A, material de base con tensión de fluencia 275,2 MPa, tensión de rotura 355,7 MPa. 2) Soldadura: dimensiones según Fig. 1, ángulo de la costura 30° respecto al eje longitudinal de la cañería, material de aporte con tensión de fluencia 349,5 MPa, tensión de rotura 432,5 MPa. 3) Presión de trabajo: varía diariamente entre 20,5 kg/cm² y 18,5 kg/cm².

El factor de intensidad de tensiones crítico K_{IC} se calculó por medio de correlaciones empíricas a partir de datos experimentales en el material base y en la zona de soldadura [3] [4]. Para este trabajo se considera $K_{IC} = 50 \text{ MPa m}^{0.5}$ en forma conservativa.

La longitud axial de los defectos encontrados varió entre 20 y 310 mm y las profundidades de las fisuras estuvieron comprendidas entre 0,3 y 3 mm medidas en su dirección de propagación, la cual coincide con la interfaz del material de aporte con el material base. Además, se tuvieron en cuenta en el estudio la presencia de defectos adicionales como falta de penetración de la soldadura y corrosión de la sobremonta del cordón. Se consideran dos variantes de localización de fisuras, esto es fisuras generadas en zonas sin o con defectos de penetración de la soldadura (ver Figura 1).



i) Fisura en zona sin defectos de penetración

ii) Fisura en zona con defectos de penetración

Figura 1: Cordón de soldadura y ubicación de fisuras

Basándose en las dimensiones máximas de las fisuras detectadas, se analiza la posibilidad de falla de la cañería mediante técnicas de la Mecánica de Fractura Lineal Elástica y Elastoplástica, comparando el factor de intensidad de tensiones K_I en servicio con el valor del factor de intensidad de tensiones crítico del material ensayado K_{IC} [4] y [5].

2. MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

Como la presión en el gasoducto es aproximadamente constante, y las fisuras relevadas no pueden tener suficiente representatividad estadística en todo el gasoducto, se optó por conservar a la profundidad de la fisura como variable de estudio y se evalúa por medio de este parámetro la posibilidad de falla en los distintos modelos. El factor de intensidad de tensiones en servicio K_I es calculado mediante Elementos Finitos (E.F.) utilizando software comercial y mediante la técnica de la integral J . Se utilizan para este efecto modelos planos y tridimensionales de complejidad creciente, diseñados interactivamente a partir de los resultados parciales encontrados.

Los modelos planos permiten la reducción de parámetros de estudio a partir de la información de su relevancia en el resultado obtenido. Se modeló la sección transversal del caño conteniendo la soldadura. Esta primera configuración sirvió para el análisis de la influencia de la inclinación de la fisura respecto de la dirección radial, los defectos de corrosión de la sobremonta y falta de penetración. De la experiencia realizada con los modelos 2D se desprende que, sin pérdida importante de exactitud, el modelado del conjunto de defectos observados puede simplificarse considerando: a) que la falta de penetración puede ser tratada conservativamente como una reducción del espesor de la sección resistente, b) que la fisura superficial -no pasante- e inclinada respecto a la dirección radial puede ser tratada como una fisura radial con una profundidad igual a su proyección en esa dirección, c) que la corrosión de la sobremonta puede ser ignorada siempre que el defecto no llegue a comprometer al material dentro de lo que se entiende como una sección anular de tubo ideal asociada a la sección transversal real.

Los modelos tridimensionales permiten considerar el escenario real, esto es, adicionar la influencia de la longitud axial de la fisura, denominada como $2c$, y el efecto del desarrollo en forma de espiral de la soldadura.

