

CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL DE TUBOS DE CONDUCCION

Hugo A. Ernst, José Villasante y Daniel Johnson
Centro de Investigación Industrial (CINI) - Techint

Resumen

Se ha realizado un trabajo teórico-experimental que permite realizar un análisis de confiabilidad estructural en tubos de conducción. El trabajo incluye un modelo que permite determinar las condiciones de inicio de crecimiento y posterior propagación de fisuras superficiales de forma semielíptica. El mismo se desarrolló para materiales metálicos que tienen un comportamiento del tipo Ramberg-Osgood y se fundamenta en conceptos de mecánica de fractura, incluyendo propiedades del material tal como la fractoténacidad del material (J_R) y expresiones que dependen de las solicitaciones externas y de la geometría del tubo y de la fisura tales como la fuerza impulsora de propagación radial de fisura ($J_{aplicado}$) y colapso plástico del tubo.

Se realizó la verificación del modelo a través de la comparación de valores teóricos y experimentales.

Como aplicación del modelo se realizaron trabajos de análisis de confiabilidad estructural sobre diversos tubos de conducción de gas de la empresa Gas Natural BAN S.A.

1. Introducción

En los tubos de conducción de petróleo y gas, debido al alto riesgo de accidentes, es de fundamental importancia garantizar la confiabilidad estructural de estos productos. A tal efecto se realizan ensayos no destructivos (NDT), cuya finalidad es detectar defectos y garantizar que éstos sean más pequeños que un cierto tamaño tolerable. Por otra parte se implementa una técnica que consiste en someter al tubo a una determinada presión por un cierto tiempo, conocida como “prueba hidráulica”, con el objeto de asegurar que el tamaño de los defectos no supere ese máximo tolerable y así que no se produzca la ruptura del tubo.

2. Objetivo

- Desarrollar un modelo teórico-experimental cuyo resultado sean curvas de tamaño de defecto crítico en función de la sollicitación externa (presión interior), para diferentes geometrías de defectos, tubos, y propiedades mecánicas del material.

3. Metodología

La metodología empleada es la siguiente:

- Caracterización del material.- Determinación de las propiedades mecánicas y fractomecánicas del material.
- Trabajo Teórico.- Desarrollo de un modelo teórico.
- Trabajo Experimental.- Ensayos a plena escala en el laboratorio.
- Validación del Modelo Teórico.

4 Desarrollo

4.1 Caracterización del Material

A los fines de caracterizar al material desde el punto de vista de sus propiedades mecánicas y fractomecánicas, se realizan diversos ensayos sobre probetas del mismo, siendo estos:

- *Ensayo de Tracción [1,2]*
 - Se determinan las tensiones de fluencia y rotura (σ_{ys} y σ_u), y los parámetros de Ramberg-Osgood n y α (exponente y coeficiente de Ramberg-Osgood).

La ley de Ramberg-Osgood es la siguiente:

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_{ys}} = \frac{\sigma}{\sigma_{ys}} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_{ys}} \right)^n \quad (\text{ec. 1})$$

Siendo:

ϵ ; Deformación total
 ϵ_{ys} ; Deformación de fluencia
 σ ; Tensión
 σ_{ys} ; Tensión de fluencia

- *Ensayo Charpy [3]*
 - Se determina la energía absorbida por choque (CVN)
- *Ensayo de Fractoténacidad [4]*
 - Se determina la resistencia a la fractura (K_{Ic} ó J_{Ic} y Curva de resistencia a la fractura)

4.1.1 Resistencia a la Fractura del Material

La resistencia a la fractura de un material puede ser caracterizada por los parámetros fractomecánicos, de fractoténacidad o iniciación (J_{Ic} ó K_{Ic}) y la curva de resistencia del material (Curva J-R). Esta última propiedad es una medida de cuán resistente es el material al inicio y propagación de fisuras, obteniéndose a partir de ensayos de laboratorio [4].

En general en los metales, el valor de la resistencia a la fractura aumenta con el crecimiento de la fisura (Δa), dando lugar a la curva de resistencia del material (Curva J-R), la cual en muchos casos puede ser expresada de la siguiente forma:

$$J_R[\Delta a] = J_{Ic} + \beta \Delta a^m \quad (\text{ec. 2})$$

Siendo:

$J_R[\Delta a]$; Resistencia a la fractura luego de un incremento de fisura Δa

J_{Ic} ; Valor crítico ó valor inicial de la resistencia a la fractura (comienzo del crecimiento de fisura)

Δa ; Crecimiento de fisura

β y m ; Constantes que dependen del material.

