

## APLICACION DE LA MECÁNICA DE FRACTURA AL SEGUIMIENTO DE GRIETAS DE CORROSION-TENSION EN UNA TUBERÍA DE 10" DE AISI-304.

Lapeña, J., González, J.

Instituto de Tecnología Nuclear  
CIEMAT  
Avenida Complutense, 22  
28040-MADRID

Resumen.- Los agrietamientos circunferenciales detectados en las tuberías de los circuitos de refrigeración de los reactores de agua en ebullición, tipo BWR, han sido atribuidos a procesos de corrosión intergranular bajo tensión y se han localizado en las zonas afectadas por el calor de soldadura. Mediante ensayos en laboratorio, en las mismas condiciones de presión y temperatura, se ha conseguido reproducir este tipo de grietas, con la misma estructura de las habidas en planta. Por ecuaciones de la mecánica de fractura se ha seguido la evolución de dichas grietas a lo largo del tiempo comparándolas con las medidas por ultrasonidos, comprobándose una buena correlación con los valores finales de las mismas, obtenidos después de abrir la tubería y medir las magnitudes reales.

Abstract.- The circumferential cracks detected in the cooling loops piping of the boiling water reactors (BWRs), have been ascribed to stress corrosion cracking mechanisms and they were observed in the heat affected zones of welds. In laboratory tests, at similar pressure and temperature conditions, this type of cracks have been reproduced with the same structure that in plant. Through fracture mechanic equations, the growing of cracks were followed and checked with ultrasonic inspection methods. A good correlation was found with the final cracks measured after opening the pipe.

### 1. INTRODUCCION

La producción de grietas intergranulares de corrosión-tensión en las tuberías de acero inoxidable AISI-304 de los reactores nucleares de agua en ebullición se debe a la conjunción de tres factores: la sensibilización del material por el calor de la soldadura con precipitación de carburos de cromo en los bordes de grano, las tensiones que actúan sobre la tubería y el carácter agresivo del agua con 200 ppb de oxígeno utilizada en este tipo de reactores.

Para conseguir en laboratorio este mismo tipo de grietas es necesario actuar sobre las tres variables señaladas, aplicadas a tuberías del mismo material.

### 2. PREPARACION DE LA TUBERÍA

La tubería de acero inoxidable austenítico AISI 304 utilizada tenía un diámetro de 10" ( $\phi=297\text{mm}$ ) y un espesor de 15 mm. Se partió de una longitud de 1,60 m, con cuatro segmentos de 400 mm unidos entre sí por tres soldaduras. La ensayada fue la superior. El proceso de soldadura fue GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) en las pasadas de raíz y SMAW (Shielded Metal Arc Welding) en el resto, con un aporte térmico elevado de 61 KJ/pulgada. Además, con el objetivo de simular las condiciones del material al final de su vida en operación, se sometió a la tubería a un tratamiento de sensibilización a baja temperatura (LTS), 500 °C durante 24 h, al aire, enfriamiento en horno, antes de las dos últimas pasadas.

La tubería se ha utilizado como autoclave, cerrándola mediante bridas adecuadas, con la instrumentación necesaria para la realización de los ensayos. En el interior de la misma y en las zonas afectadas por el calor de soldadura, se situaron unos dispositivos con el objeto de crear zonas de mala circulación de la disolución, que al favorecer la corrosión por "crevice" facilitasen el inicio de los agrietamientos. Este sistema presionaba unas almohadillas de la na de grafito sobre las zonas afectadas por el calor de soldadura, en ocho puntos.

3. GENERACION DE GRIETAS

La tubería-autoclave se alimentó con agua desionizada de un circuito [1] a una temperatura de 288 °C y una presión de 80 kg/cm². Para conseguir en el menor tiempo posible las grietas deseadas se utilizó un agua con un contenido de oxígeno alto, de 25 ppm.

El dimensionamiento de las grietas se realizó por medio de inspecciones por ultrasonidos, cada 400 horas aproximadamente.

