

ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD DE ESTRUCTURAS METÁLICAS SOMETIDAS A CARGAS CÍCLICAS

Martín Eduardo Polimeni
Ingeniero Civil.

Ciudad de Buenos Aires - Argentina.

Miembro de la Comisión Permanente de Estructuras de Acero del CIRSOC

Miembro de la Comisión Redactora del Reglamento CIRSOC 402

Docente de la asignatura Cimentaciones de la FIUBA.

Presidente de EEPPSA Consultora de Ingeniería

eeppsa@arnet.com.ar

Resumen del Trabajo

Existen un gran número de estructuras de acero en servicio que poseen su vida útil, técnicamente, caduca (según la normativa).

El ciclaje sufrido durante el servicio, combinado con procesos de corrosión y fatiga, sumado a la ausencia de procesos de inspección y mantenimiento, hacen que se desconozca la confiabilidad estructural actual de estas estructuras y su vida útil remanente (en caso de que la tuviese). Los procesos, combinados o no, de corrosión y fatiga generan una disminución progresiva de la resistencia del acero, el primero por pérdida de masa y el segundo por aumento de defectos provenientes, principalmente, del proceso de fabricación. En este grupo de estructuras puede mencionarse, no excluyentemente, a las vigas portarriel y a los puentes viales y ferroviarios. Especial atención debe prestársele a estos últimos debido a que en éstos confluyen, un servicio esencial como lo es transporte ferroviario y grandes cantidades de ciclos con una relación entre cargas permanentes y vivas, muy pequeña. Es imprescindible la aplicación de la fractomecánica como disciplina complementaria para la evaluación de la confiabilidad estructural actual de las citadas estructuras y para la ejecución de procesos de rehabilitación estructural que incrementen la vida de servicio remanente con grados de seguridad aceptables.

Abstract

Exists are a large number of steel structures in service that have its useful life technically ended.

The cycles suffered during service, combined with corrosion and fatigue processes, combined with the lack of inspection and maintenance processes, make the actual structural reliability of these structures and their remaining useful life, are unknown. Corrosion and fatigue processes combined or not, generate a progressive decrease in the steel resistance, the first one by mass loss and the second one by increasing defects arising mainly from the manufacturing process. In this group of structures may be mentioned, not exclusive manner, the crane girders and road and rail bridges. Special attention should be paid to the latter because they converge an essential service as it is rail transport with large quantities of cycles with a very small ratio between permanent and live loads. It is essential the application of fracture mechanics as a complementary discipline for the evaluation of the actual structural reliability of these structures and to implement rehabilitation processes that increase the remaining useful service life with acceptable safety levels.

• INTRODUCCIÓN.

Existe un importante número de estructuras en servicio de las cuales se desconoce su capacidad portante actual y futura para cumplir con el servicio que deben prestar.

Dentro de las construcciones civiles de acero pueden mencionarse, en forma no excluyente, tres tipos de estructuras, que por las características del servicio que prestan, se encuentran sometidas a rangos de tensiones alto (relación cargas vivas/cargas muertas), en una cantidad de ciclos significativa durante su vida útil y que, además, presentan la dificultad de su complejo reemplazo y/o readecuación. Estas estructuras son:

- Vigas portarriel.
- Puentes ferroviarios.
- Puentes viales.

El proceso del fenómeno de fatiga en una construcción metálica puede describirse como la iniciación y crecimiento de fisuras debido a la repetición de cargas.

Si las fisuras crecen de tal manera de que la sección no fisurada se reduce a valores que no pueden soportar las cargas actuantes, el elemento fisurado se fractura y, por lo tanto, es posible que se produzca un colapso parcial o total de la estructura.

Es importante señalar que este proceso puede llevarse a cabo con un nivel de tensiones sensiblemente menor al correspondiente a las cargas consideradas como estáticas.

El primer paso para atenuar el proceso de iniciación y crecimiento de fisuras, (no es posible eliminarlo) se encuentra en el correcto diseño de detalles constructivos (fundamentalmente uniones (soldadas u abulonadas), cambios bruscos de espesores y cualquier otro tipo de concentrador de tensiones). Asimismo, debe preverse un programa de mantenimiento preventivo de tal forma de detectar anomalías durante la vida de servicio de la estructura y poder actuar en consecuencia.

En puentes construidos, previo a la aplicación masiva de las uniones soldadas como método eficiente de construcción (reducción de costos), las uniones se ejecutaban mediante roblones o tornillos de alta resistencia. En estos casos, las anomalías que producen la iniciación de fisuras, fundamentalmente, se encuentran en los agujeros. Hay que tener en cuenta los altos valores de tensiones (por encima de fluencia) que se generan en las discontinuidades producidas por los agujeros. A este hecho debe agregársele las posibles anomalías en la ejecución del agujereado.

En estructuras construidas mediante uniones soldadas, éstas producen continuidad estructural, de modo tal que una fisura iniciada en una unión soldada defectuosa puede interesar a más de un elemento estructural y, por ende, propagarse desde el elemento en el cual se inició hacia otro unido a éste mediante soldadura. Esta situación no ocurre en las estructuras formadas por elementos unidos mediante roblones o tornillos.

Es cierto que las estructuras ejecutadas mediante uniones soldadas, por la mayor probabilidad de anomalías durante la ejecución, son más susceptibles a los efectos de fatiga. Sin embargo, las estructuras con uniones atornilladas o roblonadas, por lo anteriormente indicado, no están exentas de esta

problemática. Basta con ver los bajos rangos de tensiones admisibles umbrales de uniones roblonas.

- **BREVES CONSIDERACIONES SOBRE LA MECÁNICA DE FRACTURA.**

- **MECÁNICA DE FRACTURA ELÁSTICA LINEAL (MFEL).**

- **CRITERIO DE GRIFFITH**

Al Ing. Griffith se lo considera el creador de la Mecánica de Fractura, disciplina que, como indica su nombre, estudia el modo en que un elemento estructural llega a su fractura (separación en dos o más partes) por acciones externas.

El balance energético propuesto por Griffith para evaluar la disminución de la resistencia que genera una fisura en un cuerpo (no pueden aplicarse las teorías clásicas de la resistencia de materiales que exigen medios continuos) se da entre las siguientes dos energías:

- Energía potencial elástica almacenada en el cuerpo producto de una tensión remota externa σ .
- Energía superficial, en el cuerpo fisurado, generada entre las dos superficies de la fisura.

A medida que la energía superficial aumenta, de acuerdo a la longitud de la fisura y a las superficies de sus caras $2 \cdot a \cdot t$, la energía potencial elástica almacenada disminuye

La propagación de la fisura ocurre cuando la disminución de la energía elástica almacenada en el cuerpo es igual o mayor al incremento de la energía superficial (valor pico de la curva de balance energético).

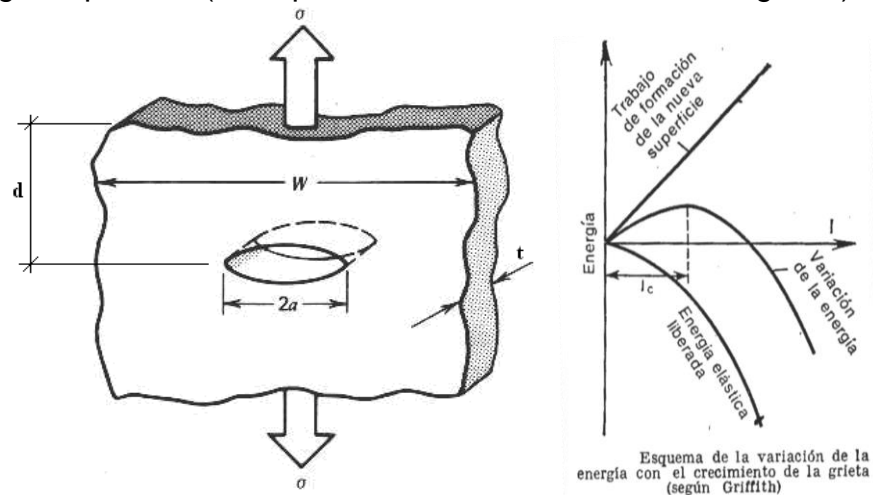


Figura 1: Balance energético de Griffith

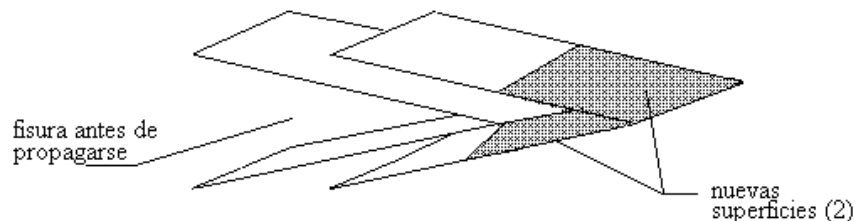


Figura 2: Croquis ilustrativo del incremento de la energía superficial con el incremento de la longitud de la fisura.