Se utilizaron dos tipos de modelos 3D. El *modelo de fisura oblicua*, que es un tubo de 200 mm de longitud axial, con una costura de soldadura desarrollada en forma helicoidal, provista de una fisura de longitud y profundidad variables, correspondiendo a la sección de cordón de soldadura *i*) de la Fig. 1. El *modelo de fisura radial* en cambio, es un tubo ideal de similares dimensiones, con fisuras propagadas en dirección radial y ha sido utilizado para contrastar con soluciones analíticas disponibles. Respecto a la profundidad de las fisuras se consideraron en el modelo radial dos casos: $a = 2$ mm y $a = 3,8$ mm. El primero de los casos $a = 2$ mm corresponde con la proyección en la dirección radial de la fisura oblicua de 3 mm, que es la máxima profundidad observada. El segundo de los casos, con profundidad de fisura radial $a = 3,8$ mm corresponde con el comienzo de una plastificación generalizada del ligamento. Finalmente el caso considerado en el modelo oblicuo es la fisura oblicua máxima observada de 3 mm.

En la Tabla 1 se muestran los factores de intensidad de tensiones calculados K_I utilizando los modelos tridimensionales. Se puede notar una aproximación relativamente buena lograda por el modelo de fisura radial equivalente $a = 2$ mm, que simula al caso más realista que configura el modelo oblicuo, con fisura oblicua de $a = 3$ mm. Esta afirmación permite considerar al modelo de fisura radial como representativo del caso estudiado, teniendo en cuenta las simplificaciones realizadas con anterioridad.

| Long. de fisura $2c$ [mm] | Fisura oblicua | Fisura radial | |
|------------------------------|----------------|---------------|--------------|
| | $a = 3$ mm | $a = 2$ mm | $a = 3,8$ mm |
| 10 | 4,18 | 4,59 | 6,10 |
| 60 | 6,91 | 6,86 | 17,02 |
| 100 | 7,30 | 7,27 | 23,94 |
| 200 | 7,61 | 7,63 | 36,39 |

Tabla 1: Factor de intensidad de tensiones crítico K_I obtenido con distintos modelos tridimensionales

3. SOLUCIONES ANALÍTICAS

El tipo de defecto tenido en cuenta por el modelo radial constituye un daño estándar que ha sido estudiado con anterioridad de manera que se dispone de soluciones analíticas.

Newman y Raju [5] aproximaron el factor de intensidad de tensiones K_I para el caso de una fisura semi-elíptica en una de las caras de una placa finita. Particularizando para nuestro caso la expresión de K_I se reduce a

$$K_I = S_t \sqrt{\pi a/Q} F_s \quad (1)$$

donde, S_t es la tensión nominal de tracción (lejos de la grieta), Q y F_s son funciones de (a/c)

$$Q = 1 + 1,464(a/c)^{1,65}, \quad F_s = [M_1 + M_2(a/t)^2 + M_3(a/t)^4] \sqrt{\sec[\pi c \sqrt{a/t} / (2b)]} \quad (2)$$

t es el espesor, b es el ancho de la placa y los M_i son coeficientes también funciones de (a/c)

$$M_1 = 1,13 - 0,09(a/c), \quad M_2 = -0,54 + 0,89/(0,2 + a/c), \quad M_3 = 0,5 - 1/(0,65 + a/c) + 14(1 - a/c)^{24} \quad (3)$$

Por otro lado, Eiber et al. [6] publicaron un reporte donde se presenta una ecuación semiempírica que puede ser usada para predecir la falla de tubos de gasoductos, basada en 48 ejemplares ensayados con fisuras superficiales externas en tubos sometidos a presión interior. Las fórmulas se basan en el modelo de Dugdale, que tiene en cuenta la plastificación en la punta de la fisura asociada con el valor relativamente alto de la resiliencia en aceros de uso normal en este tipo de aplicaciones. La aproximación fue ajustada con los resultados de los experimentos y contempla el uso del factor de protuberancia para grieta superficial M_p definido como

$$M_p = \frac{1 - a / (t M_T)}{1 - a / t} \quad \text{con} \quad M_T = \sqrt{1 + 2,55 c^2 / (r_e t) - 0,0135 c^4 / (r_e t)^2} \quad (4)$$

donde M_T es el factor de Folias. El factor de intensidad de tensiones se calcula finalmente como

$$K_I = \sqrt{\frac{8}{\pi} a S_{fl}^2 \ln \sec \left(\frac{\pi M_p S_h}{2 S_{fl}} \right)} \quad (5)$$

donde S_{fl} es la tensión de flujo y S_h es la tensión circunferencial.

