

Criterios de diseño con tolerancia de daño-prevención de fallas catastróficas

Como una tercera etapa, en el grupo de investigación "Tratamientos Termoquímicos de los Aceros" se ha venido trabajando en la optimización del tratamiento térmico con criterio de tolerancia de daño en aceros de construcción de elementos de máquinas.

En este artículo apoyándose en unos primeros resultados experimentales y en conceptos de mecánica de fractura se describen recomendaciones de diseño con tolerancia de daño y se muestra cómo en la selección de un acero y de su tratamiento térmico se debe hacer un cuidadoso balance de resistencia-tenacidad de fractura de acuerdo a un riesgo de falla aceptable.

HECTOR HERNANDEZ A.
Ingeniero Mecánico
IEI. Profesor Asociado,
Universidad Nacional.

Pág. 42-53
Ingeniería e Investigación
Volumen 4 - Nº 2
Trimestre 1 de 1987

1. INTRODUCCION

Frecuentemente elementos estructurales no fallan por incumplir con una especificación química o microestructural sino por la presencia de defectos como porosidades, inclusiones y en particular grietas que por su severidad producen una intensificación extrema de esfuerzos en sus puntas, situación que reduce la capacidad de soporte de carga, especialmente notable en aceros de alta resistencia.

Varias son las fuentes potenciales¹ de introducción o generación de grietas o defectos que actúan como grietas; desde cuando el metal se encuentra en estado líquido, donde se define la concentración de inclusiones, hasta cuando un elemento estructural se encuentra en servicio donde fisuras pueden ser generadas por cargas de fatiga, inusitadas cargas elevadas de impacto o fenómenos de corrosión bajo tensión, pasando por defectos de laminación, grietas originadas por contracciones o expansiones térmicas o por cambios de estructura interna, por ejemplo, grietas de temple, rectificado agresivo en aceros endurecidos, práctica inapropiada de soldadura. En el análisis del efecto de una grieta en la capacidad de soporte de carga se debe hacer mediante conceptos de factor de intensidad de esfuerzos — tenacidad de fractura, puesto que por una parte el factor de intensidad de esfuerzos cuantifica el estado complejo de esfuerzos elástico-plásticos en extremos de grietas y por otra la tenacidad de fractura es su valor crítico de crecimiento de dichas grietas.

Los criterios de tolerancia de daño permiten la operación de elementos fisurados sin que se presente una falla catastrófica por fractura del elemento, combinando conceptos de tenacidad de fractura, resistencia residual y métodos de inspección.

Por la acción cooperativa de cargas estáticas y medio corrosivo o cargas fluctuantes de fatiga, grietas preexistentes pueden crecer a una rapidez creciente, hasta cuando estas adquieren un tamaño crítico de falla (figura 1).

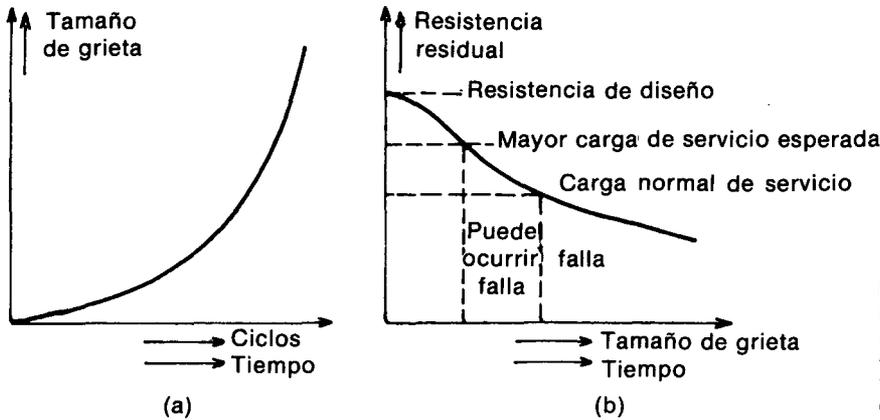
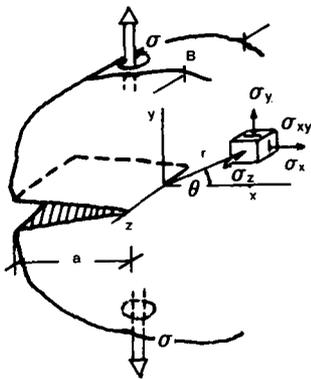


FIGURA 1. Ilustración esquemática de: (a) Crecimiento de grietas; en la medida que aumenta su magnitud, a, aumenta la rapidez de crecimiento. (b) Resistencia residual, al aumentar el tamaño de la grieta se reduce el esfuerzo crítico de falla.

2. CONCEPTOS DE MECANICA DE FRACTURA-TENACIDAD DE FRACTURA

Cuando los desplazamientos de las superficies de una grieta son perpendiculares al plano de grieta por acción de un esfuerzo nominal, σ , el campo de esfuerzos linealmente elásticos en torno de una grieta es dado siempre por las expresiones:



$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$\sigma_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$\tau_{xy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.1)$$

$\sigma_z = 0$, Estado de esfuerzos plano.

$\sigma_z = \sqrt{(\sigma_x + \sigma_y)}$, Estado de deformación plana.

Donde: K es conocido como factor de intensidad de esfuerzos y en general se expresa como: (apéndice)

$K = \beta \sigma \sqrt{\pi a}$ (2.2)

- σ es el esfuerzo nominal perpendicular al plano de la grieta.
- r, θ son las coordenadas polares del elemento de material en consideración.
- β es un factor adimensional que depende de la geometría y tamaño de pieza.
- a es tamaño de grieta cuando tiene solo un borde, mientras que cuando la grieta tiene dos extremos a es la semilongitud.

Las expresiones (2.1) están diciendo que cerca del extremo de grieta se tienen esfuerzos muy elevados, pero en realidad estos se ven limitados porque al alcanzarse condiciones de límite elástico, el material comienza a fluir plásticamente.

Aplicando el criterio de fluencia de Von Mises y como una primera aproximación se llega a que el tamaño de la zona plástica para $\theta = 0^\circ$ es dado por (figura 2):

Condición de esfuerzo plano,

$$[r_p] = \frac{K^2}{2\pi \sigma_{ys}^2} \quad (2.3)$$

$\theta = 0^\circ$

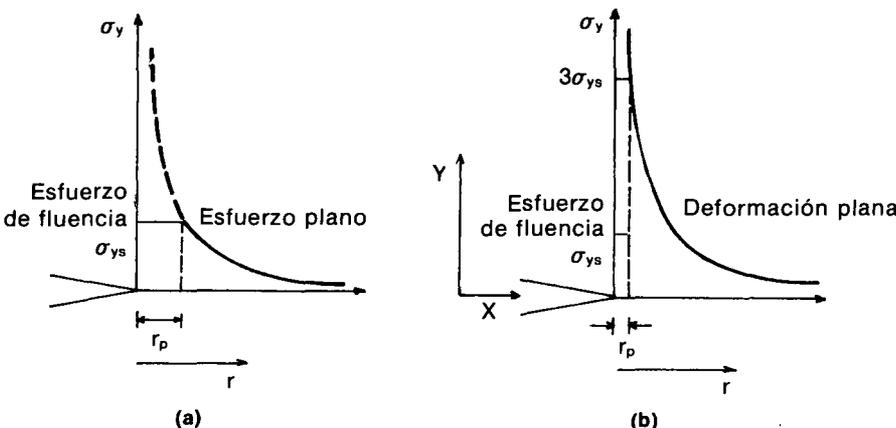


FIGURA 2. Ilustración esquemática de la zona plástica y distribución aproximada de esfuerzos. Por el complejo estado de esfuerzo la condición de fluencia plástica es dada por el criterio de fluencia de Von Mises o Tresca. (a) Estado de esfuerzo plano y (b) Estado de deformación plana.