Por lo tanto, y este concepto es fundamental, puede indicarse que la tensión de fractura (tensión crítica) ocurre para una cierta longitud de fisura.

Este concepto también conlleva a indicar que, por lo tanto, existen longitudes de fisuras (menores a la crítica) para la cual el cuerpo fisurado no rompe.

Este concepto puede ser solo analizado realizando un balance energético como el realizado por Griffith y no puede ser explicado por la Resistencia de Materiales (la tensión actuante en la punta de la fisura tiende a infinito).

o Tensión crítica:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot \gamma_s}{\pi \cdot a}}$$

El criterio de Griffith solo es aplicable a materiales frágiles (por ejemplo el vidrio) que experimentan una zona de plastificación despreciable en la punta de la fisura.

▪ CRITERIO DE OROWAN

El criterio de Orowan modifica al de Griffith teniendo en cuenta que, adicionalmente a la energía superficial que se opone al crecimiento de la fisura, existe otra energía de restricción a su crecimiento. Esta es la energía plástica generada en la punta de la fisura. Para materiales, aún considerados frágiles, esta última energía es muy superior a la superficial, pudiéndose considerar a la primera como despreciable. En conclusión, el criterio es conceptualmente el mismo pero considerando en el balance energético a la energía plástica desarrollada en la punta de la fisura. Puede verse en la Figura 3 que el área plastificada en la punta de la fisura es mayor a medida que de la longitud de la fisura es mayor.

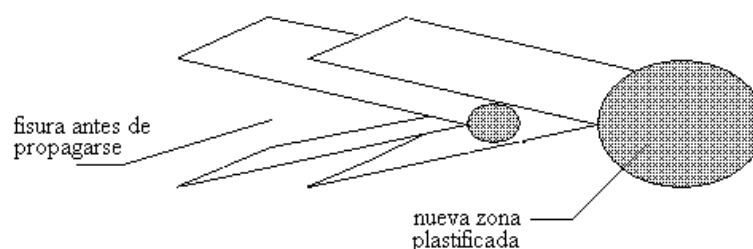


Figura 3: Croquis ilustrativo del incremento de la energía plástica en la punta de la fisura con el incremento de la longitud de la fisura

o Tensión crítica:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot \gamma_p}{\pi \cdot a}}$$

▪ CRITERIO DE IRWIN.

Es el criterio que, actualmente, es de aceptación general para la Mecánica de Fractura.

Conceptualmente no difiere de los anteriores, solo que agrega el concepto de **fuerza impulsora** $G = K^2 / E$.

Supone a toda el área elástica por fuera del área plastificada que rodea la punta de la fisura actúa como una energía potencial elástica que produce el incremento de la longitud de la fisura, disminuyendo, a medida que esta última aumenta.

o Tensión crítica:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{E \cdot G}{\pi \cdot a}}$$

La conclusión que puede obtenerse de la evaluación de los criterios fractomecánicos, es que la tensión crítica (de fractura) es función de un largo determinado de fisura (que depende de la tenacidad del material) y por ende, existe longitudes menores de fisuras que pueden existir sin las fractura del material, o sea $\sigma=f(a)$! Esto lleva a poder establecer un nivel de aceptación de defectos en estructuras, hecho inviable según la resistencia de materiales clásica.

o **FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES Y TENACIDAD A FRACTURA.**

El **factor de intensidad de tensiones K** describe el estado tensional del cuerpo en la punta de la fisura. Depende, básicamente, de factores geométricos (forma y posición de la fisura) y se obtiene mediante ecuaciones de la Teoría de la Elasticidad.

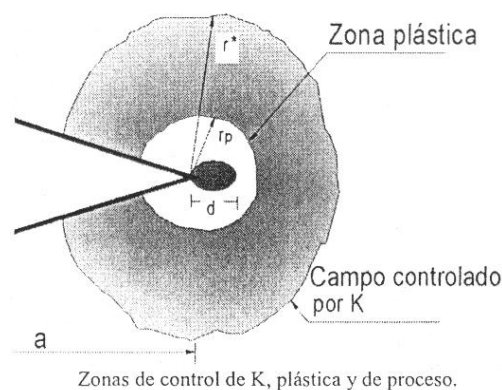


Figura 4: zonas controladas por el factor de concitación de tensiones K

o Factor de intensidad de tensiones: $K = \sqrt{E \cdot G} = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$

La **tenacidad de fractura K_c** es un parámetro del material, el cual se obtiene mediante ensayos.

Para materiales frágiles puede considerarse como un parámetro único de despreciable dependencia de la longitud de la fisura. Para materiales

dúctiles, este valor tiene alta dependencia de la longitud de la fisura, incrementándose con el incremento de ésta.

o Para MFEL, debe cumplirse que: $K \leq \frac{Kc}{\gamma}$

o Para MFEP, debe cumplirse que: $R(a) \geq \frac{J(\sigma, a)}{\gamma}$

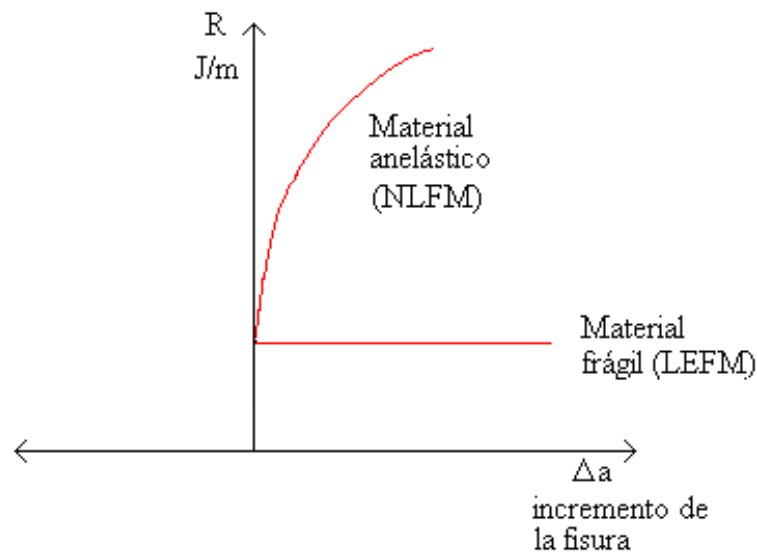


Figura 5: Curvas de resistencia para MFEL y MFEP.

o **MECÁNICA DE FRACTURA ELASTOPLÁSTICA (MFEP).**

Para materiales dúctiles con grandes zonas plastificadas respecto al área total de la pieza, la tenacidad a fractura es variable con el incremento de la longitud de la fisura y, por ende, con el incremento de la acción exterior. Por tal razón, para el análisis de un elemento fisurado de material dúctil se compara a la curva de resistencia al avance $R(a)$ (tenacidad) con la curva de crecimiento de la fisura $J(\sigma, a)$.

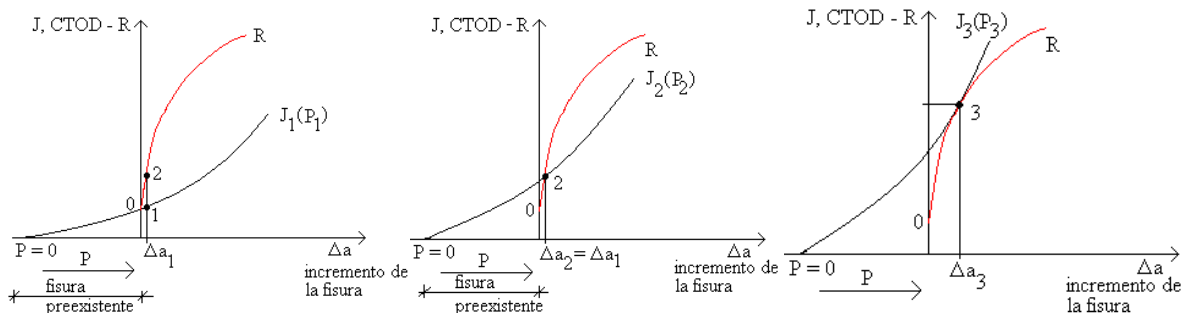


Figura 6: Curvas de tenacidad R vs. Curvas de crecimiento de fisura (o tasa de liberación de energía elástica) J.