La Figura 2 muestra los factores de intensidad de tensiones calculados por E.F. (modelo radial) y los obtenidos mediante las fórmulas de Newman y Raju (N.& R.) en una placa finita. Para esta última fórmula, y para las dimensiones del tubo del gasoducto, no se encuentran diferencias apreciables para fisuras que se propagan desde el interior o desde el exterior, como se aprecia en la figura. Se observa una adecuada coincidencia con los resultados de E.F., excepto para valores altos de la profundidad y longitud de fisura, donde las discrepancias empiezan a ser de relativa importancia. Téngase además en cuenta que la longitud de fisura aquí considerada debe ser la longitud equivalente a una sección rectangular. Debido a que las fórmulas consideran fisuras semielípticas, en la construcción de las curvas provenientes de fórmulas analíticas se redujo la longitud de fisura con el criterio de áreas equivalentes.

En la Figura 3 se comparan los resultados del modelo radial de E.F. con las fórmulas de Eiber et al. [6] correspondientes a aproximaciones realizadas en tubos y admitiendo cierta plastificación. Las aproximaciones mostradas resultan razonables en función de las dispersiones observadas en la última referencia citada y la malla de E. F. utilizada en este caso. Obsérvense las diferencias en el factor de intensidad de tensiones que pueden obtenerse considerando profundidades (a) y longitudes de fisuras ($2c$) elevadas, esto se corresponde con la limitación en la aproximación de la función secante trigonométrica en la ec.(5).

4. CONCLUSIONES

A continuación se resumen los resultados más importantes obtenidos:

De los modelos planos analizados se concluye que frente a un escenario de combinación de fallas se puede asumir sin pérdida significativa de precisión: a) que la falta de penetración sea tratada conservativamente como una reducción del espesor de la sección resistente, b) que la fisura superficial -no pasante- e inclinada respecto a la dirección radial sea tratada como una fisura radial con una profundidad igual a su proyección en esa dirección, c) que la corrosión de la sobremonta no tiene una influencia notable en los resultados. De los modelos tridimensionales estudiados se puede concluir que: d) el efecto del ángulo de la hélice de la soldadura puede ser despreciado sin error apreciable, e) las mallas de elementos finitos utilizadas proveen soluciones de buena calidad cuando se las compara con las fórmulas analíticas utilizadas para aproximar el factor de intensidad de tensiones.

De las consideraciones anteriores se desprende que el caso objeto de este estudio puede ser aproximado al de una placa de sección reducida por la falta de penetración, con una fisura superficial en dirección normal ubicada en la superficie interna o bien externa, de profundidad equivalente a la fisura inclinada.