Condición de deformación plana,

$$[r_p] = \frac{K^2}{18\pi \sigma_{ys}^2} \quad (2.4)$$

$$\theta = 0^\circ$$

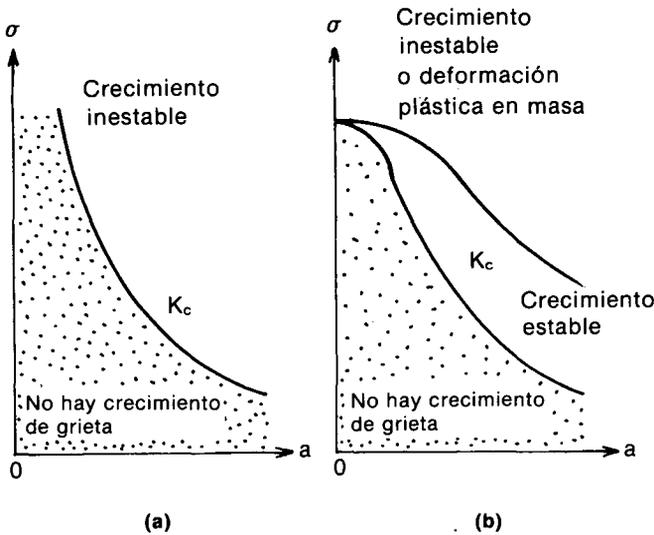


FIGURA 3. Relación entre esfuerzo y magnitud de grieta en crecimiento de grieta. (a) crecimiento inestable y (b) crecimiento estable.

Se encuentra que cuando K adquiere un valor crítico K_c , conocido como *Tenacidad de Fractura*, se presenta ya sea un súbito crecimiento inestable de grieta cuando prevalecen condiciones de deformación plana (materiales de alta resistencia y/o secciones gruesas) o un crecimiento estable en materiales tenaces de baja resistencia (figura 3).

El nivel de K_c se alcanza por una combinación de esfuerzo, σ y una magnitud de grieta, a , por ejemplo para un tamaño de grieta a_0 se tendrá propagación de grieta cuando (figura 4):

$$\sigma_c = K_c / \beta \sqrt{\pi a_0} \quad (2.5)$$

En el extremo de grieta se tiene una distribución de deformación plástica como se muestra en la

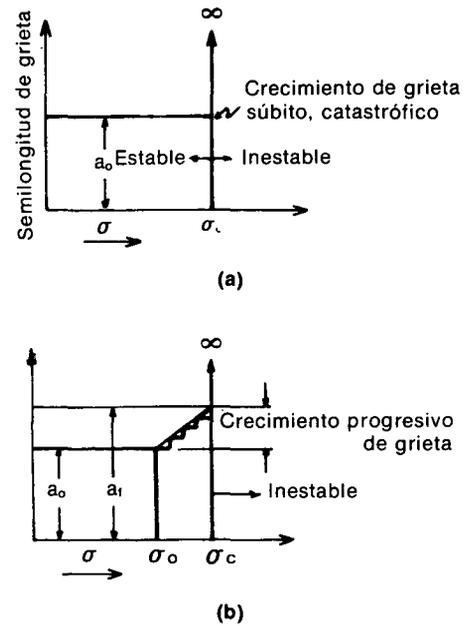


FIGURA 4. (a) Crecimiento inestable de grieta de tamaño inicial a_0 cuando el esfuerzo σ alcanza el valor σ_c , [$K = K_c$] (b) Crecimiento estable de grieta, comienza cuando $\sigma = \sigma_0$.

figura 5. En las superficies libres laterales necesariamente se tiene condición de esfuerzo plano, $\sigma_z = 0$, mientras que hacia el centro se tiene condición de deformación plana con un menor tamaño de zona plástica. Luego la cantidad de deformación plástica depende del estado prevaleciente de esfuerzo plano o deformación plana. Para espesores gruesos prevalece estado de deformación plana mientras que para espesores delgados prevalece el estado de esfuerzo plano; esto se traduce en que para espesores gruesos se obtienen bajos valores de tenacidad de fractura (figura 6).

Se ha encontrado experimentalmente que para espesores $B \geq 2.5(K_c/\sigma_{ys})^2$ la tenacidad de fractura toma un valor mínimo que se hace independiente del espesor y viene a ser una *propiedad del material* conocida como Tenacidad de Fractura en estado de deformación plana, K_{Ic} (figura 7).

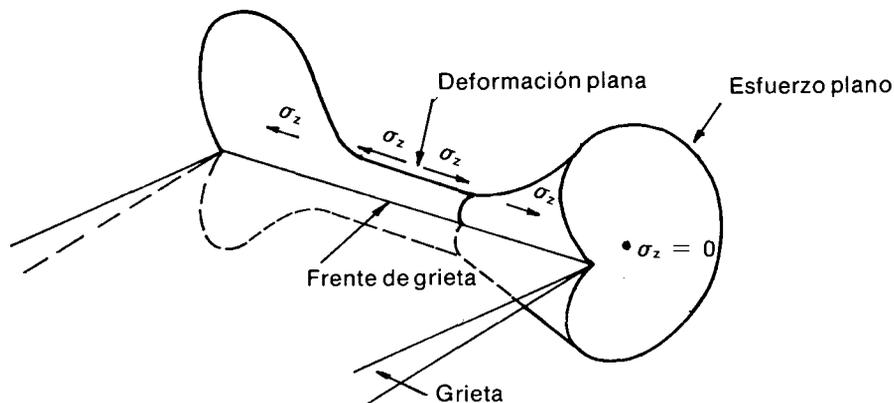


FIGURA 5. Zona plástica actual en extremo de grieta.

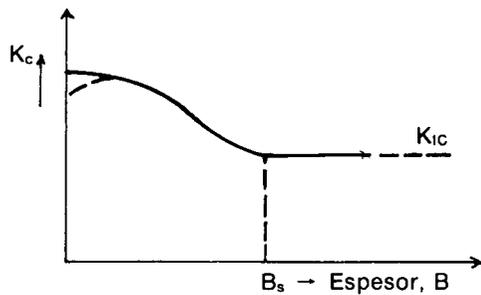


FIGURA 6. Tenacidad de fractura en función del espesor. Para un espesor B mayor que Bs se obtiene el valor mínimo Kic que corresponde a un estado de deformación plana.

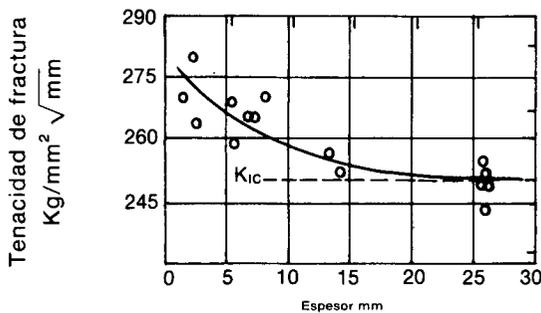


FIGURA 7. Efecto del espesor de probeta de ensayo en la tenacidad de fractura, Kc, en acero SAE 4340 tratado térmicamente a esfuerzo de fluencia de 147 kg/mm², [1].

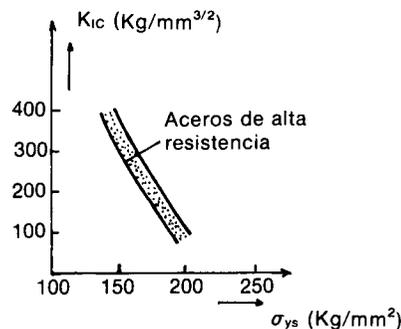


FIGURA 8. Tenacidad de fractura como una función de la resistencia a fluencia para aceros estructurales de alta resistencia [2].