De los ensayos de laboratorio pueden obtenerse los valores de J_{Ic} y de las constantes β y m . Una forma aproximada y sencilla de estimar estas últimas es a partir del ensayo Charpy (CVN), que se

caracteriza por su sencillez comparado con el ensayo de determinación de la curva de resistencia del material [5].

4.2 Trabajo Teórico

Se desarrolló un modelo que permite determinar las tensiones que dan inicio al crecimiento estable de la fisura y posterior propagación inestable, para una geometría y dimensiones dadas del defecto y de la probeta. Por otro lado para una dada tensión aplicada, puede obtenerse el tamaño de defecto “crítico” de comienzo de crecimiento estable y el punto de inestabilidad de fisura (Fig. 1).

En el desarrollo del modelo, se aplicaron conceptos de mecánica de fractura elasto-plástica (EPFM), realizándose el estudio para modo I de carga (cargas aplicadas perpendiculares al plano de la fisura). Se determinan los valores de la fuerza impulsora en la punta de la fisura (J_{apl}) y de la resistencia a la fractura del material (J_R), luego se aplica sobre éstos parámetros fractomecánicos un criterio de fractura a fin de determinar el inicio de crecimiento estable y posterior propagación inestable de fisura. La configuración estudiada es un tubo con un defecto superficial no pasante de forma semielíptica, siendo la carga actuante la presión interna (Fig. 2) [5].

La fuerza impulsora (J_{apl}) depende de la presión aplicada y de las geometrías y dimensiones del tubo y del defecto, mientras que la curva de resistencia es una propiedad que depende únicamente del material.

Cabe mencionar que el modelo contempla roturas por colapso plástico, puesto que para defectos relativamente poco profundos, la predicción de la falla debe basarse en conceptos de colapso plástico y no fractomecánicos [5].

En la realización del modelo se tuvieron en cuenta las siguientes hipótesis:

- Cuerpo cargado en modo I
- Material homogéneo e isótropo.
- Material con comportamiento del tipo Ramberg-Osgood.
- Aplicación de la teoría de mecánica de fractura elasto-plástica.
- Deformaciones pequeñas respecto a las dimensiones del defecto y la probeta.
- Deformaciones independientes del tiempo (time independent deformation)

El modelo presenta algunas limitaciones en las que se debe prestar cuidadosa atención antes de su aplicación, éstas son:

- Tubos con relación espesor / radio interior (t/R_i) > 0.25
- Defectos con profundidad / largo (a/c) > 1 ; profundidad / espesor del tubo (a/t) próximos a 1 ó 0.

4.2.1 Fuerza Impulsora en la Punta de la Fisura

La fuerza impulsora en la punta de la fisura (J_{apl}), es la que impulsa el crecimiento de fisura, siendo ésta función de: i) la geometría y dimensiones del tubo y del defecto, ii) las propiedades mecánicas del material y iii) la tensión aplicada.

En la determinación de la fuerza impulsora se aplicó mecánica de fractura elasto-plástica y sus respectivas hipótesis. La ubicación de la fisura analizada es externa, paralela al eje axial y simétrica

respecto al largo del tubo. La geometría de la misma es semielíptica no pasante en el espesor del tubo (a , profundidad de la fisura, y $2c$, largo de la fisura), ver Figura 2.

La fuerza impulsora (J_{apl}), se obtiene a partir de dos contribuciones:

$$J_{apl} = J_{ee} + J_{pl} \quad (\text{ec. 3})$$

Siendo:

J_{ee} ; Parte elástica de la fuerza impulsora corregida por plasticidad en pequeña escala

J_{pl} ; Parte plástica de la fuerza impulsora

Un esquema de la determinación de la fuerza impulsora se aprecia en la Fig. 3.

En el Apéndice 1 se presenta en detalle la expresión de la fuerza impulsora (J_{apl}).

4.2.2 Criterio de Fractura

De acuerdo a la teoría de mecánica de fractura un defecto inicial comienza a propagarse cuando se cumple un cierto criterio de fractura.