De acuerdo al último gráfico, se puede observar que la Curva R es un contorno de valores de equilibrio entre las fuerzas impulsoras J y la resistencia del material al avance de las fisuras, R.

La curva R del material, matemáticamente puede ser definida como **una envolvente de las curvas J**, o sea, de las tasas de liberación de energía elástica de deformación. También puede ser definida como una **tenacidad a fractura para extensiones estables de fisuras**.

○ **FACTORES QUE AFECTAN A LA TENACIDAD A FRACTURA.**

Distintos factores afectan a la tenacidad a fractura de un elemento estructural, dentro de los cuales los principales son:

▪ **Espesor de la pieza:**

El espesor de la pieza afecta a la tenacidad a fractura de un elemento, debido a la restricción de la deformación transversal que, a su vez, restringe la deformación longitudinal debido al efecto Poisson.

Toda efecto de triaxialidad de tracción (fundamentalmente en cruces de soldadura) debe evitarse para evitar la disminución de la tenacidad de la pieza.

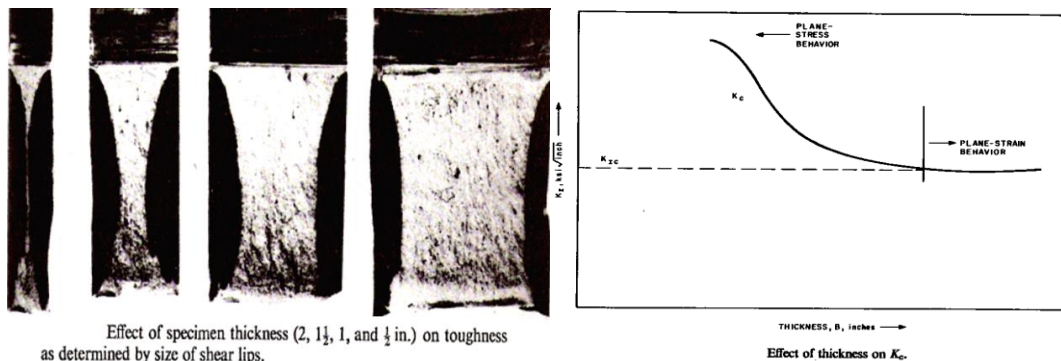
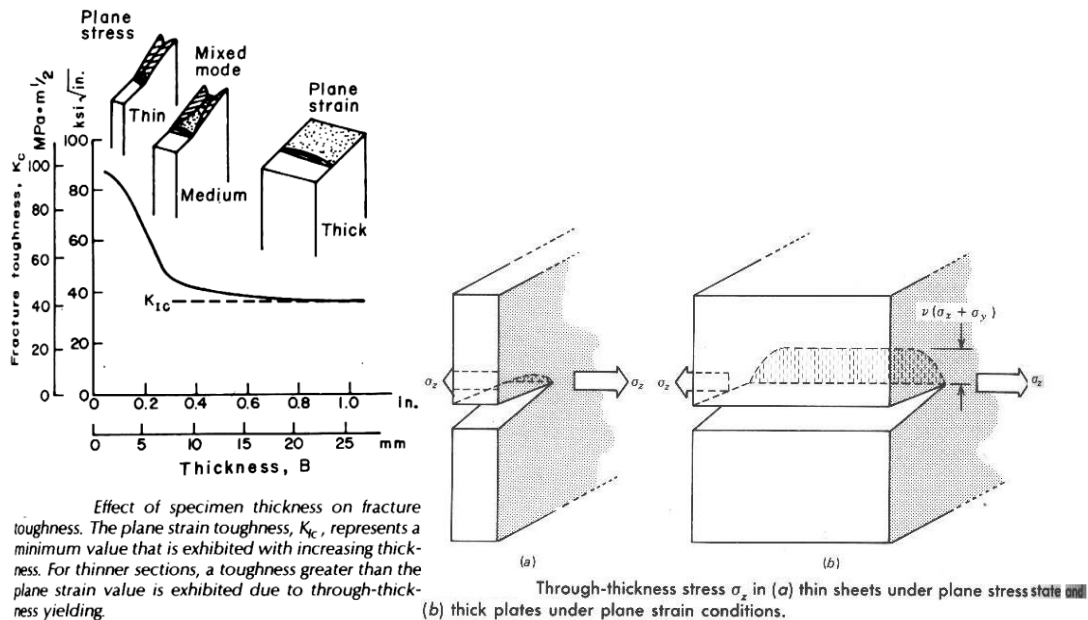
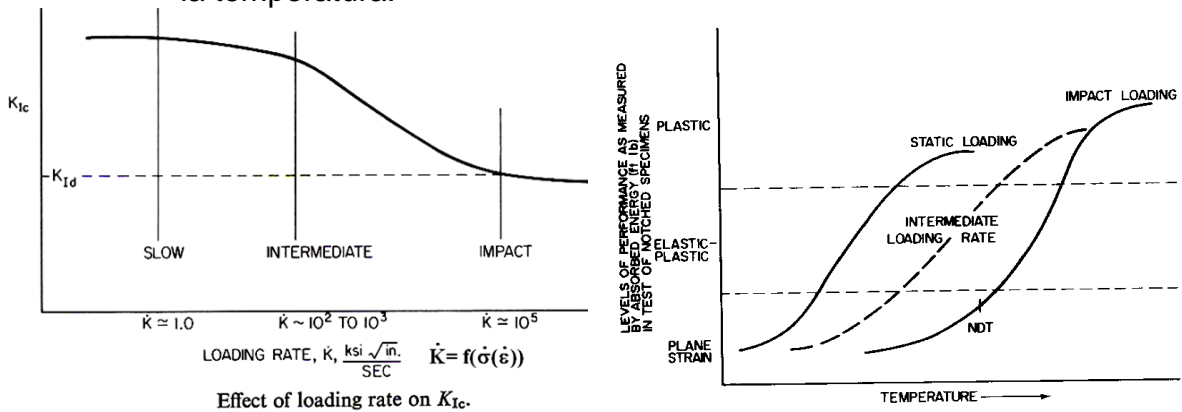


Figura 7: Efecto del espesor de la pieza en la tenacidad a fractura del material.

▪ **TEMPERATURA Y VELOCIDAD DE APLICACIÓN DE LA CARGA.**

La tenacidad a fractura, disminuye con el aumento de la velocidad de aplicación de la carga $K_{IC_din} = K_{Id} < K_{IC}$ y aumenta con el incremento de la temperatura.



Effect of loading rate on K_{Ic} .
Figura 8: Efecto de la velocidad de aplicación de la carga en la tenacidad a fractura del material.

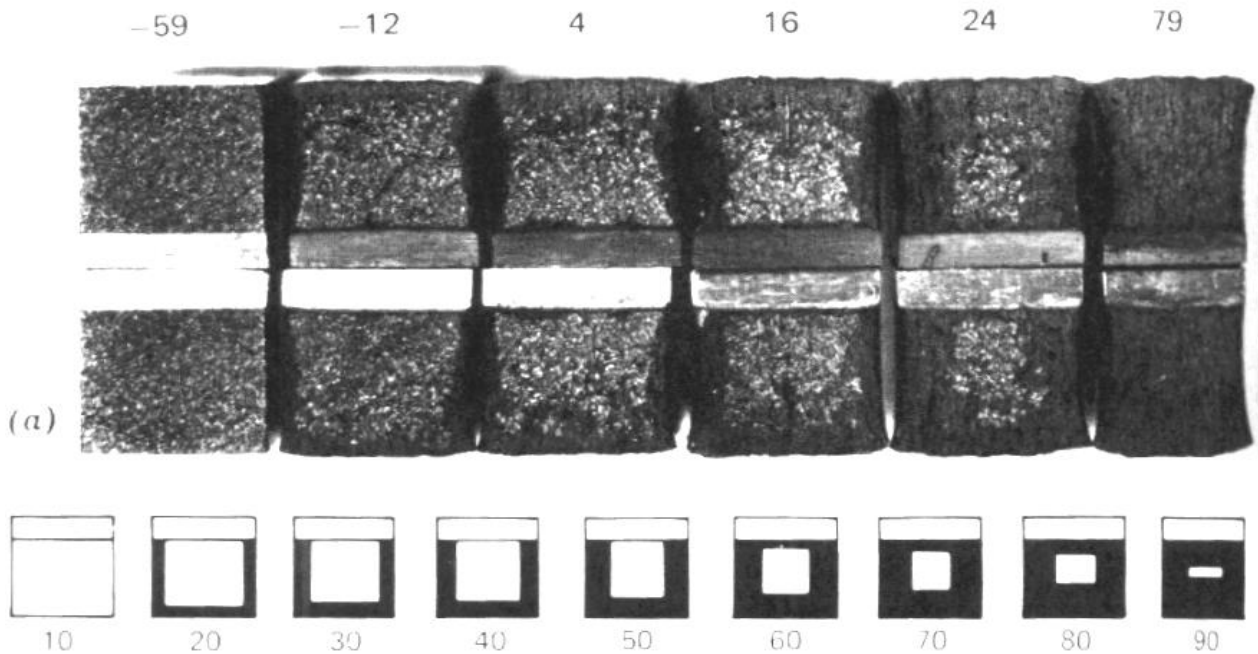


Figura 9: Efecto de la temperatura en la tenacidad a fractura del material.