Después de 1700 h de operación, al cabo de las cuales sólo había dos indicaciones de grietas sin confirmar, se cortó el tramo de tubería con la soldadura superior y se ensayó independientemente otras 2300 h. El resultado de las medidas por ultrasonidos se recogen en la tabla 1, donde puede apreciarse la existencia de varias grietas, la mayor con una profundidad de 5-6 mm y una longitud de 105 mm.

Tabla 1. Resultados de la inspección U.T. después de 4000 horas de operación. El lado (-) es el superior de la soldadura.

SOLDADURA SUPERIOR	SITUACIÓN	PROFUNDIDAD
LADO (-)	205-310	5-6 mm
LADO (-)	370-395	≈2 mm
LADO (-)	540-605	≈2 mm
LADO (+)	100-135	≤2 mm
LADO (+)	695-735	2-3 mm
LADO (+)	170 (*)	≈2 mm

(\*) Indicación longitudinal

4. PROPAGACIÓN DE GRIETAS

El ensayo de propagación de las grietas generadas anteriormente se realizó a una concentración de oxígeno en el agua de alimentación de 20 ppb. Estas son condiciones de "química alterativa", empleada en los reactores BWR durante los últimos años para frenar o ralentizar las grietas existentes [2].

Este ensayo se realizó en una máquina servohidráulica de 100 Tm de capacidad de carga, mediante la aplicación de una tensión constante de 350 kg/cm² simultáneamente con una tensión cíclica de 350 kg/cm² de valor máximo con un tiempo de subida de 1,5 horas, 5 horas de mantenimiento en el valor máximo y un tiempo de bajada

de 0,5 horas. La contribución axial de la presión interna, 80 kg/cm², fue de 356 kg/cm² con lo que el valor máximo de la tensión axial que soportaba la tubería era de 1056 kg/cm².

Al igual que en el caso anterior, se realizaron inspecciones por ultrasonidos cada 400 horas. El tiempo total de propagación fue de 2300 horas, durante las que no se detectó ningún aumento de las grietas, a excepción de las últimas 40 horas en las que ocurrió una contaminación de oxígeno del orden de 8 ppm, y el consiguiente aumento de las grietas, cuyos valores finales medidos por ultrasonidos se dan en la tabla 2.

Tabla 2. Localización y dimensión de las indicaciones después de 2318 horas de operación en agua con 200 ppb de O₂.

Indicación	Lado	Situación (mm)	Profundidad (mm)
1	-	186-310	7
2	-	370-395	4
3	-	540-605	2,5
1	+	100-135	5
2	+	683-735	3,5
3	+	175-191	-
4	+	175*	-

(\*) Indicación axial

Después de acabado el ensayo se abrieron algunas grietas, cortando la parte donde se encontraban y acabándolas de romper por fatiga al aire. La grieta mayor tenía un frente coherente con una profundidad máxima de 9 mm en su centro. Los ultrasonidos la habían dimensionado correctamente en longitud y con un ligero error por defecto en profundidad. Las demás grietas más pequeñas, aunque localizadas correctamente en longitud, fueron claramente subdimensionadas en profundidad con errores de hasta un 100 %, debido a que eran irregulares y muy ramificadas, lo que traía consigo la ausencia de picos de difracción claros en la medida por ultrasonidos.

5. TENSIONES RESIDUALES

Dada la gran influencia que tienen las tensiones residuales de soldadura en el crecimiento de las grietas de corrosión bajo tensión, se ha realizado una medida de las mismas en las superficies interior y exterior, por medio de bandas extensométricas.

La técnica de medida ha sido la del "hole-drilling" (orificio ciego) basada en la perforación de un pequeño agujero, que libera las tensiones existentes en la superficie. Estas tensiones se miden en unas rosetas compuestas de tres bandas extensométricas que confluyen en el orificio [3]

Por los valores obtenidos, reflejados en la tabla 3, se deduce que las tensiones perpendiculares a la soldadura son de tracción en el interior de la tubería y de compresión en el exterior, lo que permite pensar en un perfil de tensiones residuales lineal a lo largo del espesor de la tubería.