El criterio de fractura que se asume para el comienzo de crecimiento de fisura es cuando la fuerza impulsora (J_{apl}) iguala a la resistencia a la fractura (J_{Ic}), (ec. 4).

$$J_{apl} = J_{Ic} \quad (\text{ec. 4})$$

El crecimiento de la fisura será estable si la variación de la fuerza impulsora es menor que la variación de resistencia a la fractura con el incremento de la fisura (ec. 5), en caso contrario el crecimiento será inestable (ec. 6). El inicio de inestabilidad se denomina “punto de inestabilidad” y sucede cuando las curvas de fuerza impulsora y resistencia a la fractura del material en función de Δa son tangentes.

$$\frac{dJ_{apl}}{d\Delta a} < \frac{dJ_R}{d\Delta a} \quad (\text{ec. 5})$$

$$\frac{dJ_{apl}}{d\Delta a} \geq \frac{dJ_R}{d\Delta a} \quad (\text{ec. 6})$$

El modelo aplica este criterio de fractura sobre los parámetros fractomecánicos, obteniéndose como resultado curvas de presión interna vs. profundidad de defecto/espesor del tubo (a/t) para determinadas formas de defecto ($a/c = \text{cte}$).

4.3 Trabajo Experimental y Validación del Modelo

Se realizaron ensayos de ruptura a plena escala a temperatura ambiente (20°C) en probetas con defectos superficiales hechos artificialmente, de tubos:

- 8 5/8" x 14.72 mm, acero grado X65.
- 7" x 9.19, acero grado N80.

- 7" x 10.36, acero grado N80.
- 5 1/2" x 9.17, acero grado N80.
- 5 1/2" x 7.72, acero grado N80.
- 7" x 9.19, acero grado P110.
- 4.5" x 8.56, acero grado P110.

Para aproximar el defecto a la situación más crítica (fisura), se realizó un prefisurado por fatiga de la entalla inicial del tubo hasta las condiciones preestablecidas para el tamaño de fisura inicial (a). Posteriormente se sometió al tubo a presiones crecientes hasta la ruptura. Cabe mencionar que las presiones de ruptura de los tubos ($P_{ruptura}$), son dependientes de las propiedades del material y de las dimensiones del defecto y el tubo [5].

Los valores experimentales de las presiones de ruptura son comparados con los obtenidos por el modelo teórico a los efectos de evaluar la validez del modelo.

En la Tabla 1 se presentan las propiedades mecánicas de los tubos estudiados, en la Tabla 2 la dimensiones de los mismos y sus defectos, y en la Tabla 3 la comparación de los valores experimentales y teóricos. Se observa que la diferencia entre los valores experimentales y los predichos por la teoría varía entre -7% y 18% , lo cual indica que los resultados teóricos aproximan bien a los resultados experimentales.

4.4 Aplicación del Modelo

Como aplicación del modelo teórico, utilizando sólo resultados de ensayos de caracterización del material, se realizó un análisis de confiabilidad estructural en tubos de conducción de gas, provenientes de la Empresa Gas Natural BAN, estos fueron:

- Tubo $\varnothing 559 \times 7.00$ mm
- Tubo $\varnothing 163 \times 4.00$ mm
- Tubo $\varnothing 169 \times 4.60$ mm
- Tubo $\varnothing 321 \times 6.44$ mm
- Tubo $\varnothing 274 \times 8.88$ mm

Los estudios se realizaron para una presión interna de trabajo de 25 Kg/cm^2 , siendo los defectos estudiados superficiales de forma semielíptica con geometrías de: $a/c = 0.2$ y $a/c = 1$, donde (a) es la profundidad del defecto y (c) el semilargo del mismo. En las Figs. 3 y 4 se presentan los resultados del modelo correspondientes a un tubo con dos formas de defectos (curvas de presión aplicada vs profundidad de defecto crítico). Los detalles de estos estudios se presentan en las referencias [6, 7].

5 Conclusiones

- Se desarrolló un modelo teórico que determina las condiciones de inicio de crecimiento estable y punto de inestabilidad de fisuras superficiales no pasantes de forma semielíptica en tubos de conducción, partiendo de las propiedades mecánicas del material y de la geometría del tubo y del defecto. El modelo se fundamenta en conceptos de la mecánica de fractura elasto-plástica y ruptura por colapso plástico.