En aceros estructurales de alta resistencia se encuentra que Kic varía inversamente con la resistencia a fluencia, σ_{ys} , como se muestra en la figura 8.

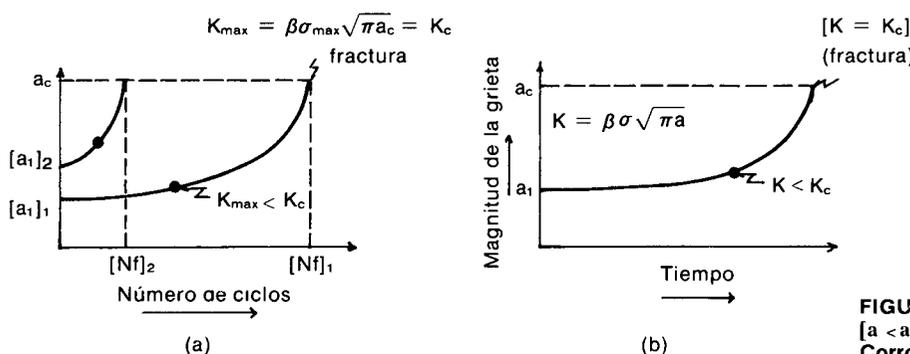


FIGURA 9. Crecimiento de grietas subcríticas [$a < a_c$] a un valor crítico, a_c . (a) Fatiga, (b) Corrosión bajo tensión.

3. CRECIMIENTO DE GRIETAS SUBCRITICAS

Por acción de cargas de fatiga o acción cooperativa de carga estática y un medio corrosivo, grieta de tamaño subcrítico $a < a_c$, [$K < K_c$] pueden crecer con el transcurrir de ciclos de fatiga o tiempo de operación a un tamaño crítico de falla en que $a = a_c$, $K = K_c$, (figura 9).

Como lo sugiere la figura 9 (a) la rapidez de crecimiento de grietas por fatiga da/dN depende de tanto del esfuerzo como la magnitud de grieta:

$$da/dN = f(\sigma, a) \tag{3.1}$$

París y Forman estudiaron la función (3.1) y llegaron a las expresiones: (figura 10).

Ecuación de París:

$$da/dN = C_p (\Delta K)^n \tag{3.2}$$

Ecuación de Forman:

$$da/dN = C_f \frac{\Delta K^m K_{max}}{K_c - K_{max}} \tag{3.3}$$

Donde: C_p , C_f , n y m son constantes del material.

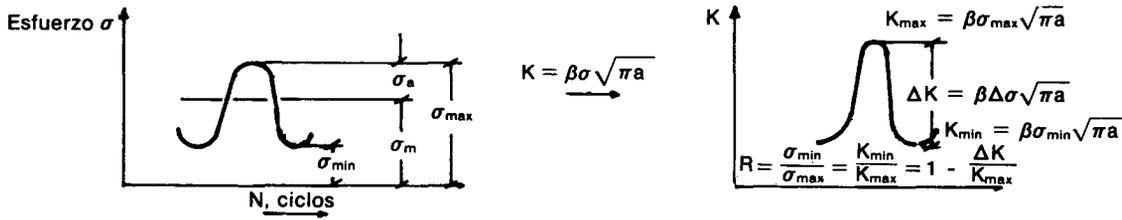
Δk : rango de intensidad de esfuerzos en un ciclo de fatiga.

De las ecuaciones (3.2) y (3.3) se observa que la rapidez de crecimiento de grietas por fatiga depende primordialmente del rango del factor de intensidad de esfuerzos, ΔK . Por otra parte de la ecuación de Forman se ve que cuando K_{max} se acerca a la tenacidad de fractura, K_c , la rapidez de propagación de grieta se hace muy grande siendo así inminente la rotura súbita de la sección residual.

La rapidez de crecimiento de grietas por corrosión bajo tensión se ha encontrado que es gobernada por el factor de intensidad de esfuerzos:

$$da/dt = f(K) \tag{3.4}$$

Tal que si se carga un elemento fisurado en un medio en que el material es sensible a agrietamiento por corrosión bajo tensión a valores de $K_i < K_c$ la fractura se presenta con el paso del



(a) Nomenclatura en esfuerzos de fatiga

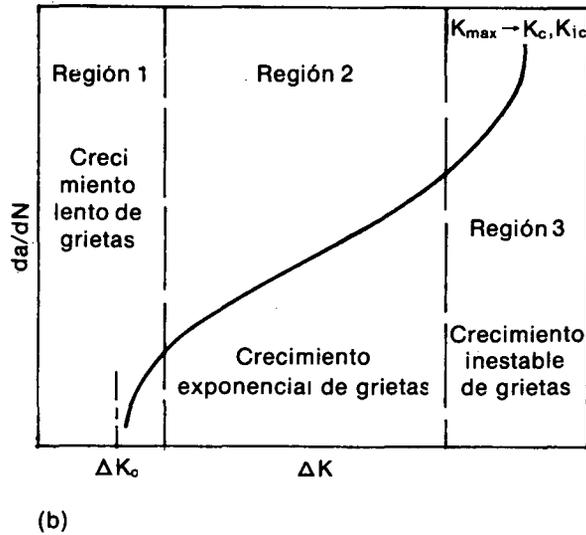


FIGURA 10. (a) Nomenclatura de esfuerzos de fatiga. (b) Diagrama de régimen de propagación de grietas por fatiga. Para $\Delta K < \Delta K_0$ virtualmente no se detecta propagación de grietas por fatiga. Cuando K_{max} se acerca a K_c la rapidez da/dN es muy elevada.

tiempo y entre mayor sea K_i mayor será la rapidez de crecimiento de grieta (figura 11).

Se ha encontrado en propagación de grietas tanto por fatiga como por corrosión bajo carga sostenida que por debajo de cierto valor, ΔK_0 y K_{csc} no se presenta virtualmente propagación de grietas por fatiga y corrosión bajo tensión respectivamente, figuras 10 (b), 11 y 12.

4. CRITERIOS DE TOLERANCIA DE DAÑO

Tolerancia de daño es la capacidad de una estructura de soportar daño en la forma de grietas sin una consecuencia catastrófica, hasta

cuando el componente afectado pueda ser reemplazado o reparado.

Para muchos casos si se diseñara con el criterio de que $K < K_{sc}$ o $\Delta K < \Delta K_0$ implicaría esfuerzos nominales muy bajos o secciones muy gruesas conduciendo a resultados económica y técnicamente inaceptables. Entonces la seguridad de daño más bien se puede obtener diseñando estructuras con la suficiente tolerancia de daño tal que por métodos periódicos de inspección se puedan detectar tamaños peligrosos de grietas. Con este

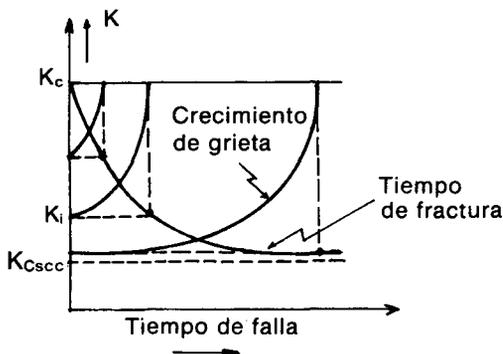


FIGURA 11. Tiempo de falla y crecimiento de grietas hasta cuando K se hace igual a K_c , a partir de un $K_i < K_c$. Por debajo de un cierto valor característico de K_i , K_{sc} nunca se produce fractura.