Tabla 3. Tensiones perpendiculares a la soldadura (axiales).

Nº de roseta	posición	(Ksi)
2	exterior	-58
10	exterior	-37
11	exterior	-38
4	interior	61
5	interior	-4
6	interior	40
7	interior	-4
9	interior	51

Los valores máximos de la tensión perpendicular al cordón serían del orden de 40 a 60 ksi con tracción en la superficie interior y compresión en la exterior.

## 6. APLICACION DE LA MECÁNICA DE FRACTURA

La aplicación de los conceptos de la mecánica de fractura a las grietas reales en la zona termicamente afectada por el calor de soldadura, plantea dificultades dado que en el ensayo realizado se han obtenido varias grietas de diferentes longitudes y profundidades, la mayoría de ellas con ramificaciones y frente muy irregular, por lo que no es posible el cálculo teórico en estos casos [4].

Se puede calcular el efecto aislado de la grieta mayor, que tiene forma semi-elíptica [5], pero es más conservativo el suponer que existe una grieta de la misma profundidad, de tipo circular (360°), a lo largo de todo el perímetro de la tubería.

Los factores de intensidad de tensiones que contribuyen al progreso de la grieta son los debidos a las tensiones residuales, la presión del agua y la tracción de la máquina de ensayo en el caso de emplearse esta. Se ha comprobado que el gradiente de temperatura a través de la pared era muy pequeño por lo que no se consideran las tensiones térmicas.

El factor de intensidad de tensiones causado por las tensiones residuales de soldadura se ha calculado haciendo uso de las funciones de influencia [6], [7] que para grieta circular de 360° con una relación de radio medio/espesor = 10 (en este caso vale 9,4), viene dado por:

$$K_{IR} = \sigma_1 \sqrt{t} \sqrt{\pi a} (i_0 - 2\alpha i_1) \quad (1)$$

donde:

$$i_0 = 1,122 + 0,3989\alpha + 1,5778\alpha^2 + 0,6049\alpha^3$$

$$i_1 = 0,683 + 0,115\alpha - 0,7556\alpha^2 + 0,1667\alpha^3$$

$\sigma_1$  = tensión residual en la superficie interior

$$\alpha = a/t$$

a = profundidad de grieta

t = espesor de la pared

Se ha supuesto una distribución de tensiones residuales lineal a través de la pared, lo que está de acuerdo con la experiencia [8] y con los valores obtenidos en el apartado 5. Si la distribución fuera parabólica, lo que es habitual

en tuberías de paredes gruesas, intervendrían los demás coeficientes ( $i_2, i_3, i_4$ ). La presión del agua produce una tensión de membrana constante a través del espesor de la pared. El factor de intensidad de tensiones para la grieta considerada es:

$$K_{IP} = (PR/2t) \sqrt{t} \sqrt{\pi a} (1,122 + 0,3989\alpha + 1,5778\alpha^2 + 0,6049\alpha^3) \quad (2)$$

donde: p = presión

R = radio medio

La contribución de la máquina de ensayos, empleada solamente en el periodo de propagación de las grietas, produce también una tensión constante, contribuyendo con un factor de intensidad de tensiones:

$$K_{IT} = T \sqrt{t} \sqrt{\pi a} (1,122 + 0,3989\alpha + 1,5778\alpha^2 + 0,6049\alpha^3) \quad (3)$$

donde: T = tensión producida por la máquina.

La contribución de todos los factores al crecimiento de la grieta será la suma de las ecuaciones (1), (2) y (3), con lo que el coeficiente de intensidad de tensiones total  $K_I$  será:

$$K_I = K_{IR} + K_{IP} + K_{IT} \quad (4)$$

### 6.1. Periodo de generación de grietas

En este caso, al no existir la tracción de la máquina en la ecuación (3),  $K_{IT} = 0$ , y los factores de intensidad de tensiones, según la profundidad de la grieta, serán los indicados en la figura 1.