- Se realizó la validación del modelo a través de la comparación de valores teóricos obtenidos mediante el modelo y valores experimentales obtenidos en el laboratorio. Las diferencias entre los mismos estuvo entre -7% y 18% .
- Como aplicación del modelo se realizaron trabajos de análisis de confiabilidad estructural sobre diversos tubos de conducción de gas de la empresa Gas Natural BAN S.A.

6. Referencias

- [1] ASTM E 8-98
- [2] ASTM E 646-93
- [3] ASTM E 23-96
- [4] ASTM E 1820-99
- [5] Villasante, J. y Ernst, H. A. "Propagación de Fisuras en Tubos", Tesis para optar al título de Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales, Instituto de Tecnología, Universidad de General San Martín, Bs. As., Argentina, 1998.
- [6] Ernst, H. A., Villasante, J. A. y Johnson, D. H. "Análisis de Confiabilidad Estructural de Tubos de Alta Presión de Gas (GAS NATURAL BAN S. A.)", Centro de Investigación Industrial (CINI), FUDETEC, Informe 1045/97, Bs. As., Argentina.
- [7] Villasante, J. A., Johnson, D. H. y Ernst, H. A. "Análisis de Confiabilidad Estructural de Tubos de Alta Presión de Gas (GAS NATURAL BAN S. A.)", Centro de Investigación Industrial (CINI), FUDETEC, Informe 1540/99, Bs. As., Argentina.
- [8] Newman, J. R., Raju, I. S., "An Empirical Stress Intensity Factor Equation for The Surface Crack"; Eng. Fracture Mechanics vol. 15 nro. 1-2 pp. 185-192, 1981.
- [9] Kumar, V., German, M., and Shih, "An Engineering approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis". EPRI Topical Report NP-1931, Research Project 1237-1; Palo Alto, CA, 1981.
- [10] Kiefner, J. F., Maxey, W. A., Eiber, R. J., and Duffy, A. R., "Failure Stress Levels of Flaws in Pressurized Cylinders, "Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing, ASTM STP 536, American Society for Testing and Materials, 1973, pp. 461-481.
- [11] Leis, B. N., and Brust, F. W., "Hydrotest Strategies for Gas Transmission Pipelines Based on Ductile-Flaw-Growth Considerations", NG-18 Report No. 194 SI Task 1.10-89. Battelle.
- [12] Christman, T. K. and Brust F. W., "Crack Growth Behavior and Modeling", NG-18 Report No. 179 Task No. SCC 8.2. Battelle.

TABLAS

Probeta	σ_{ys} (MPa)	σ_u (MPa)	Charpy (Joules)	J_{Ic} (KJ/m ²)	K_{Ic} (MPa.m ^{1/2})
Tubos Grado X65					
1 a 4	493	592	347	1000	-
Tubos Grado N80					
5	553	715	95	243	-
6	588	758	65	240	-
7	571	760	28	201	-
8	571	760	25	210	-
9	601	870	13	212	52.5
10	601	870	13	212	52.5
11	565	773	65	227	-
12	579	754	55	230	-
Tubos Grado P110					
13	800	900	98	260	-
14	800	900	98	260	-
15	800	900	98	260	-
16	757	897	19	160	75
17	757	897	19	160	75

Tabla 1: Propiedades Mecánicas y Fractomecánicas de los Tubos Ensayados

Probeta	Dimensiones del tubo		Dimensiones del defecto después del prefisurado			
	D Diámetro Exterior (mm)	t Espesor (mm)	a Profund. del defecto (mm)	c Semilargo del defecto (mm)	a/t	a/c
Tubos Grado X65						
1	219.37	14.83	1.5	7.5	0.101	0.200
2	219.20	15.00	3.5	29.0	0.233	0.121
3	219.70	14.50	6.0	19.5	0.414	0.308
4	219.12	14.35	7.8	27.5	0.543	0.284
Tubos Grado N80						
5	177.8	9.19	2.70	19.29	0.30	0.14
6	177.8	10.36	3.75	15.62	0.36	0.24
7	177.8	9.19	2.70	19.29	0.30	0.14
8	177.8	9.19	5.40	15.00	0.59	0.36
9	177.8	9.19	2.70	19.29	0.30	0.14
10	177.8	9.19	1.40	7.00	0.15	0.20
11*	139.7	9.17	5.60	37.0	0.61	0.15
12*	139.7	7.72	4.00	35.5	0.52	0.11
Tubos Grado P110						
13	177.8	9.19	1.40	7.00	0.15	0.20
14	177.8	9.19	2.70	19.29	0.30	0.14
15	177.8	9.19	3.60	25.71	0.40	0.14
16	114.3	8.56	1.40	7.00	0.15	0.20
17	114.3	8.56	2.00	20.00	0.23	0.10