▪ **CORROSIÓN.**

Experimentalmente se ha comprobado la disminución en la tenacidad a fractura de una pieza en ambiente corrosivo.

La causa del presente fenómeno es la acción de la corrosión (pérdida de masa) de en la punta de la fisura.

Por lo tanto la tenacidad a fractura en ambiente corrosivo $K_{SSC} < K_C$

Este concepto es fundamental en la evaluación de estructuras existentes (fundamentalmente puentes) debido al peligroso fenómeno combinado de corrosión – fatiga, presente en muchas de las estructuras actualmente en servicio.

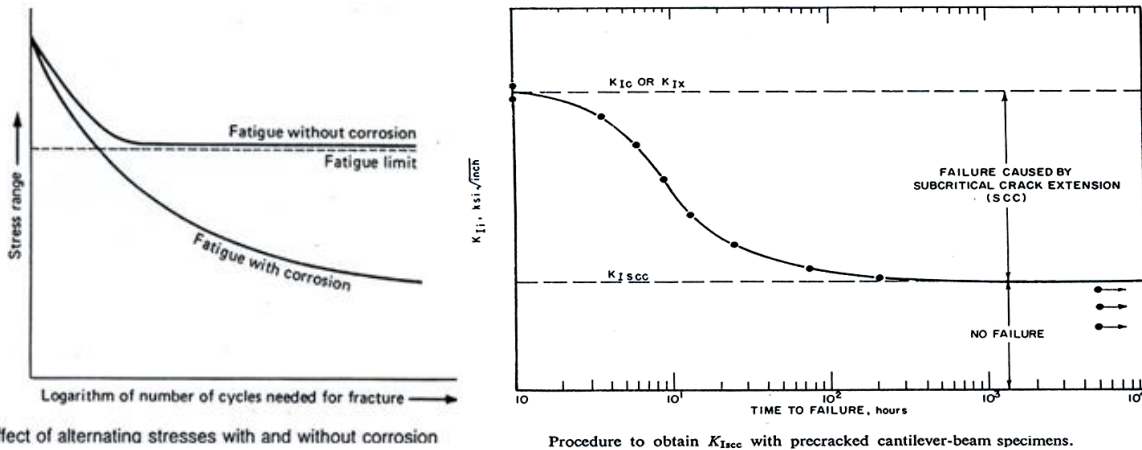
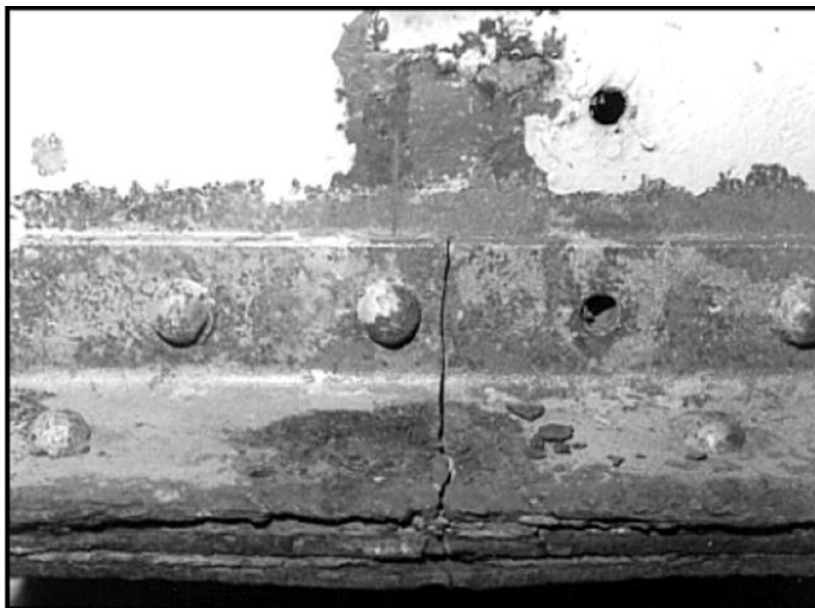


Figura 10: Efecto de la corrosión en la tenacidad a fractura del material.



Fatigue Crack at a Corrosion Notch in a Railroad Stringer
Figura 11: Fisura en entalla generada por corrosión.

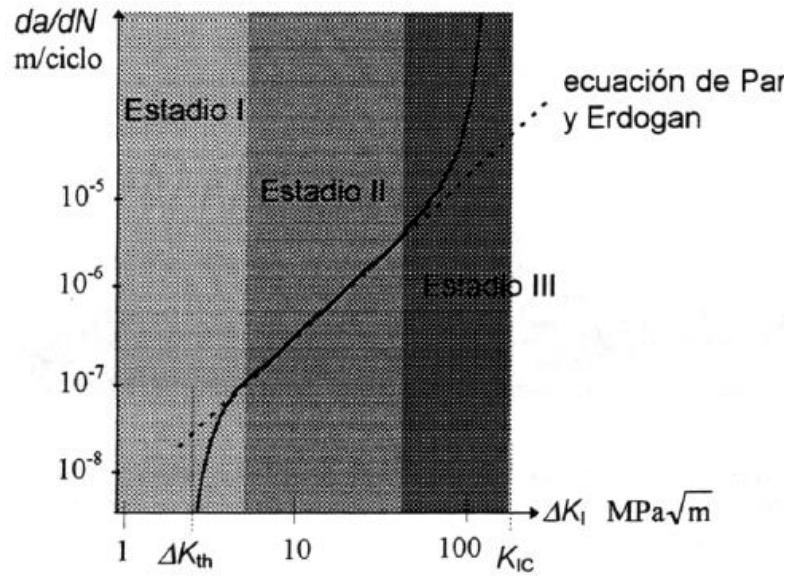
- **FATIGA.**

El fenómeno de fatiga es un proceso de disminución de la resistencia del acero sometido a cargas cíclicas, fundamentalmente originado por el avance de fisuras preexistentes iniciadas en los procesos de elaboración del acero y/o de la estructura (principalmente en uniones soldadas).

Es particularmente riesgoso dado que es posible que no se evidencie en forma explícita (como ocurre con la pérdida de masa por corrosión).

El enfoque fractomecánico del fenómeno de fatiga, especialmente utilizado para el análisis a fatiga de estructuras existentes en servicio, fue propuesto por el Ing. Paris, quien propuso una relación entre la variación de la longitud de una fisura con el paso de los ciclos y el rango de factores de intensidad de tensiones actuante.

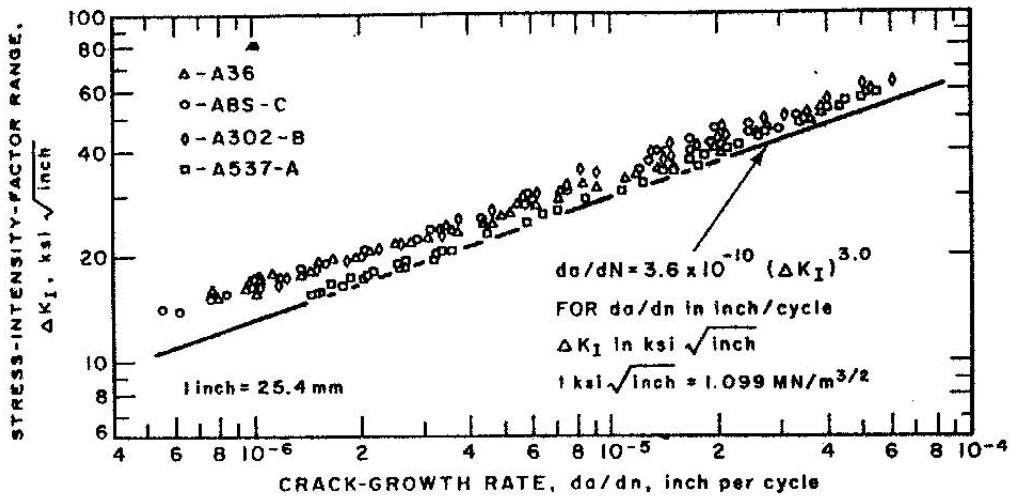
De esta forma, es posible conocer la cantidad de ciclos necesarios para que una fisura de longitud inicial a_0 alcance su valor crítico a_c para un dado material y rango de tensiones.