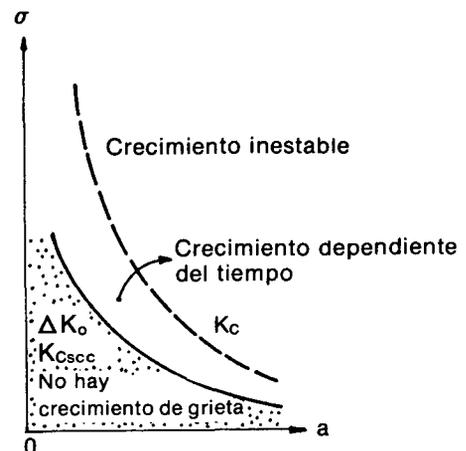
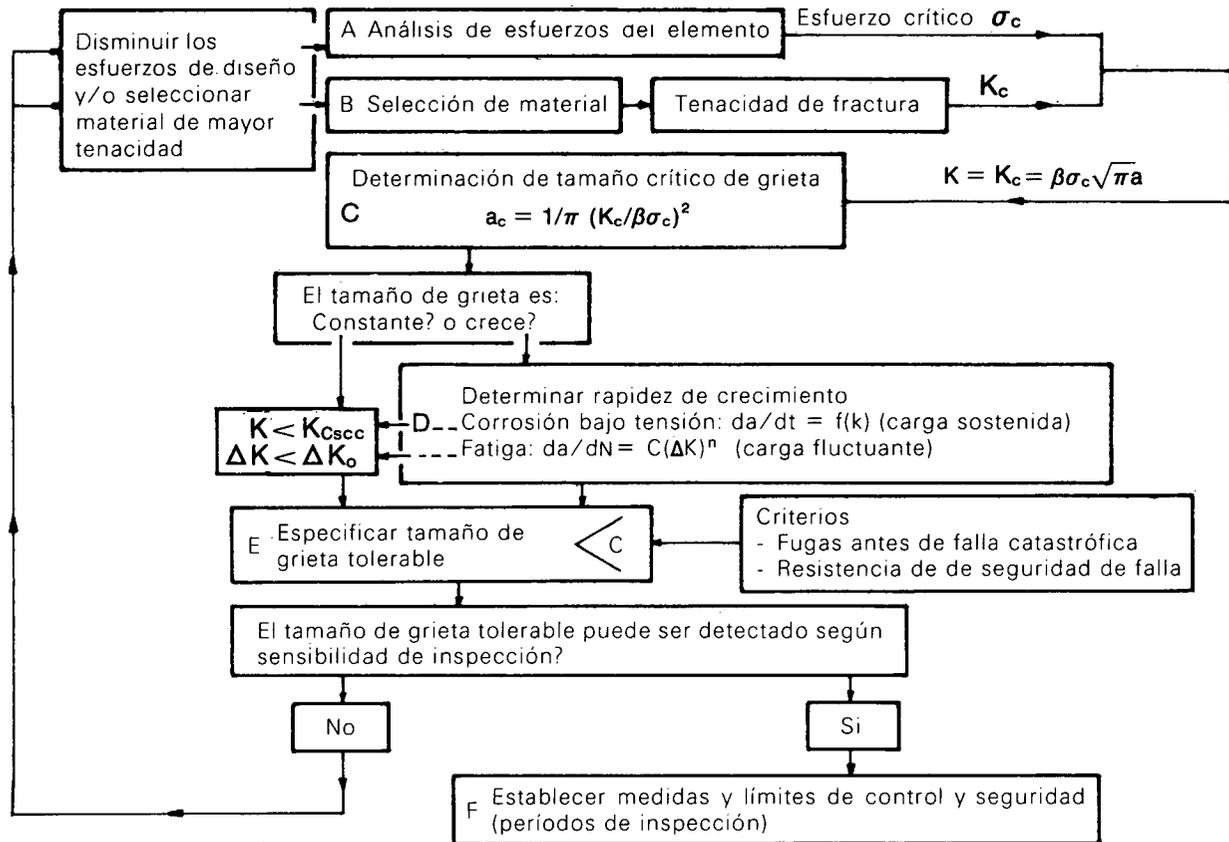


FIGURA 12. Para determinado nivel de esfuerzo, σ , inducido por carga de fatiga o carga sostenida, por debajo de cierto tamaño de grieta (dependiente del esfuerzo) no hay crecimiento de grieta, siempre y cuando $\Delta K < \Delta K_0$ o $K < K_{sc}$ respectivamente.

Proceso de diseño con tolerancia de daño en base de tenacidad de fractura



criterio, para efecto de diseño, se propone el procedimiento de cálculo basado en tenacidad de fractura esquematizando en el cuadro que arriba se presenta

Para tuberías y tanques a presión de pared delgada que contienen un fluido líquido o gaseoso se tiene el criterio de que antes de producirse una falla catastrófica se produzca un escape. Esto implica que la tenacidad de fractura deberá ser lo suficientemente alta para tolerar grietas subcríticas ($a < a_c$) por donde se produzcan fugas.

La práctica en tuberías ha establecido que se tendrá un escape cuando la magnitud de grieta en dirección axial es por lo menos igual al doble del espesor, $2a = 2t$ luego: ($\beta = 1.0$) (figura 13).

$$(K_c/\sigma)^2 \cdot 1/\pi \gg t \tag{4.1}$$

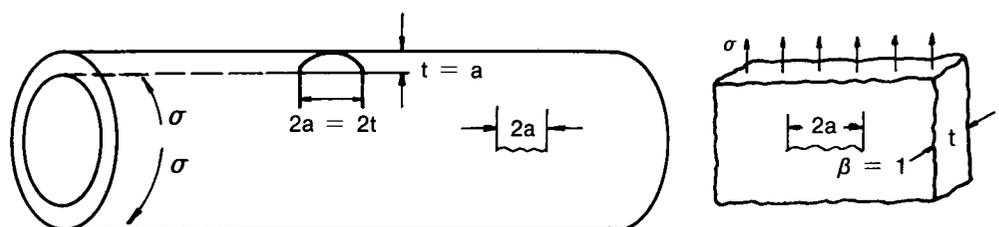
Una de las normas de seguridad recomienda que el tamaño de grieta crítica sea diez veces mayor que el valor mínimo, el cual podría ser detectado por la evidencia de un escape de gas.

Una vez conocida la tenacidad de fractura K_{Ic} y la expresión del factor de intensidad de esfuerzos K , se puede determinar mediante (2.2) el esfuerzo crítico σ_c de súbita propagación de grietas para cualquier tamaño de grieta, a . Este esfuerzo σ_c es conocido como resistencia residual:

$$\text{Resistencia residual, } \sigma_c = K_c/\beta\sqrt{\pi a} \tag{4.2}$$

Cuando la grieta es muy pequeña la resistencia residual tiende a ser muy grande según (4.2), pero en realidad ésta se ve limitada por el esfuerzo de fluencia, σ_{ys} , o resistencia a tracción σ_u . Entonces para grietas muy pequeñas se recomienda establecer la resistencia residual trazan-

FIGURA 13. Ilustración esquemática de la condición escape antes de fractura catastrófica de contenedores a presión de paredes delgadas.