Tabla 2: Dimensiones de las Probetas Ensayadas y sus Defectos

Probeta	P _{ruptura} (experimental) (MPa) [psi]	P _{ruptura} (teórico) (MPa) [psi]	(Pr _{exp} - Pr _{teor.})/Pr _{teor.} Dif. entre valor exp. y teórico [%]
Tubos Grado X65			
1	91.03 [13,200]	85.7 [12,427]	6
2	85.72 [12,430]	82.9 [12,021]	3
3	86.75 [12,290]	78.9 [11,441]	10
4	82.34 [11,940]	70.7 [10,252]	17
Tubos Grado N80			
5	68.5 [9,932]	65.16 [9,448]	5
6	77.5 [11,237]	77.90 [11,295]	-1
7	61.2 [8,874]	65.57 [9,508]	-7
8	56.5 [8,192]	51.63 [7,486]	9
9	73.2 [10,614]	68.50 [9,932]	7
10	94.0 [13,630]	79.84 [11,577]	18
11	60.5 [8,772]	57.14 [8,285]	6
12	52.3 [7,584]	54.02 [7,786]	-3
Tubos Grado P110			
13	96.0 [13,920]	92.27 [13,379]	4
14	88.0 [12,760]	87.36 [12,667]	1
15	86.0 [12,470]	81.01 [11,746]	6
16	142.0 [20,590]	132.87 [19,266]	7
17	127.0 [18,415]	119.80 [17,371]	6

Tabla 3: Resultados Experimentales y Teóricos de la Presión de ruptura en los tubos Estudiados

FIGURAS

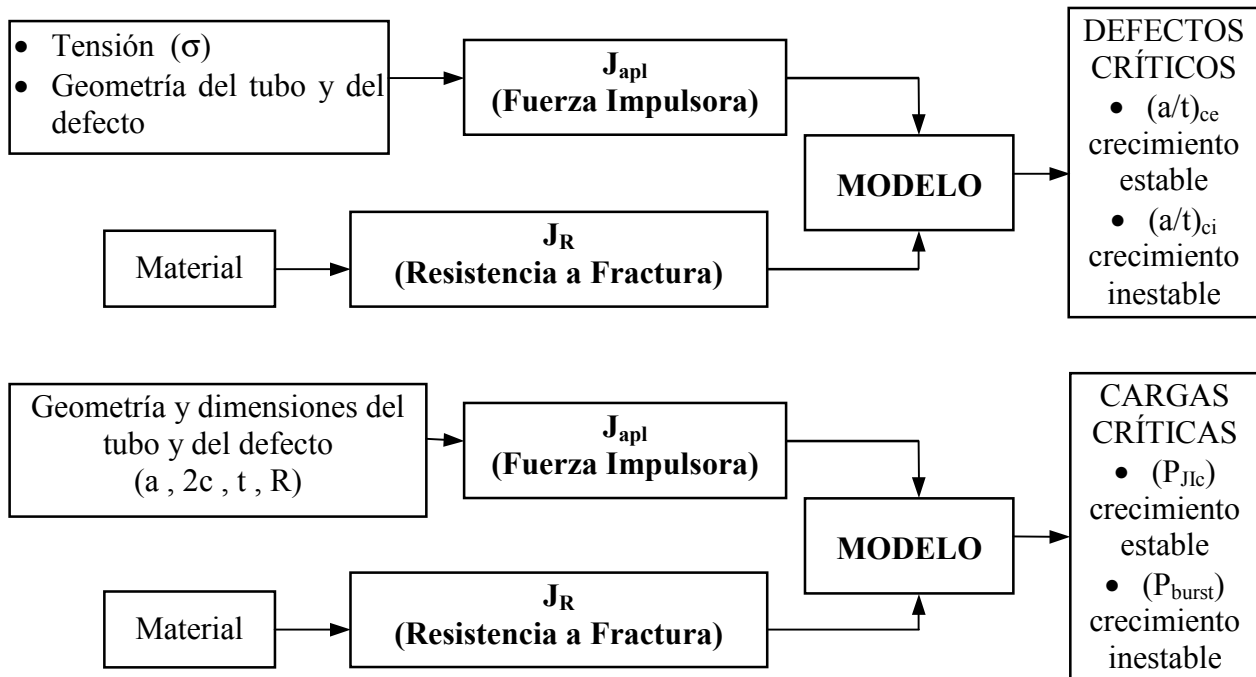
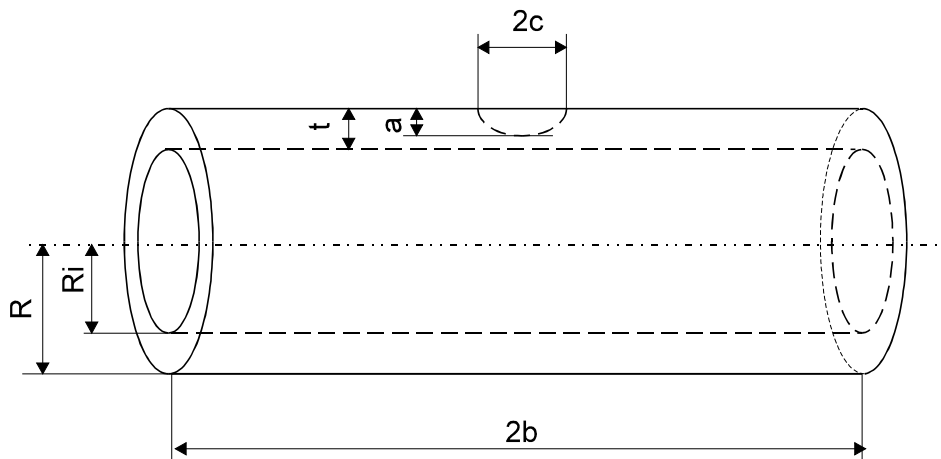