Estadios de fatiga sobre un diagrama de Paris.

Figura 12: Estadios de fatiga – iniciación, propagación e inestabilidad.

where $a = \text{in.}$, $\Delta K_I = \text{ksi}\sqrt{\text{in.}}$, $\frac{da}{dN} = 3.6 \times 10^{-10} (\Delta K_I)^{3.0}$



Summary of fatigue-crack-growth data for ferrite-pearlite steels.

Figura 13: Curva de velocidad crecimiento de fisuras con el incremento del factor de intensidad de tensiones, de para aceros A-36 y otros.

- Rango de factores de intensidad de tensiones:

$$\Delta K_I = Y \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

- Velocidad de crecimiento de una fisura - Ley de Paris:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_I^m$$

- Número de ciclos para alcanzar la longitud crítica de una fisura a_{cr} :

$$N_f = \int_{a_0}^{a_{cr}} \frac{da}{C \cdot \Delta K_I^m}$$

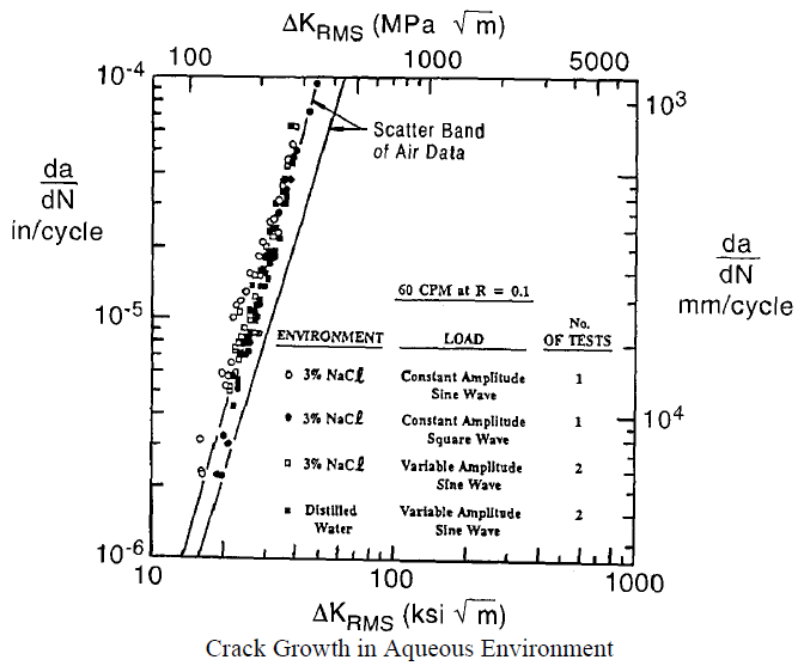
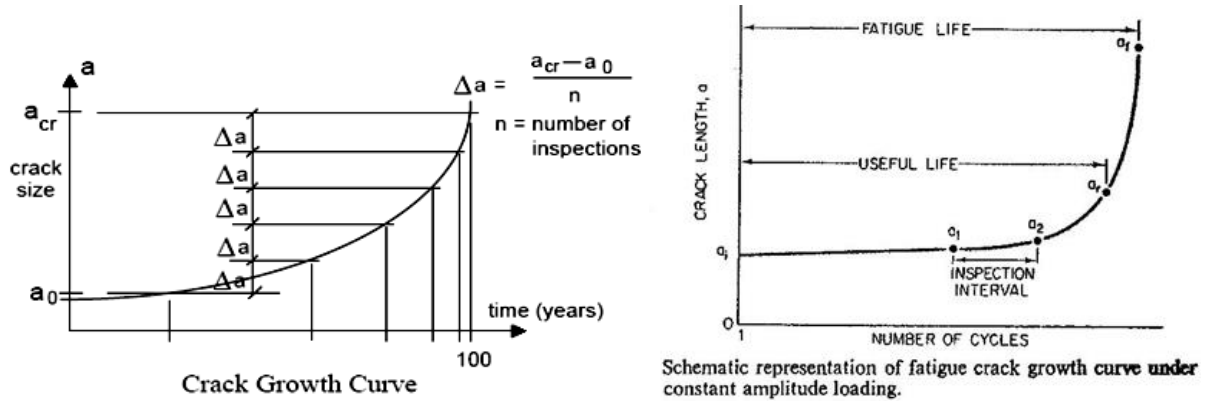


Figura 14: Curva de crecimiento de fisuras para disantos ambientes corrosivos

En la práctica, las normas de diseño de puentes por ejemplo, la AASHTO, presentan distintos detalles constructivos típicos, lo cuales clasifica según su susceptibilidad a los efectos de las cargas cíclicas e indica la forma de obtener el rango de tensiones admisibles, teniendo en cuenta la cantidad de ciclos prevista durante la vida útil de la estructura.

En la evaluación de estructuras existentes sometidas a cargas cíclicas, el camino a seguir, en cambio, es el análisis fractomecánico de fatiga, suponiendo longitudinales de fisuras iniciales (si es que no son detectables por ensayos no destructivos o en simple inspección visual), estimar la cantidad de ciclos que sufrió cada elemento de la estructura en su vida de servicio pasada (puede utilizarse la regla de Palmgren - Miner para tener en

cuenta la variabilidad de amplitudes de tensiones) y así estimar la cantidad de ciclos que son necesarios para que la longitud de fisura actual se incremente hasta su valor crítico. Obtenida la cantidad de ciclos, con su correspondiente factor de seguridad, puede conocerse la vida útil remanente del elemento estructural en cuestión.

De esta forma, es posible estimar la vida útil de estructuras con proceso de fatiga (si coexiste corrosión, debe analizarse teniendo en cuenta el rango de factores de intensidad de tensiones con corrosión ΔK_{SCC}) y proceder a su reeducación estructural para obtener una vida útil remanente mayor, si se lo considera conveniente.

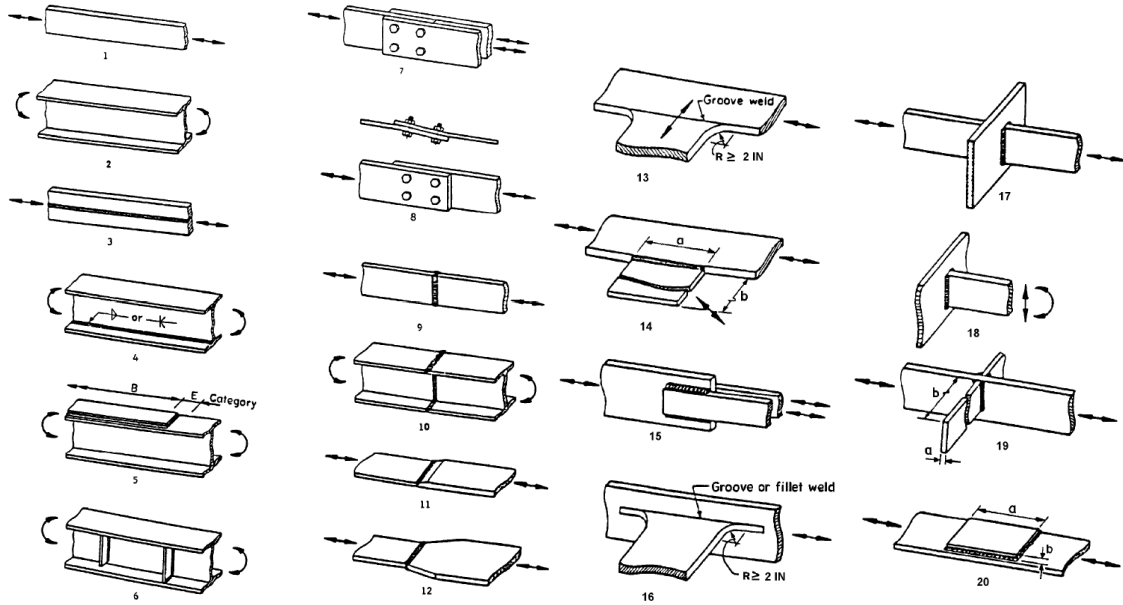


Figura 15. Detalles constructivos para análisis de fatiga.