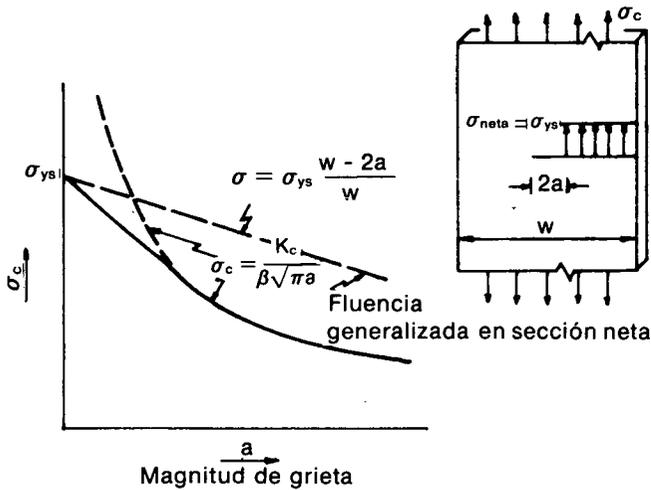


FIGURA 14. Resistencia residual, tangente de aproximación para grietas pequeñas. El esfuerzo crítico σ_c no deberá ser mayor a $\sigma = \sigma_{yz} \frac{w - 2a}{w}$ condición de fluencia generalizada en la sección neta resistente en plano de grieta.

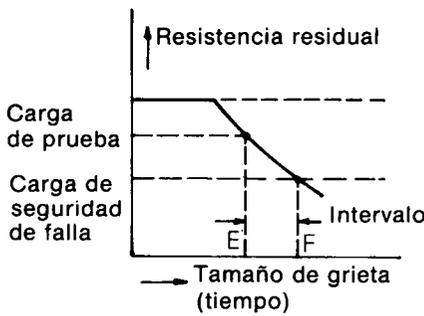


FIGURA 15. Seguridad de falla por carga de prueba.

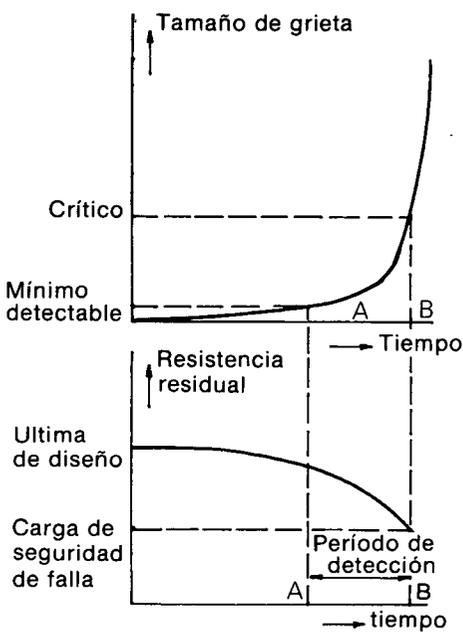


FIGURA 16. Seguridad de falla, por inspección periódica. El tamaño inicial también puede ser fijado por un código o norma.
48 Ingeniería e Investigación

do una línea recta desde σ_{ys} o σ_u , para $a=0$ tangente a la curva $\sigma_c = K_c/\beta\sqrt{\pi a}$ (figura 14).

Se define como resistencia de seguridad de falla el nivel más bajo permisible de resistencia residual.

En una estructura susceptible de daño por generación y propagación de grietas, una operación segura (además de tenerse tolerancia de daño) se consigue con inspecciones periódicas de detección de grietas. Para establecer dichos periodos se sugieren los siguientes procedimientos:

A) *Carga de Prueba*. Periódicamente se somete la estructura a una carga de prueba mayor que la carga de seguridad de falla.

A la carga de prueba el tamaño crítico de grieta es E y si no ocurre falla durante la prueba no existen grietas de este tamaño. Con la carga de seguridad de falla el tamaño crítico es F. Entonces se toma como periodo de inspección el tiempo que se requeriría para que una grieta de tamaño E creciera tamaño F. (figura 15).

B) *Inspección periódica por Ensayos no Destructivos* (rayos X, ultrasonido, etc.).

Después de cierto periodo de servicio una grieta se puede iniciar, ésta puede ser tan pequeña que no pueda ser detectada por la técnica de inspección la que permite un tamaño mínimo detectable a_A . El tiempo de propagación de grieta de tamaño a_A al tamaño a_B de resistencia de seguridad de falla se toma como periodo mínimo de inspección (figura 16).

C) *Trayectorias múltiples de carga*. Soporte de carga por dos o más elementos paralelos.

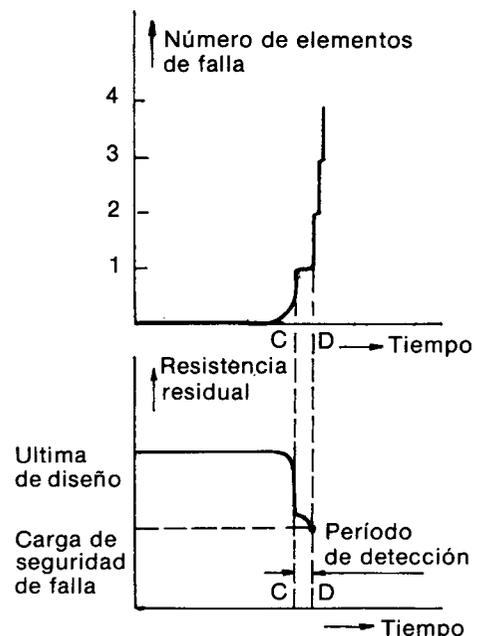


FIGURA 17. Seguridad de falla, trayectoria múltiple de carga.

Cuando uno de los elementos falla, después de un tiempo t_c , los elementos vecinos toman su carga elevándose los esfuerzos en los elementos restantes, disminuyéndose la resistencia residual como se muestra en la figura 17. Por el aumento de esfuerzo un segundo elemento fallará en un período de tiempo más corto decayendo la resistencia residual por debajo del nivel de seguridad; entonces el período $T_D - T_C$ se toma como el período disponible para la detección de falla (figura 17)

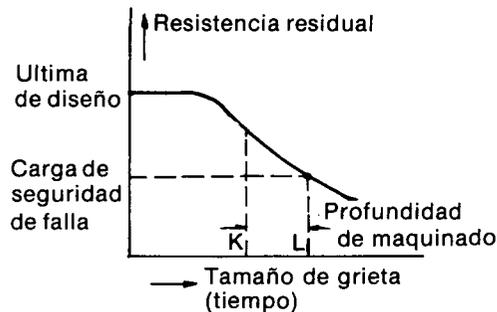


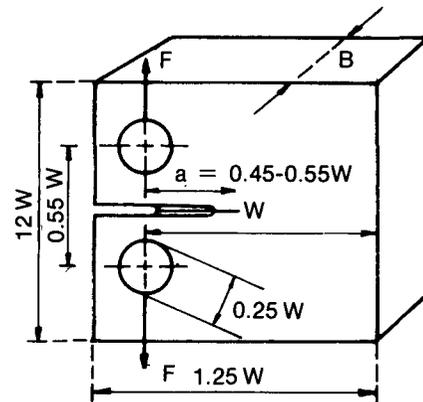
FIGURA 18. Seguridad de falla, remoción periódica de material.

D) *Remoción de capa superficial* por maquinado periódico en sitios susceptibles de desarrollo de grietas.

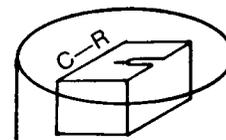
Una grieta de tamaño casi crítico L se reducirá a un tamaño K por la remoción de la capa LK . El tiempo requerido para la propagación de grieta a través del espesor de capa (de K a L) será el intervalo de remoción (figura 18).