Figura 1: Valores de Entrada y Resultados de Salida del Modelo.



a;	Profundidad del defecto.	2c;	Largo del defecto	R;	Radio externo del tubo
Ri;	Radio interno del tubo	t;	Espesor del tubo	2b;	Largo del tubo

Figura 2: Forma de la Fisura en el Tubo

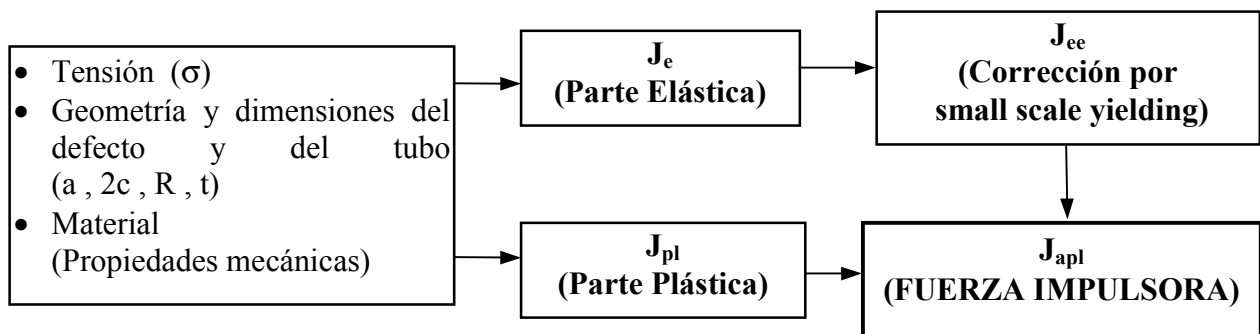


Figura 3: Valores de Entrada y Resultados de Salida en la Determinación de la Fuerza Impulsora (J_{apl})