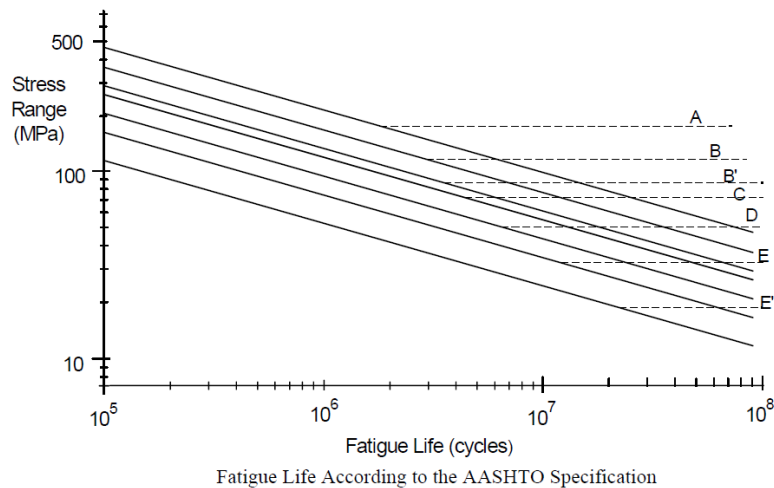


Figura 16. Resistencia a fatiga para distintas clasificaciones de detalles.

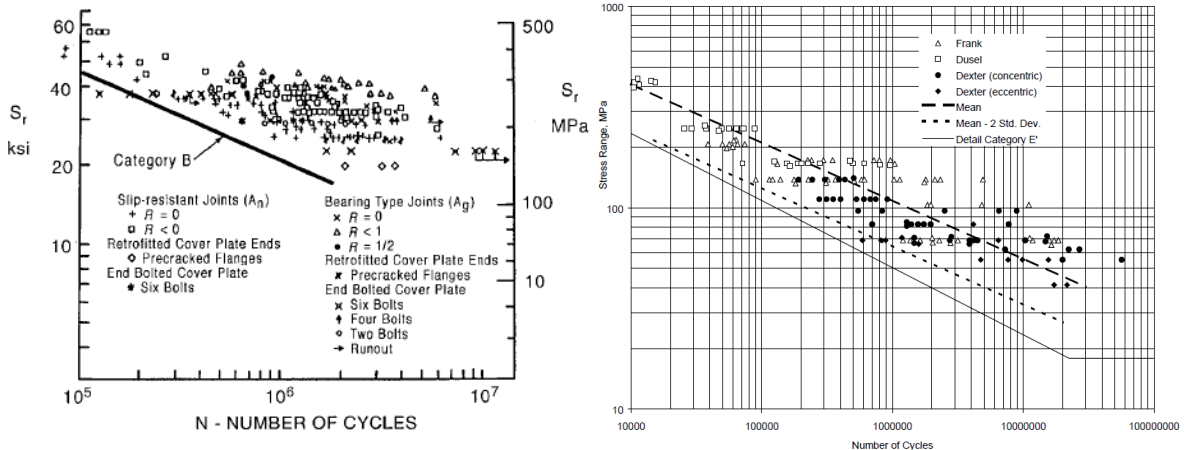


Figure 46 Fatigue Resistance of High Strength Bolted Shear Splices

Figura 17: Resistencia a fatiga de uniones mediante bulones de alta resistencia y anclajes.

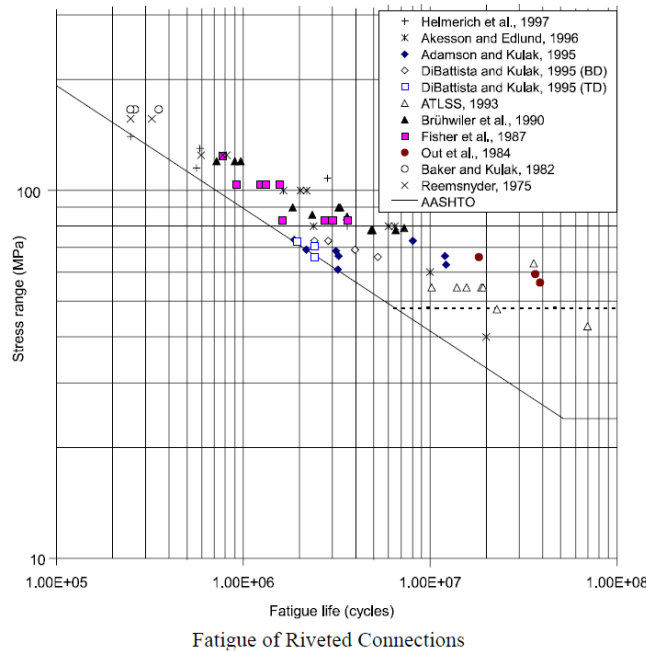


Figura 18: Resistencia a fatiga de uniones roblonadas, características de puentes ferroviarios metálicos de largo servicio.

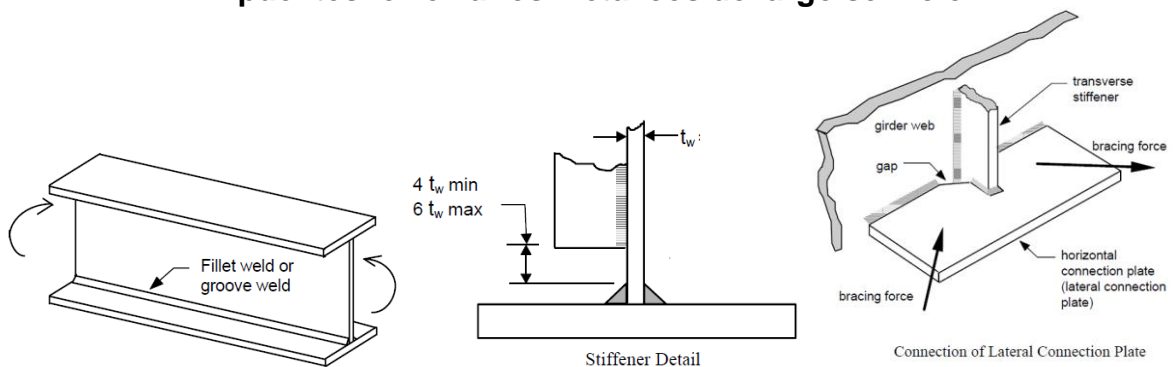
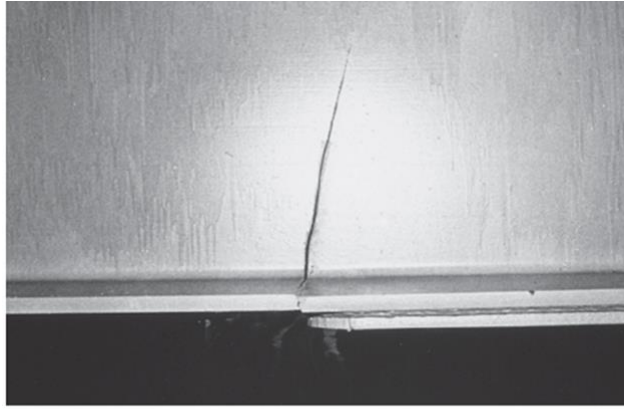


Figura 19: Detalles típicos en el diseño de puentes, los cuales presentan una calificación a fatiga con valores de rango de tensiones admisibles sensiblemente menores que para cargas estáticas.



Development of fatigue crack at cover plate ends on the multibeam Yellow Mill Pond Bridge in Connecticut in 1976. (Courtesy: John W. Fisher.)



Crack in Girder Web from Splice in Longitudinal Stiffener

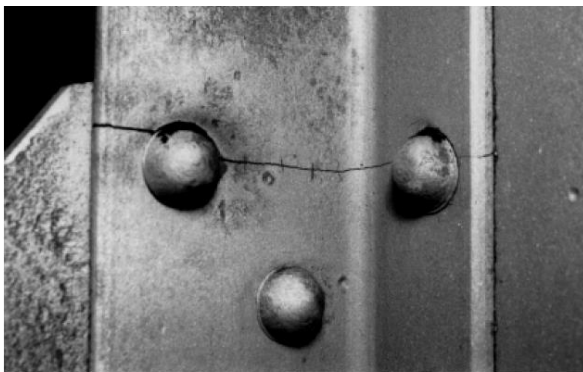
Figura 20: Fisuras en detalles de vigas principales de puentes.



