

# INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE EVALUACIÓN DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL

## TRABAJO 1: FRACTURA

La operación de vasijas a presión de reactores nucleares se controla de acuerdo a las indicaciones recogidas en las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento. En este documento, entre otros aspectos, se contempla el cálculo de las curvas límite de operación o curvas P-T (Presión-Temperatura), las cuales, para una determinada zona de la vasija y estado de irradiación, ofrecen los máximos valores admisibles de la Presión de Operación en función de la Temperatura de modo que no exista riesgo de rotura frágil en la pared de la vasija. La Figura 1 muestra un ejemplo de estas curvas.

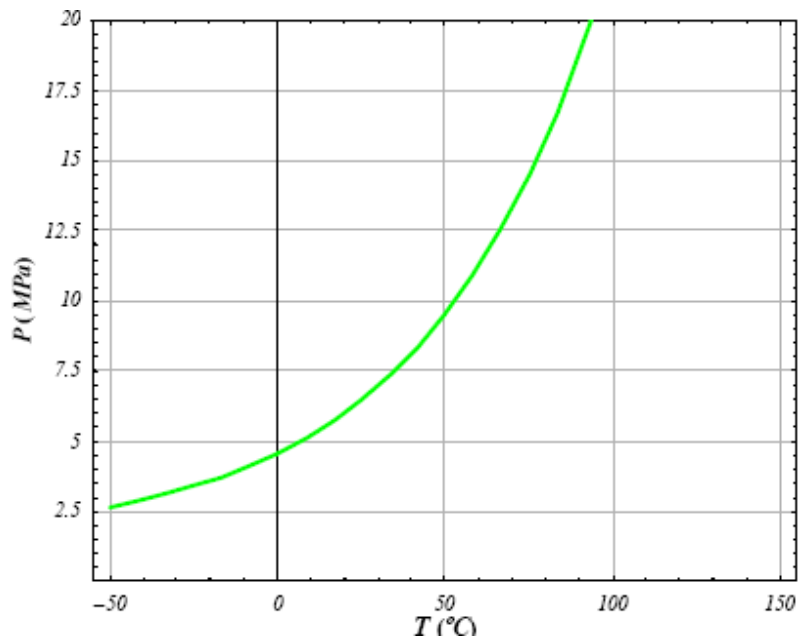


Figura 1. Ejemplo de curva límite de operación

Este trabajo consistirá en calcular, de acuerdo al procedimiento FITNET y haciendo uso de los Diagramas de Fallo, las curvas P-T de la vasija de un reactor nuclear.

En la zona de irradiación más severa, conocida como *beltline*, la vasija puede asimilarse a un cilindro. Las características geométricas de la misma se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1: Características geométricas de la vasija

Radio interior, $R_i$	300 cm
Radio exterior, $R_e$	330 cm
Espesor de pared	30 cm

La legislación vigente en el ámbito nuclear obliga a suponer que existe una grieta semielíptica, con semieje menor igual a un cuarto del espesor de la vasija y semieje mayor igual a 1.5 veces el espesor de pared (Figura 2).

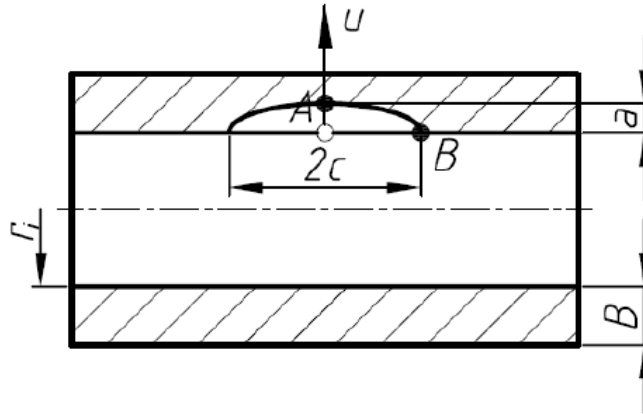


Figura 2: Esquema de la geometría de la grieta

Los datos relativos al material de la vasija se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Características del material

Límite elástico, (función de la temperatura)	$\sigma_y = 410 + 35 \cdot \exp(-0.0135 \cdot T)$ ( $\sigma_y$ en MPa, T en °C)
$T_R$ (año 0)	-50° C
$T_R$ (año 40)	0° C

Se han de calcular y representar las curvas límite de operación P-T para el momento de puesta en funcionamiento de la planta, y para la edad de 40 años (vida de diseño). Cada curva se definirá con al menos 5 puntos.

Por otra parte, si las condiciones normales de operación son de  $P=10$  MPa. y  $T=100^\circ\text{C}$ , estudiar si la central operará en condiciones de seguridad a los 40 años, y en tal caso estimar el coeficiente de seguridad. Valorar la variación del coeficiente de seguridad con el paso del tiempo.