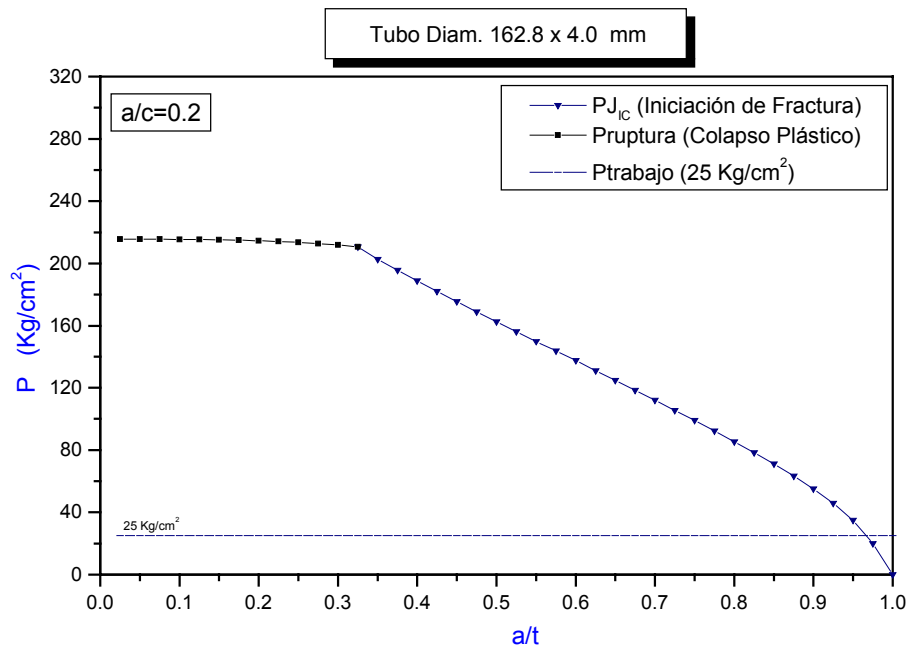


Figura 4: Curva de Presión Interna vs. Profundidad de Defecto/Espesor para $a/c = 0.2$.
(Tubo $\varnothing 162.8 \times 4$ mm)

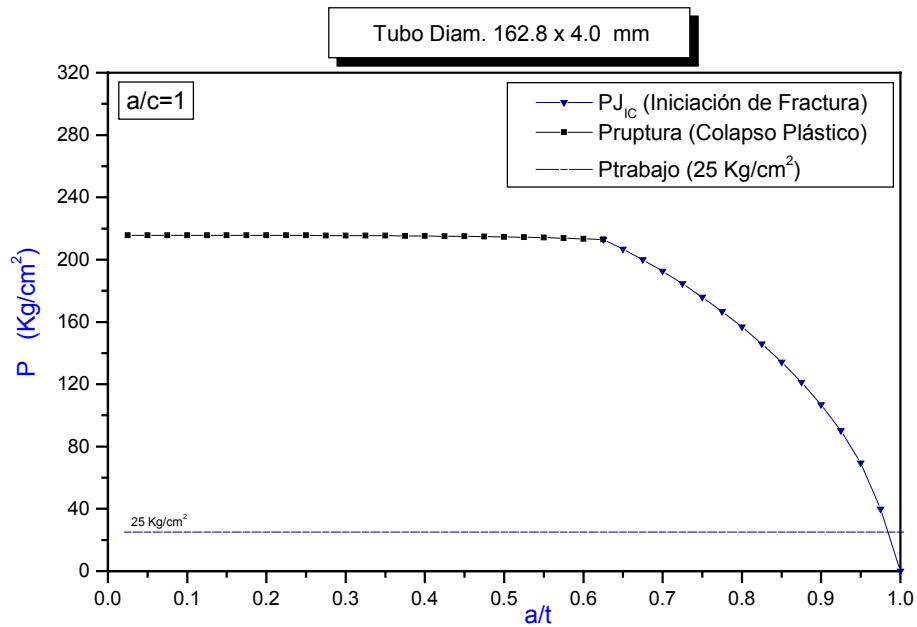


Figura 5: Curva de Presión Interna vs. Profundidad de Defecto/Espesor para $a/c = 1$.
(Tubo $\varnothing 162.8 \times 4$ mm)

APENDICES

Apéndice 1. Estimación de J Aplicado y Presiones Críticas para Defecto no Pasante

En la determinación del J_{apl} se emplea la teoría de Mecánica de Fractura Elasto-Plástica (EPFM) y el análisis se realiza en formas de fisuras semielípticas (Ref. [5] [8], [9], [11] y [12]).

El J_{apl} se determina por una contribución elástica, y una contribución plástica

$$J_{apl} = J_e + J_{pl}$$

J_e , J elástico.