Fatigue Crack at Coped Top Flange of Riveted Connection



Figura 21: Fisuras en uniones roblonadas.



Fatigue Crack Through Net Section of a Tension Member



Cracked Stringer to Floorbeam Connection Angle

Figura 22: Fisuras en uniones roblonadas.

- **FATIGA INDUCIDA POR DEFORMACIÓN (OUT OF PLANE).**

Este fenómeno es fundamental en el diseño y evaluación de puentes debido a que se produce en un detalle muy común e inevitable, o sea, las uniones entre vigas transversales y longitudinales. Por lo tanto, de acuerdo a como haya sido diseñada esta unión, puede ocurrir una disminución considerable de la resistencia a fatiga de las vigas principales de puentes.

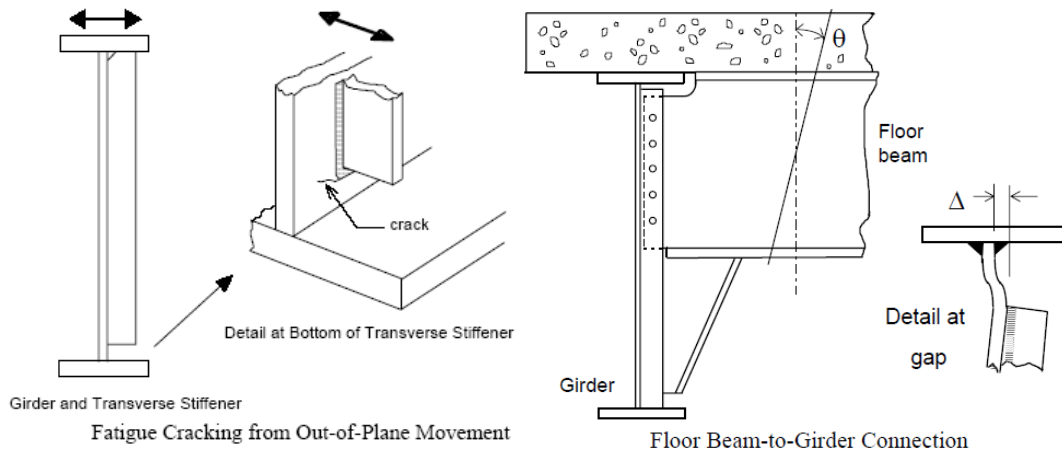
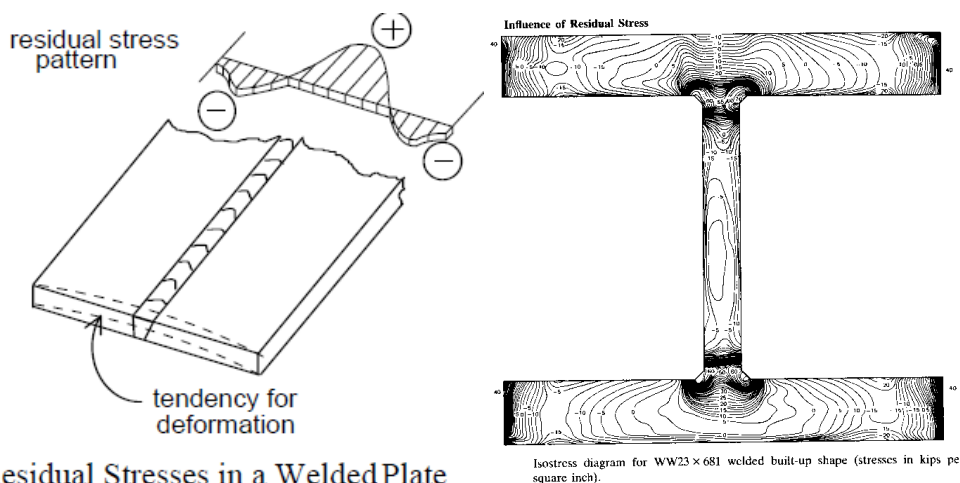


Figura 23: Fatiga inducida por deformación fuera del plano.

- **TENSIONES RESIDUALES.**

Las tensiones residuales, por ejemplo por soldadura, cumplen un factor importante en la capacidad de carga de estructuras sometidas a fatiga (no así en las que poseen cargas predominantemente estáticas) dado que las zonas de plastificación que éstas generan son zonas de inicio de fisuras que luego son propagadas por la repetitividad de cargas. En estructuras con cargas predominantemente estáticas, dichas zonas se encuentran confinadas por zonas elásticas y, por ende, posee una importancia mucho menor.



Residual Stresses in a Welded Plate
Figura 24: Tensiones residuales por soldadura que incrementan o disminuyen los rangos de tensiones actuantes.

- **MIEMBROS DE FRACTURA CRITICA (FRACTURE CRITICAL MEMBERS).**

Se conoce como miembros o elementos de fractura crítica a aquellos que, ante su falla, la estructura colapsa en forma parcial o total. Son generalmente elementos traccionados de estructuras isostáticas o de baja hiperestaticidad. Es fundamental que tanto en el diseño, construcción y mantenimiento se tengan claramente identificados a estos elementos con el fin de que puedan ser inspeccionados con mayor rigurosidad.

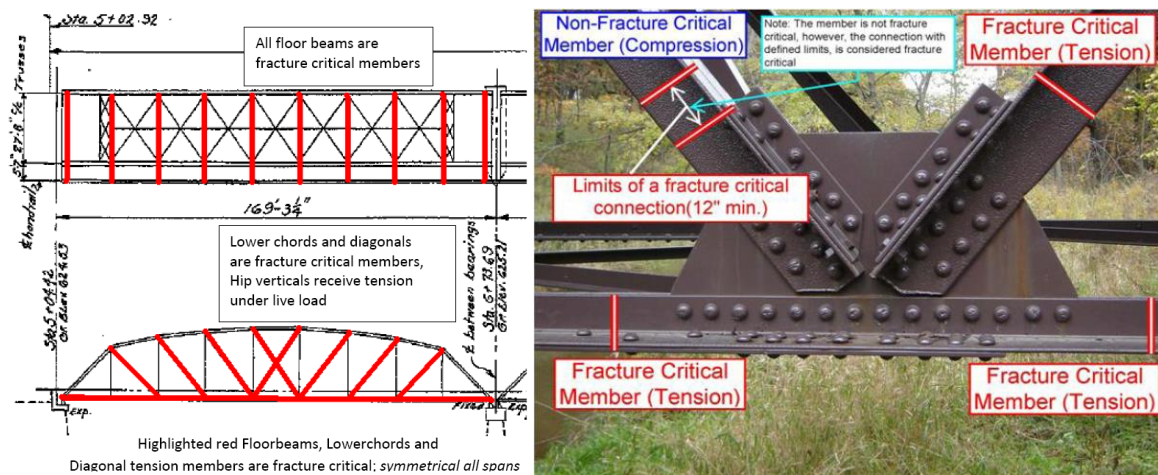


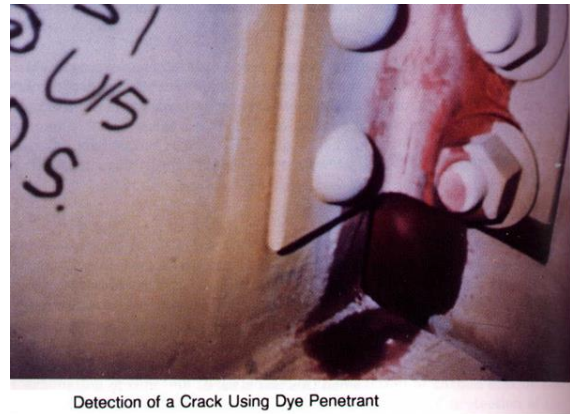
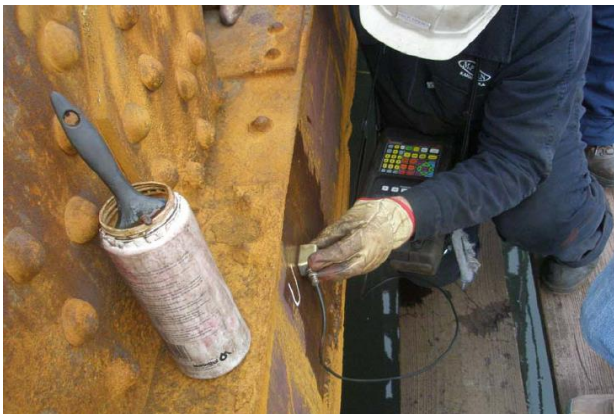
Figura 25: Miembros de fractura crítica en puentes de viga principal superior