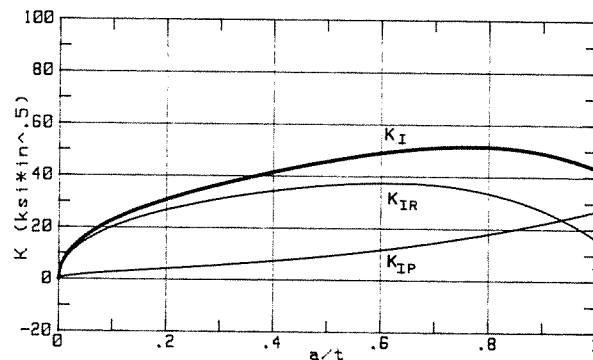


Fig. 1. Factores de intensidad de tensiones en el periodo de generación de grietas.

Los valores de crecimiento de grietas para altos contenidos de oxígeno como los que hubo en este periodo, se puede expresar por la ecuación [8]:

$$\frac{da}{dt} = 2,241 \times 10^{-12} K^{5,4} \quad (5)$$

En la figura 2 se expresa esta relación. Como puede verse, partiendo de una grieta de 0,5 mm y suponiendo una tensión residual de soldadura en la superficie interior algo mayor de 45 ksi, puede justificarse el aumento de la grieta hasta 5-6 mm al cabo de 4000 h y que no fuera detectada claramente en las primeras 1700 horas pues el crecimiento al principio es muy lento y la detección por ultrasonidos tiene un umbral de casi 2 mm.

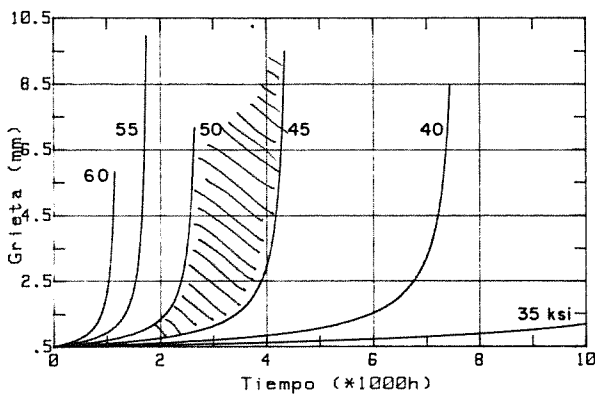


Fig. 2. Crecimiento de grieta durante la generación.

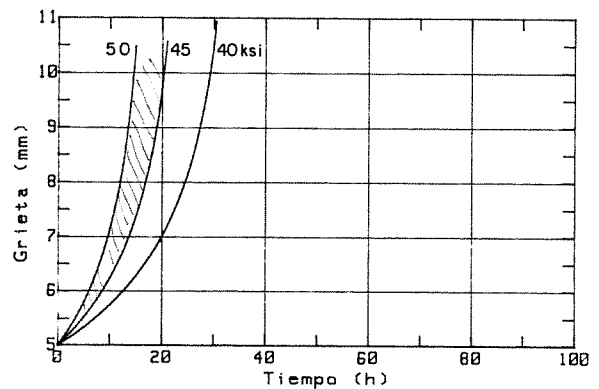


Fig. 4. Propagación de grieta durante la contaminación de oxígeno.

6.2. Período de propagación de grietas

Tal como se explica en el apartado 4, el período de propagación se realizó a tracción en una máquina de ensayos mecánicos, con lo que hay que incluir el factor de intensidad de tensiones  $K_{IT}$  dentro de la ecuación (4). El resultado se da en la figura 3.