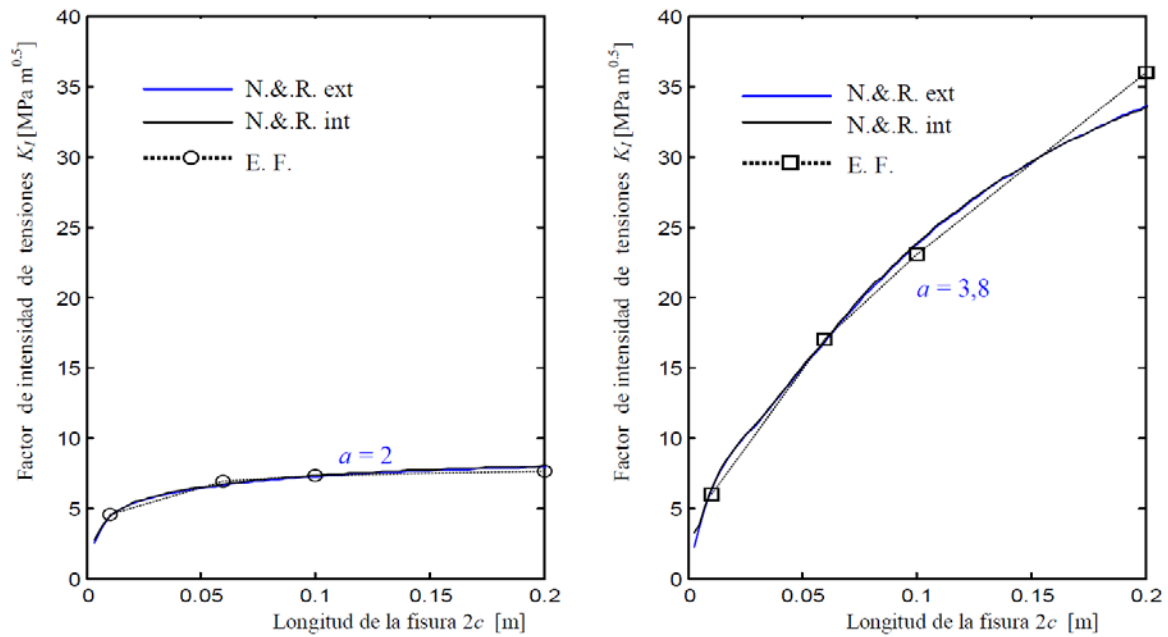


Figura 2: K_I en función de la longitud de la fisura – Comparación E.F. con N.&R.

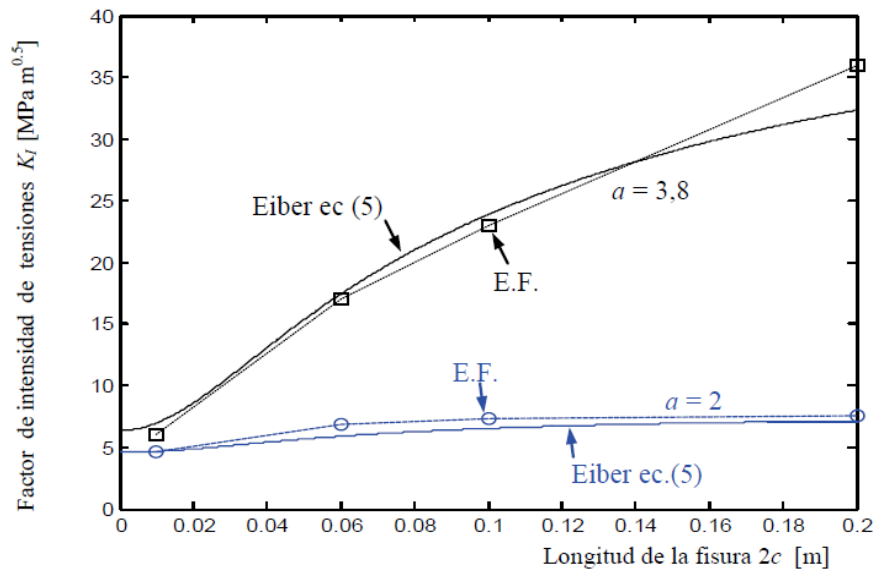


Figura 3: K_I en función de la longitud de la fisura – Comparación E.F. con Eiber et al.

REFERENCIAS

- [1] J.C. MASSA Y A.J. GIUDICI, *Comportamiento de un gasoducto con fisuras*, Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, 9(2) (2009), pp. 143-162.
- [2] J.C. MASSA Y A.J. GIUDICI, *Daño por efectos de oxidación en gasoductos*, Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, 10(2) (2010), pp. 119-138.
- [3] S.T. ROLFE Y J.M. BARSOM, *Fracture and fatigue control in structures*, Applications of fracture mechanics, ASTM, 1999.
- [4] A.E. MATUSEVICH, R.A. MANCINI Y A.J. GIUDICI, *Determinación de la tenacidad a la fractura del material de un gasoducto*, Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales (RLMM), 32 (2) (2012), pp.253-260.
- [5] J.C. NEWMAN Y I.S. RAJU, *Stress intensity factor equations for cracks in three-dimensional finite bodies subjected to tension and bending loads*, Nasa Technical Memorandum, 85793 (1984), pp.9-13.
- [6] R.J. EIBER, T.A. BUBENIK Y W.A. MAXEY, *Fracture control technology for natural gas pipelines*, Project PR-3-9113, Report NG-18 No. 208, 1993, American Gas Association.