5. EXPERIMENTACION-TENACIDAD DE FRACTURA

Los principios de tolerancia de daño y control de fallas catastróficas expuestos antes, se basan primordialmente en conceptos de resistencia residual. -tenacidad de fractura. Esta propiedad del material, con la que afronta fenómenos de



(a)

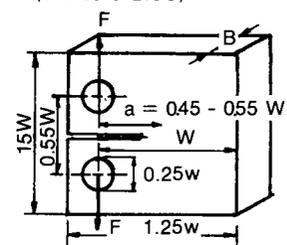


(b)

FIGURA 19. (a) Probeta compacta de tenacidad de fractura (b) Orientación de ensayo, C-R.

Acero SAE 4340 (temperatura de austenización 840 C)												
T_{rev}	Dureza	σ_u	σ_{ys}	a	w	$f_{(a/w)}$	F_c	$K_c = \frac{F_c}{Bw^{1/2}}$	$2.5 \left[\frac{K_c}{\sigma_{ys}} \right]^2$	K_{Ic}	$[\sigma_p]_{\theta=0^\circ}$	$a_c = \frac{1}{\pi} \left[\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}/2} \right]^2$
°C	RC	$\frac{Kg}{mm^2}$	$\frac{Kg}{mm^2}$	mm	mm		Kg	$\frac{Kg}{mm^2} \sqrt{mm}$	mm	$\frac{Kg}{mm^2} \sqrt{mm}$	mm	(2) mm
Estado entrega	31	107	97	15	32.2	8.7	4320	301	24.1		(0.175 al 57) ¹	
0	54	195	185	14.8	32.0	8.6	1040	72	0.4	72	0.002	0.19
200	49	180	160	16.3	33.2	9.4	2400	178	3.1	178	0.021	1.58
300	48	170	150	15.3	33.3	8.6	2200	149	2.5	149	0.018	1.26
350	42	161	148	14.2	32.0	8.2	2865	189	4.1	189	0.028	2.08
400	40	133	112	14.0	32.5	7.9	3400	214	9.1	214	0.064	4.65
450	34	112	91	14.0	32.5	7.9	3700	233	16.4	233	0.115	8.35
550	33	106	91	15.0	32.0	8.8	3280	232	16.2	232	0.115	8.28
Acero SAE 1020 Recocido												
66RB	43	25	11.5	30	7.2	2500	149	88.8			(0.44a a 3.97)	
Latón comercial												
52 RB	42	30	15.0	28.5	11.1	1150	109	33			(0.229 a 2.06)	

Resultados de ensayos de fractura de acero SAE 4340 tratado térmicamente a diferentes niveles de resistencia, acero AISI 1020 recocido y latón comercial en estado de entrega. Orientación de ensayo C-R. Espesor, $B = 22$ mm. Tamaño de zona plástica crítica (para cuando $K = K_{Ic}$) r_p en el plano de grieta, $\theta = 0^\circ$ $r_p]_{\theta=0^\circ} = 1/18 \pi [K_{Ic}/\sigma_{ys}]^2$, para estado de deformación plana ($K_c = K_{Ic}$) y $r_p]_{\theta=0^\circ} = 1/2 \pi [K_c/\sigma_{ys}]^2$, para estado de esfuerzo plano. (1) No se puede considerar, ni estado de deformación plana ni estado de esfuerzo plano. (2) Tamaño de grieta crítica para un esfuerzo nominal de $\sigma_{ys}/2$, $\beta = 1$, secciones gruesas.



propagación de grietas, es sensible a la microestructura y en particular debe tenerse en cuenta el efecto de la concentración y morfología de inclusiones.

Para ampliar y concretar los conceptos que se han manejado en los numerales precedentes, en la tabla anterior se reportan los resultados de ensayos de propagación de grietas-tenacidad de fractura que se han realizado en los laboratorios del IEI-Universidad Nacional.

Experimentalmente se ha trabajado con el acero SAE 4340 tratado térmicamente a diferentes niveles de resistencia, porque este acero es uno de los más utilizados en la industria nacional para la fabricación de elementos de máquinas y porque permite mostrar la necesidad de hacer un cuidadoso balance de propiedades mecánicas según las exigencias de servicio. Como puntos de comparación también se muestran resultados obtenidos con acero SAE 1020 y latón comercial.

Los ensayos de tenacidad se hicieron en probetas compactas de tensión (figura 19), preagrietadas por fatiga antes del tratamiento térmico y bajo condiciones ambientales normales de medio y temperatura con aplicación de carga estática.

Para este caso la solución del factor de intensidad de esfuerzos es dado por:

$$K = \frac{F}{BW^{1/2}} f(a/w)$$

$$f(a/w) = \frac{(2 + a/w)}{(1 - a/w)^{3/2}} [0.866 + 4.64(a/w) - 13.32(a/w)^2 + 14.72(a/w)^3 - 5.6(a/w)^4]$$

Con las cargas críticas de propagación de grietas, F_c , se calcula la tenacidad de fractura K_{Ic} , y si se

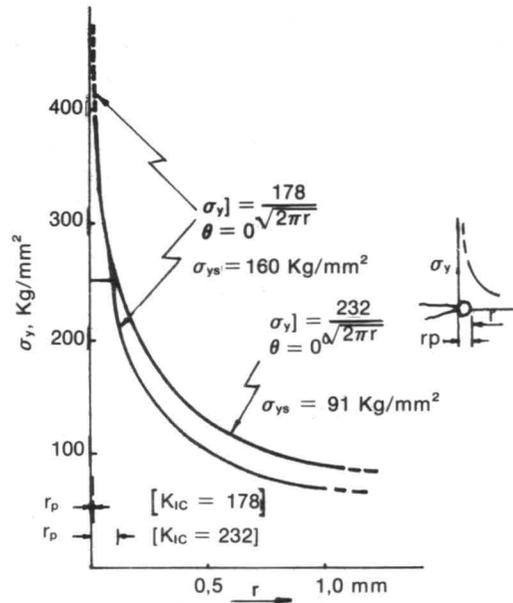


FIGURA 20. Esfuerzo σ_y entorno de extremo de grieta para $\theta = 0^\circ$ y cuando $K = K_{Ic} = 178, 232 \text{ Kg}\sqrt{\text{mm}/\text{mm}^2}$. Con el acero de mayor resistencia, mayor es el esfuerzo en la zona plástica la que es más pequeña que en acero de baja resistencia.

cumple que $\beta \cdot a \geq 2.5(K_{Ic}/\sigma_{ys})^2$, $K_{Ic} = K_{Ic}$, tenacidad de fractura en condición de deformación plana, siendo así propiedad del material, ver tabla de datos.

6. ANALISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Según los datos presentados en la tabla, para acero SAE 4340 tratado térmicamente a diferentes niveles de resistencia se observa la tendencia a disminuir la tenacidad de fractura con el aumento de dureza o resistencia a fluencia. A este comportamiento conduce no solamente la variación de las características metalográficas, sino

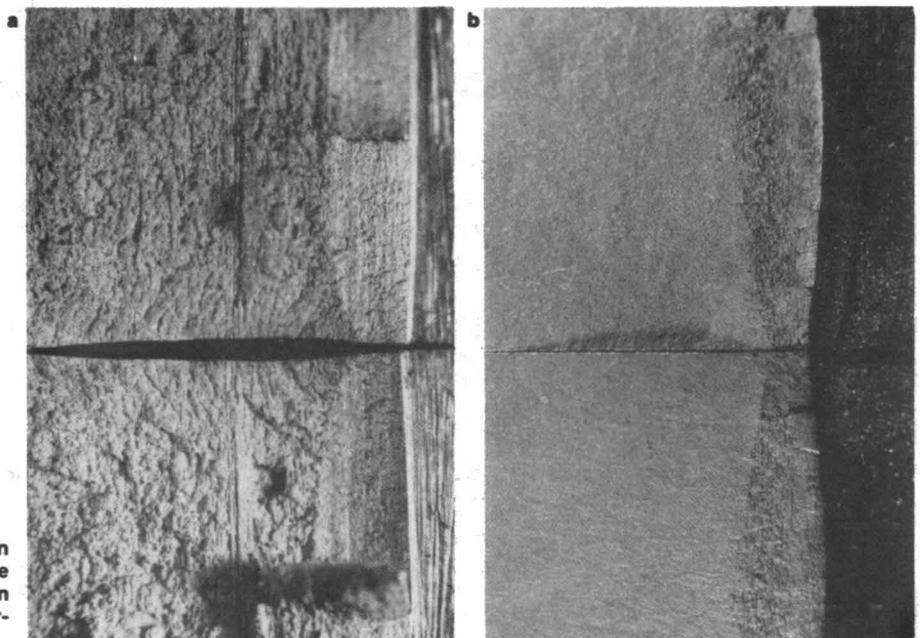


FIGURA 21. (a) Contracción visible en fractura de alta tenacidad. (b) Fractura de baja tenacidad, deformación en dirección del espesor no es notoria, estado de deformación plana.