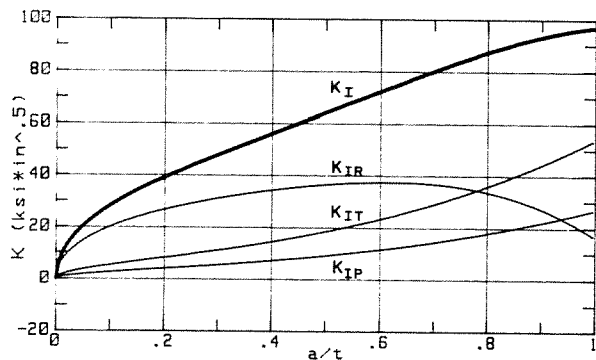


Fig. 3. Factores de intensidad de tensiones en el período de propagación de grietas

Durante esta fase, en casi 2300 horas, no se detectó un aumento de las grietas debido al bajo nivel de oxígeno empleado (20 ppb). Si se notó sin embargo en las últimas horas por la contaminación del agua de alimentación. Puede considerarse como representativo de este incidente la existencia de 8 ppm de oxígeno como media durante 20 horas, puesto que en las 40 horas de esta fase se fue purificando el agua desde 8 ppm hasta casi 20 ppb.

En esta última parte puede aplicarse también la ecuación (5). Como puede verse en la figura 4 y con la misma suposición de la tensión residual de soldadura en la superficie interior, bastan 20 horas para que la grieta crezca hasta el valor medido, del orden de 9 mm.

7. CONCLUSIONES

Se ha comprobado la buena concordancia de las ecuaciones de la mecánica de fractura, aplicadas al caso real de una grieta circunferencial interior en tubería de 10" producida por corrosión-tensión. No obstante es necesario hacer constar la gran influencia que tiene la tensión residual de soldadura en la superficie interior y la distribución de aquella a través del espesor de la pared. Aunque parece razonable en estos espesores una distribución lineal, avalada por la experiencia, se han comprobado también valores que disminuyen muy rápidamente en las proximidades de la superficie interior [9]. Sin embargo, aplicando a esta tubería una distribución de tensiones residuales de forma parabólica, que es lo normal en espesores mayores de 1", hemos obtenido teóricamente valores de crecimiento de grieta mucho más pequeños, del orden de 2 mm, comparados con el real de 9 mm.

Por lo dicho, pensamos que la aplicación teórica a los casos reales debe pasar necesariamente por una comprobación experimental de las tensiones residuales axiales en todo el espesor de la tubería en la zona térmicamente afectada por el calor de soldadura.

8. REFERENCIAS

[1] Esteban, F., Lapeña, J. y Hernández, F. (1987) "Instalación para la Investigación sobre Corrosión Intergranular bajo Tensión en Reactores tipo BWR" XIII Reunión anual de la S.N.E. La Toja.

[2] Fox, M.J. (1989) "A Review of Boiling Water Reactor Water Chemistry" NUREG/CR-5115.

[3] Ajovalasit (1979) "Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Method: Influence of Hole Excentricity" Journal of Strain Analysis. Vol. 14, No 4.

- [4] Gómez, M<sup>a</sup> D., Lapeña, J., Hernández, F., Cas-  
taño, M<sup>a</sup> L. y Esteban, F. (1989) "Proyecto  
de Investigación sobre Corrosión bajo Ten-  
sión. Informe Final CIEMAT, Junio.
- [5] Dedhia, D.D. y Harris, D.O. "Stress-Intensi-  
ty Factors for Surface Cracks in Pipes: A -  
Computer Code for Evaluation by Use of In-  
fluence Functions"(1982) EPRI-NP-2425.
- [6] Shack, W.J. et al (1983) "Environmentaly a-  
ssisted Cracking in Light Water Reactors:  
Annual Report, Octubre 1981-September 1982"  
NUREG/CR-3292.
- [7] Hazelton, W.S. "Technical Report on Material  
Selection and Processing Guidelines for BWR  
Coolant Pressure Boundary Piping"(1986).  
NUREG-0313, Rev. 2.
- [8] Kassir, M., Sharma, S., Reich, M. y Chang,  
M.T. (1985) "An Evaluation of Stress Corro-  
sion Crack Growth in BWR Piping Systems"  
NUREG/CR-4221.
- [9] (1980) "Measurement of residual Stresses in  
Type 304 304 Stainless Steel Piping Butt -  
weldments" EPRI-NP-1413.