J_{pl} , J plástico.

$$J_e = K_I [ae]^2 (1 - \mu^2) / E$$

Siendo:

$K_I [ae]$ Factor de intensidad de tensiones evaluado en ae (a efectivo).

μ , Módulo de Poisson.

E , Módulo de elasticidad longitudinal.

Para determinar el factor de intensidad de tensiones se utilizó la expresión de Raju-Newman para fisura semielíptica en el fondo de la fisura (Ref. [8]).

$$K_I [a] = (PRm / t) (\pi a / Q[a])^{0.5} F[a]$$

$$Q[a] = 1 + 1.464(a / c)^{1.64} \text{ para } a/c \leq 1 \quad \text{y} \quad Q[a] = 1 + 1.464(c / a)^{1.64} \text{ para } a/c > 1$$

$$F[a] = (M1[a] + M2[a](a / t)^2 + M3[a](a / t)^4)$$

$$M1[a] = 1.13 - 0.09(a / c)$$

$$M2[a] = -0.54 + 0.89 / (0.2 + a / c)$$

$$M3[a] = 0.5 - 1 / (a / c + 0.65) + 14(1 - a / c)^{24}$$

Siendo:

$K_I [a]$, Factor de intensidad de tensiones evaluado en a .

P , Presión aplicada.

Rm , Radio medio del tubo.

t , Espesor del tubo.

a , Profundidad del defecto.

c , Semilargo del defecto.

$$ae = a + ry \left(1 / \left(1 + (P / P_0)^2 \right) \right)$$

$$r_y = (1/(6\pi))(n-1)/(n+1)(K_I[a]/\sigma_0)^2$$

$$P_0 = (2/\sqrt{3})\sigma_0(t - a_{corr})/(R - a)$$

$$a_{corr} = a \left(1 - \left(1 + (2c)^2 / (2t^2) \right)^{-0.5} \right) / \left(1 - a/t \left(1 + (2c)^2 / (2t^2) \right)^{-0.5} \right)$$

Siendo:

- ae , Profundidad efectiva del defecto.
- a , Profundidad del defecto.
- r_y , Radio de la zona plástica en la punta de la fisura.
- P , Presión aplicada.
- P_0 , Presión de referencia.
- a_{corr} , Profundidad del defecto corregida por el efecto de c.
- t , Espesor del tubo.
- c , Semilargo del defecto.
- R , Radio exterior del tubo.
- $K_I[a]$, Factor de intensidad de tensiones evaluado en a.
- σ_0 , Tensión de fluencia.
- n , Exponente de Ramberg-Osgood.

Para determinar la parte plástica de J_{apl} se recurre a las expresiones del EPRI NP-1931 (Electric Power Research Institute) (Ref. [9]).

$$J_{pl} = \alpha \varepsilon_0 \sigma_0 a (1 - a/t) h1 \left(P / P_0 \right)^{n+1}$$

Siendo:

- α , Coeficiente de Ramberg-Osgood.
- n , Exponente de Ramberg-Osgood.
- ε_0 , Deformación a fluencia.
- σ_0 , Tensión de fluencia.
- a , Profundidad del defecto.
- t , Espesor del tubo.
- P , Presión aplicada.
- P_0 , Presión de referencia.
- $h1$, Función dependiente de R , t , a/t , n (Ref. [9]).

El criterio de crecimiento estable de un defecto esta dado cuando el J_{apl} iguala al J_{lc} .

$$J_{apl} = J_e + J_{pl} = J_{lc}$$

Para determinar la expresión que corresponde a ruptura por colapso plástico que se produce en especial para pequeños defectos que es preponderante sobre fractomecánica se utiliza la expresión de Kiefner (Ref. [10]).

$$P = \left(\sigma_{ref} t / Rm \right) (1 - a / t) / \left(1 - a / (M_t t) \right)$$

$$M_t = \left(1 + 1.255c^2 / (Rmt) - 0.0135c^4 / (Rmt)^2 \right)^{1/2}$$

Siendo:

a , Profundidad del defecto.

c , Semilargo del defecto.

$\sigma_{ref} = (\sigma_0 + \sigma_u) / 2$, Tensión de referencia (depende del material).

σ_0 , Tensión de fluencia.

σ_u , Tensión de rotura.

t , Espesor del tubo.

P , Presión aplicada.

Rm , Radio medio del tubo.

Mt , Factor geométrico de Folias.