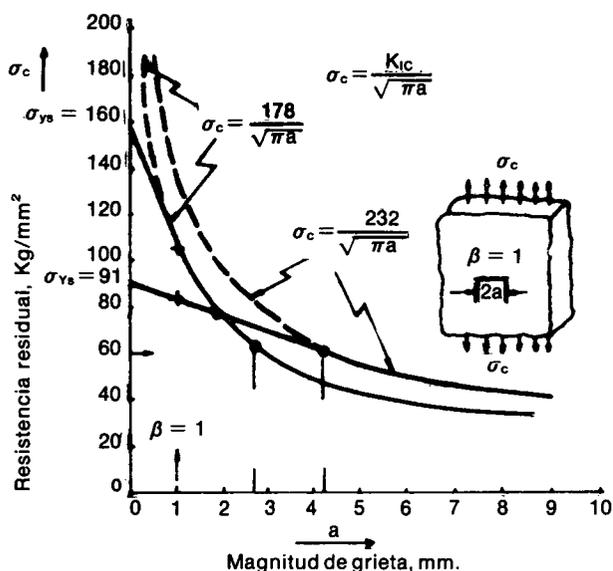


FIGURA 22. Curvas de resistencia residual, σ_c vs. tamaño de grieta, a , $\beta = 1$, $K_c = K_{Ic}$, para acero SAE 4340 tratado térmicamente a $\sigma_{ys} = 160$ y 91 kg/mm².

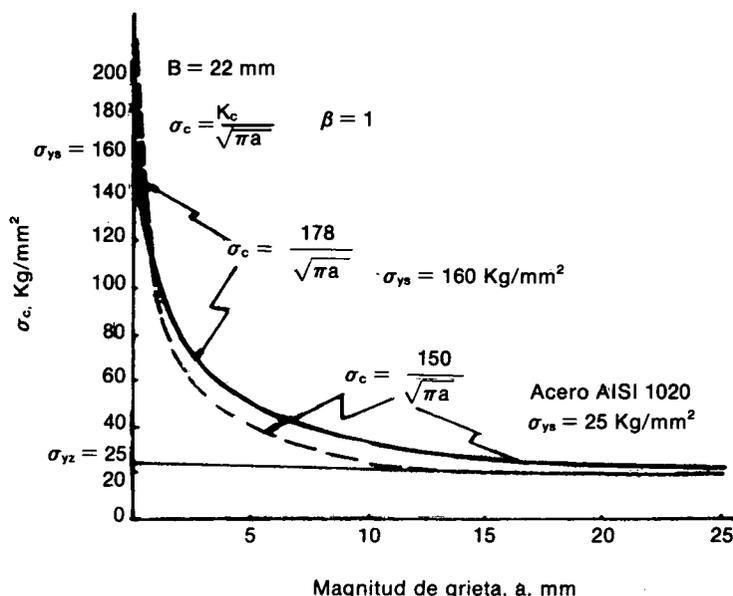


FIGURA 23. Curva de resistencia residual de acero SAE 4340 160 kg/mm² y acero SAE recocido con 25 kg/mm². $B = 22$ mm.

que también es influenciado por el tamaño de la zona plástica en el extremo de grieta, es así como se ve de las columnas de K_{Ic} y $[r_0]_{\beta=0}$ que a mayor tenacidad le corresponde un mayor tamaño de zona plástica, lo que permite una más conveniente distribución de esfuerzos en las puntas de grieta (figura 20).

En los casos de mayor tenacidad en el acero SAE 4340 se hace visible alguna deformación en la dirección del espesor B , figura 21 (a), encontrándose en el límite en que se considera la condición de deformación plana.

En la última columna de la tabla de datos se presenta el máximo tamaño de grieta aceptable, a_c , condición de súbita propagación de grieta que conduce a fractura, para un esfuerzo nominal $\sigma_{ys}/2, \beta=1.0$, secciones gruesas, en que $K_c = K_{Ic}$ se observa que a mayor resistencia es menor el tamaño de grieta tolerable. Para los mayores niveles de resistencia el tamaño de grieta crítico puede ser tan pequeño que quizás pase inadvertido en el proceso de inspección.

En la figura 22 se han trazado las curvas de resistencia residual, por cálculos de tenacidad de fractura, para tratamiento térmico de alta y baja resistencia, $\sigma_{ys} = 160$ Kg/mm²,

$$K_{Ic} = 178 \text{ Kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2, \sigma_{ys} = 91 \text{ Kg/mm}^2,$$

$$K_{Ic} = 232 \text{ Kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$$

Se observa que para grietas mayores de 1.8 mm., punto de intersección de las curvas, el acero con menor resistencia (mayor tenacidad de fractura) puede tolerar grietas de mayor tamaño; por ejemplo para un esfuerzo de 60 kg/mm² el acero de alta resistencia puede tolerar una grieta hasta

de 2.7 mm., mientras que el de baja resistencia puede tolerar grietas de tamaño hasta 4.2 mm. En cambio para grietas menores de 1.8 mm., el de mayor resistencia puede soportar mayores esfuerzos para un tamaño de grieta dado, por ejemplo para $a=1$ mm. el de menor resistencia admite un esfuerzo de 82 kg/mm² mientras que el de mayor resistencia admite un esfuerzo de 104 kg/mm². Cuando una grieta es en extremo pequeña, prácticamente el material es continuo donde obviamente a mayor resistencia el material puede soportar mayores esfuerzos.

En la figura 23 se presenta la resistencia residual para los aceros, SAE 4340, $\sigma_{ys}=160$ Kg/mm² y SAE 1020 $\sigma_{ys}=25$ Kg/mm² para $B=22$ m, $\beta=1$.

Se observa que para el acero de baja resistencia la presencia de una grieta afecta en menor proporción la resistencia que en el acero de alta resistencia, por ejemplo una grieta de 5 mm. en el acero de alta resistencia, se ve reducida de 160 kg/mm² a 56 kg/mm², mientras que para el de baja resistencia se reduce de 25 kg/mm² a 22 kg/mm², en efecto aquí se muestra como entre menor sea la resistencia de un acero es menor su sensibilidad a la presencia de grietas.

Comparando la tenacidad de fractura K_{Ic} para el acero SAE 4340, $\sigma_{ys} \approx 147$ kg/mm² entre el valor informado por la ASTM, $250 \text{ kg}/\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ y el encontrado en los experimentos, $188 \text{ kg}/\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ se encuentran diferencias importantes, entre otros factores, se ha establecido que esto se debe a diferencias de contenido de inclusiones y efectos anisotrópicos [3].