La solución habrá de entregarse con todos los pasos previos que conducen a la obtención de la misma.

## MATERIAL DE APOYO

### 1. DIAGRAMAS DE FALLO

En el apartado de ejemplos (ver Contenidos de la asignatura) se pueden encontrar casos de utilización de los diagramas de fallo (FAD), que consisten en una representación adimensional según unos ejes  $K_r$  y  $L_r$ . Estos parámetros pueden definirse como:

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}}$$
$$L_r = \frac{P}{P_y}$$

Donde  $K_I$  es el Factor de Intensidad de Tensiones,  $K_{mat}$  es la tenacidad del material,  $P$  es la carga soportada por el componente y  $P_y$  es la carga límite que provocaría el colapso plástico del mismo.

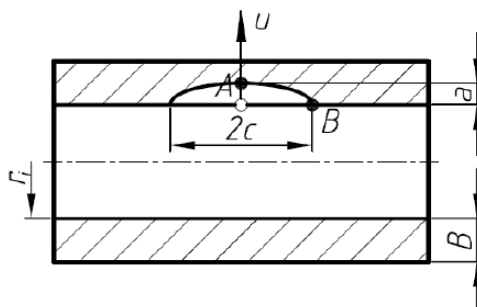
Si la representación de la situación de un componente estructural queda en la región comprendida entre los ejes y la llamada Línea de Fallo, entonces dicho componente estará seguro ante la rotura, no así si queda fuera de esa región.

Para este caso, puede emplearse la siguiente definición para la línea de fallo (correspondiente a la opción 1 del FITNET):

$$K_r = [1 + 0.5(L_r)^2]^{-1/2} \quad L_r < 1$$
$$K_r = 0 \quad L_r > 1$$

### 2. FACTOR INTENSIDAD DE TENSIONES ( $K_I$ )

El procedimiento FITNET dispone de un compendio de soluciones para diversas geometrías y estados de carga. En este caso se deberá acudir a la de un cilindro con una grieta tal y como se ha definido anteriormente:



El factor de intensidad de tensiones para la situación del presente trabajo vendrá dado por la expresión:

$$K_I = M_m \sigma \sqrt{\pi a}$$

En esta fórmula debes recordar que  $\sigma$  es la tensión circunferencial en la pared del cilindro y no directamente la presión (utiliza por ejemplo la formula de los tubos delgados para pasar de una a otra).  $M_m$  es un factor geométrico que se puede estimar de la siguiente tabla:

$a/2c = 0.5, B/r_i = 0.1$					$a/2c = 0.5, B/r_i = 0.25$				
$a/B$	$M_m(A)$	$M_b(A)$	$M_m(B)$	$M_b(B)$	$a/B$	$M_m(A)$	$M_b(A)$	$M_m(B)$	$M_b(B)$
0.0	0.663	0.663	0.729	0.729	0.0	0.663	0.663	0.729	0.729
0.2	0.647	0.464	0.726	0.676	0.2	0.643	0.461	0.719	0.669
0.4	0.661	0.291	0.760	0.649	0.4	0.656	0.288	0.745	0.638
0.6	0.677	0.110	0.804	0.623	0.6	0.677	0.107	0.785	0.610
0.8	0.694	-0.080	0.859	0.599	0.8	0.704	-0.079	0.838	0.585
$a/2c = 0.2, B/r_i = 0.1$					$a/2c = 0.2, B/r_i = 0.25$				
0.0	0.951	0.951	0.662	0.662	0.0	0.951	0.951	0.662	0.662
0.2	0.932	0.698	0.676	0.632	0.2	0.919	0.688	0.669	0.627
0.4	1.016	0.519	0.768	0.651	0.4	0.998	0.506	0.759	0.644
0.6	1.109	0.316	0.896	0.674	0.6	1.110	0.311	0.889	0.666
0.8	1.211	0.090	1.060	0.700	0.8	1.255	0.103	1.060	0.694
$a/2c = 0.1, B/r_i = 0.1$					$a/2c = 0.1, B/r_i = 0.25$				
0.0	1.059	1.059	0.521	0.521	0.0	1.059	1.059	0.521	0.521
0.2	1.062	0.806	0.578	0.548	0.2	1.045	0.791	0.577	0.547
0.4	1.260	0.677	0.695	0.597	0.4	1.240	0.663	0.698	0.599
0.6	1.500	0.515	0.876	0.660	0.6	1.514	0.515	0.887	0.665
0.8	1.783	0.320	1.123	0.737	0.8	1.865	0.348	1.144	0.745
$a/2c = 0.05, B/r_i = 0.1$					$a/2c = 0.05, B/r_i = 0.25$				
0.0	1.103	1.103	0.384	0.384	0.0	1.103	1.103	0.384	0.384
0.2	1.172	0.897	0.451	0.429	0.2	1.153	0.881	0.451	0.428
0.4	1.494	0.834	0.582	0.503	0.4	1.470	0.816	0.585	0.504
0.6	1.985	0.765	0.820	0.623	0.6	2.003	0.765	0.830	0.627
0.8	2.737	0.689	1.219	0.810	0.8	2.864	0.749	1.242	0.819
$a/2c = 0.025, B/r_i = 0.1$					$a/2c = 0.025, B/r_i = 0.25$				
0.0	1.120	1.120	0.275	0.275	0.0	1.120	1.120	0.275	0.275
0.2	1.231	0.946	0.335	0.318	0.2	1.211	0.929	0.334	0.318
0.4	1.701	0.971	0.469	0.406	0.4	1.674	0.950	0.471	0.407
0.6	2.619	1.080	0.765	0.584	0.6	2.285	1.079	0.774	0.587
0.8	4.364	1.301	1.374	0.919	0.8	3.163	1.081	1.400	0.928