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Normalmente en el cálculo de elementos estructurales se asume un material continuo; sin embargo, en fabricación o en servicio se pueden generar grietas o defectos que actúan como grietas, que dependiendo de su tamaño y ubicación respecto a los esfuerzos reducen la capacidad de soporte de carga.

El análisis de la reducción de los esfuerzos que pueden ser soportados en estructuras fisuradas se hace mediante conceptos de factor de intensidad de esfuerzos, K , - tenacidad de fractura, K_{Ic} . Donde la tenacidad K_{Ic} la podemos ver como la resistencia que ofrece el material a la propagación de grietas tal que K_{Ic} es a K , como en elementos continuos esfuerzo es a resistencia.

En unas condiciones dadas una grieta no se propagará hacia fractura súbita, catastrófica siempre y cuando $K < K_{Ic}$ sin embargo grietas de

tamaño subcrítico, $a < a_c$ pueden crecer en servicio hasta llegar a un tamaño crítico al que $K = K_c$, primordialmente por fatiga o corrosión bajo tensión; luego se podría pensar en diseñar con el criterio de $\Delta K < \Delta K_o$ y $K < K_{csc}$ respectivamente para garantizar que no se presente crecimiento de grietas, pero esto con frecuencia resulta poco práctico técnica y económicamente.

Entonces una operación segura se obtiene combinando análisis de resistencia residual referido a un método de inspección de grietas: visual, tintas penetrante, rayos X, ultrasonido.

El tamaño de grieta tolerable dependerá en un elemento estructural de la tenacidad de fractura (resistencia del material) capacidad mínima de soporte de carga, rapidez de crecimiento de grietas, métodos y periodos de inspección, etc. Estos factores deben ser contemplados en un diseño con tolerancia de daño.

Apéndice

Factores de intensidad de esfuerzos

$K = \beta \sigma \sqrt{\pi a}$

$\beta = \sqrt{\sec \pi a/W}$

$\beta = 1.12 - 0.23(a/W) + 10.6(a/W)^2 - 21.9(a/W)^3 + 30.3(a/W)^4$

$\beta = 1.12 + 0.43(a/W) - 4.79(a/W)^2 + 15.4(a/W)^3$

$K = \sigma \sqrt{\pi a}$

$K = \beta \sigma \sqrt{\pi a}, \beta = f(a/c)$

a/c	β
0.1	1.00
0.2	1.02
0.3	1.04
0.4	1.08
0.5	1.13
0.6	1.21

a/c	β
0.1	1.01
0.2	1.03
0.3	1.06
0.4	1.11
0.5	1.19
0.6	1.30

$K = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \beta = f(a/2c)$

$\sigma = \frac{3M}{2Bc^2}$

a/2c	β
0.1	1.02
0.2	1.06
0.3	1.16
0.4	1.32
0.5	1.62
0.6	2.10

Espesor B
 $K = (PS)/(BW^{3/2}) [2.9(a/W)^{1/2} - 4.6(a/W)^{3/2} + 21.8(a/W)^{5/2} - 37.6(a/W)^{7/2} + 38.7(a/W)^{9/2}]$

Espesor B
 $K = P/(BW^{1/2}) [29.6(a/W)^{1/2} - 185.5(a/W)^{3/2} + 655.7(a/W)^{5/2} - 1017(a/W)^{7/2} + 63.9(a/W)^{9/2}]$

p por unidad de espesor
 $K = p \sqrt{\pi a}$

Técnica y económicamente es favorable ampliar los periodos de inspección, para lo cual, dada la rapidez *creciente* de propagación de grietas en la medida que aumenta su tamaño, es recomendable para este fin disminuir la rapidez de propagación de grietas y/o reducir el tamaño mínimo detectable de grieta antes que aumentar el tamaño crítico por un aumento de tenacidad.

El comportamiento del acero 4340 se observa con otros aceros de medio carbono, 0.40%, de construcción de elementos de máquinas como son el SAE 4140, 9849 y 1040 en los que a menor resistencia en tracción mejor tolerancia de grietas, de aquí la necesidad de hacer un *balance* cuidadoso de propiedades según los requerimientos de servicio y aceptación de riesgo de falla.

En casos prácticos con secciones delgadas y/o materiales de elevada tenacidad, en que no se dan las condiciones de deformación plana, al asumir que $K_c = K_{Ic}$, se obtienen cálculos conservadores de resistencia residual y tamaño de grieta tolerable puesto que $K_c < K_{Ic}$

En vista de la escasa información y que la tenacidad de fractura es sensible (más que otras propiedades mecánicas) a efectos anisotrópicos, contenido y morfología de inclusiones, se hace necesario el estudio experimental de esta propiedad de materiales de fabricación nacional, en especial de aceros, para llegar a una mejor combinación de propiedades en casos donde es de primordial importancia evitar fallas catastróficas.

DEFINICIONES

- Esfuerzo nominal Esfuerzo calculado sin tener en cuenta grietas u otro tipo similar de discontinuidades.
- Agrietamiento por Corrosión bajo tensión, Scc. Agrietamiento causado por la presencia simultánea de un esfuerzo de tensión y un específico medio corrosivo.
- Inclusiones no metálicas. Oxidos frágiles, sulfuros o silicatos que resultan de ser atrapados en el metal líquido.
- Factor de intensidad de esfuerzos, K . Es una medida de la magnitud de esfuerzos en torno de una grieta aguda. K es función del esfuerzo nominal, longitud de grieta y geometría del componente estructural.
- Rango de intensidad de esfuerzos, ΔK . Rango de K en un ciclo de esfuerzos de fatiga, $\Delta K = K_{max} - K_{mín}$.
- ΔK_{c0} : rango de intensidad de esfuerzos por debajo del cual no ocurre propagación de grietas por fatiga.
- K_{csc} . Valor del factor de intensidad de esfuerzos por debajo del cual no ocurre crecimiento de grietas por corrosión bajo tensión.
- Falla Catastrófica. Fractura súbita por rápida propagación de grietas.
- Tenacidad de fractura, K_c . Valor crítico del factor de intensidad de esfuerzos al cual se tiene una rápida propagación de grietas. Cuando se cumple condición de deformación plana K_c toma el valor mínimo y es llamado K_{Ic} .
- Tenacidad de fractura en condiciones de deformación plana, K_{Ic} . Mínimo valor del factor de intensidad de esfuerzos requerido para causar una rápida propagación de grietas. Es una propiedad del material.
- Resistencia residual, σ_c . Esfuerzo nominal crítico que puede soportar un elemento estructural fisurado.
- Resistencia de Seguridad de Falla, RSF. Nivel más bajo de resistencia residual admisible.

BIBLIOGRAFIA

1. ASTM, Review of Developments in plane Strain Fracture Toughness Testing.
2. D. Broek, Elementary Engineering Fracture Mechanics, Ed. Nijhoff.
3. R. W. Hertzberg, Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, Ed. Wiley.
4. George E. Dieter, Mechanical Metallurgy, Ed. J. Wiley.
5. D. Broek, Damage Tolerance Analysis, Ed. Fracture Research.
6. ASM, Application of Fracture Mechanics, Ed. ASM.
7. A.S. Tetelman, Fracture of Structural Materials, Ed. J. Wiley.
8. ASM, Failure Analysis and prevention, Ed. ASM, vol. 10, 8ª ed.
9. ASM, Toughness and Fracture Mechanics, Ed. ASM.
10. Alan P. Berens, Fatigue Crack Growth Rate Analysis, Ed. ASM.
11. H. Hernández, Análisis de Fallas por Fatiga, Ed. INACERO.
12. H. Hernández, Análisis de Falla de Alambrón de Refuerzo de Tuberías Pre-esforzadas, Ed. INACERO.