Como observarás hay 2 valores de  $M_m$  en función de donde se quiera calcular el factor de intensidad de tensiones (puntos A y B). En el cálculo, considera el punto A. Si en la tabla anterior no aparece el valor exacto que necesitas, puedes interpolar linealmente para obtenerlo.

La normativa nuclear indica asimismo que se aplique además a este término un factor de seguridad igual a 2.

### 3. TENACIDAD A FRACTURA ( $K_{mat}$ )

Para estimar la variación de la tenacidad con la temperatura se hará uso del concepto de la Curva Patrón (*Master Curve*) que tiene la siguiente expresión:

$$K_{mat} = 20 + (11 + 77 \cdot \exp[0.019 \cdot (T - T_R)]) \left\{ \ln \left( \frac{1}{1 - P_f} \right) \right\}^{0.25} \quad (MPa \cdot m^{1/2})$$

Donde T es la temperatura (en °C),  $T_R$  es la temperatura de referencia (en °C), característica del material para cada estado de irradiación, y  $P_f$  es la probabilidad de fallo (en el análisis tómesese una probabilidad de fallo del 1%, en la fórmula 0.01). Esta formulación es de tipo estadístico, y escoger una determinada probabilidad de fallo

implica que existirá esa determinada probabilidad de que la tenacidad sea inferior a la que ofrece la expresión.

Razonar si, dado que se tomará una probabilidad de fallo del 1% en el cálculo de la tenacidad a fractura, existe esa misma probabilidad de que la vasija sufra una rotura frágil aunque las condiciones de operación estén en el lado favorable de las curvas P-T.

#### 4. CARGA LÍMITE

De nuevo el procedimiento FITNET ofrece soluciones para diversas geometrías. La correspondiente a este caso es:

**Solution:**

$$\alpha = \frac{a}{t}, \quad \eta = \frac{t}{r_m}, \quad \phi = \frac{a}{c}$$

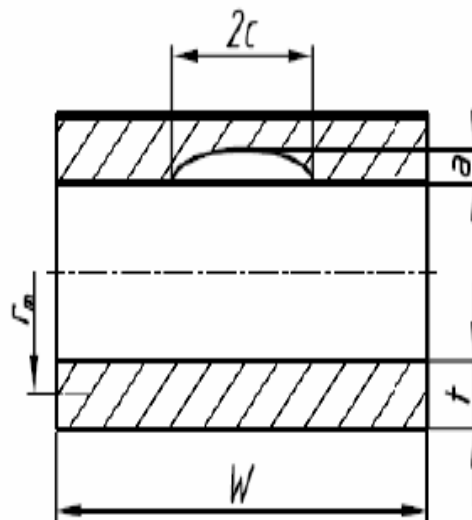
(a) Global solutions:

(i) Without defect-face pressure:

$$\frac{P_e}{R_e} = \frac{\alpha\eta}{\left(1 - \frac{1}{2}\eta\right)M_g} + \ln\left(\frac{1 + \frac{1}{2}\eta}{1 - \frac{1}{2}\eta + \alpha\eta}\right)$$

where

$$M_g = \sqrt{1 + 1.05 \frac{\alpha\eta}{\phi^2 \left(1 - \frac{1}{2}\eta\right)}}$$



La nomenclatura es algo distinta a la utilizada anteriormente. La carga límite es  $P_e$  (generalmente se expresa como  $P_y$ ) que en este caso sí que es directamente la presión, mientras que  $R_e$  se refiere al límite elástico.

#### PISTAS Y CONSEJOS PARA EMPEZAR

Las curvas límite de operación marcan (como su nombre indica) el LÍMITE entre una situación segura y la rotura del componente, por tanto, ¿Dónde tendrás que buscar en el FAD los puntos que definirán las curvas P-T?

Definir las curvas en el rango de P desde 5 a 25 MPa.

¡Ojo con las unidades!