- **MEDIDAS DE MITIGACIÓN DURANTE EL DISEÑO Y/O LA READECUACIÓN ESTRUCTURAL.**

- Identificar zonas de peligrosidad ante un proceso de fisuración y zonas donde dicha peligrosidad no es tal. Diferenciar, mediante marcado, dichas zonas para facilitar los procesos de inspección.
- Evitar procesos corrosivos que faciliten la iniciación de procesos de fisuración (corrosión – fatiga) mediante un correcto diseño anticorrosivo (correcto drenaje, eliminación de zonas de acumulación de agua, eliminación de zonas sensibles a la acción electrolítica, etc.) y correcta protección contra acciones medioambientales.
- Diseñar teniendo como meta que la estructura posea tolerancia a la falla de uno o más elementos previamente a que se llegue a una condición crítica. Se deben crear las condiciones, lo suficientemente largas en el tiempo, como para identificar un proceso de fisuración peligroso y, así, poder actuar en consecuencia.
- Diseñar de tal forma que el proceso de inspección sea lo más simple posible.
- Identificar en la documentación conforme a obra, los elementos estructurales críticos (Fracture Critical Members FCM) para dirigir especialmente las inspecciones sobre éstos.
- Mejorar detalles soldados en secciones críticas.
- Evitar concentradores de tensiones.
- Amolar longitudinalmente sobremontas de soldaduras.
- Evitar respaldos en uniones soldadas a tope.
- Evitar cambios abruptos de espesores. Generar transiciones.
- Generar “arrestadores” de fisuras (orificios).
- Reducir el rango de tensiones actuantes.
- Reducir el número de ciclos de rango de tensiones que generan daño acumulado.
- Inspeccionar regularmente zonas o secciones reparadas para evaluar su efectividad.

- **REHABILITACIÓN.**

- **Limpieza general** (fundamentalmente herrumbre).
 - Hidrolavado o arenado.
- **Inspección visual.**
- **Ensayos destructivos (ED).**
 - Ensayo de Tracción y Químico – Soldabilidad.
 - Curva de Charpy.
- **Ensayos no destructivos (END).**
 - Ultrasonido.
 - Espesores remanentes.
 - Uniones soldadas (fundamentalmente a tope).
 - Partículas magnéticas o tintas penetrantes.
 - Uniones soldadas (fundamentalmente filete).
- **Ensayo de tracción y químico – soldabilidad.**
- **Verificación estructural.**
 - Cargas estáticas según calificación vial del cruce.
 - Cargas variables estimando TMDA pasado y futuro.
- **Rehabilitación.** Evaluación de la necesidad de reforzar/ reparar la estructura.
- **Estimación de la vida útil remanente.** Evaluación estructural del puente reparado teniendo en cuenta secciones reforzadas con material nuevo sobre material fatigado.



Detection of a Crack Using Dye Penetrant



Magnetic particle testing—Placement of magnetic field.

Figura 26: END – Ultrasonido, tintas penetrantes y partículas magnéticas

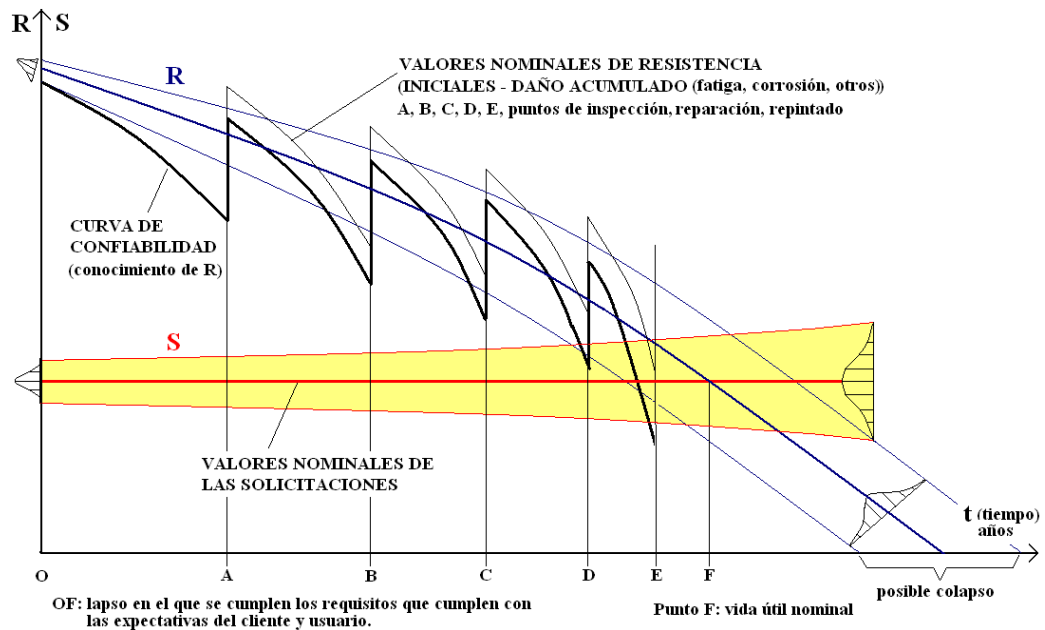


Figura 27: Esquema ilustrativo de la variación de la resistencia de una estructura metálica sometida a procesos de fatiga y corrosión a lo largo del tiempo (ciclos). Puede observarse los efectos de procesos de inspección y rehabilitación sobre la curva de resistencia.

• CONCLUSIONES.

Existen una gran cantidad de estructuras metálicas en servicio sometidas a altos rangos de tensiones, en especial, los puentes viales y ferroviarios.

Fenómeno como el de fatiga, combinado o no con el de corrosión, hacen que muchas de dichas estructuras tengan su vida de servicio actual caduca.

Es frecuente realizar análisis estructurales de puentes con cargas estáticas, sin tener en cuenta su estado de conservación, que arrojan resultados satisfactorios hoy día (tomando al material con su resistencia máxima y a los elementos con secciones plenas).

Sin embargo, cuando se realiza el análisis a fatiga teniendo en cuenta el estado de conservación actual y las distintas tipologías de detalles constructivos de la estructura en cuestión, en muchos casos se obtienen resultados insatisfactorios.

Particular atención debe prestársele a estructuras que “a la vista” no poseen un deterioro apreciable (por ejemplo, puentes sin procesos corrosivos de importancia) debido a que pueden pasar por estructuras competentes pero que, en realidad, muy posiblemente (con alta probabilidad), ante un análisis estructural completo, incluyendo el análisis de fatiga, se obtengan resultados que indiquen que la estructura analizada posee su vida útil caduca y deba ser rehabilitada.

Debe tenerse en cuenta la enorme cantidad de colapsos de puentes que existieron en el mundo a lo largo de la historia debido a este fenómeno, la mayoría catastróficos y sin “indicios” evidentes previos.

Por tal motivo, debe recomendarse a quienes corresponda, el hábito imprescindible e ineludible de la práctica de rutinas de mantenimiento preventivo y correctivo que permitan conocer y rehabilitar la confiabilidad

estructural de estructuras existentes, principalmente, aquellas que prestan servicios esenciales.

- **BIBLIOGRAFÍA.**

- 1- ANSI/AASHTO/AWS D1.5 – 96: “The Bridge Welding Code”
- 2- AWS: “Welding Handbook” Vol. 1. Edit. AWS (1976).
- 3- POLIMENI, F.: “Comportamiento del Acero Estructural” SOMISA (1986).
- 4- HERZTBERG, R. W.: “Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials”. Edit. John Wiley & Sons. (1983).
- 5- FISHER, J. W.: “Fatigue and Fracture in Steel Bridges”. Edit. John Wiley & Sons (1984).
- 6- POLIMENI, F. y M.: “Curso Introducción a la Mecánica de Fractura” AIE (2005).
- 7- GURNEY, T. R.: “Fatigue of Welded Structures” Cambridge University Press. (1979).
- 8- ROLFE, S. T. y BARSOM, J. M.: “Fracture and Fatigue Control in Structures” Edit. Prentice Hall. (1971).
- 9- PARIS, P.C y ERDOGAN, F.: “A Critical Analysis of Crack Propagation Laws”. Transactions of the ASME Journal of Basic Engineering. Series D 85, N° 3 (1963).
- 10- BARSOM, J. M.: “Fracture Mechanics Restropective”. ASTM (1987).
- 11- BROEK, D.: “Elementary Engineering Fracture Mechanics”. Edit. Nijhoff
- 12- AASHTO: “LRFD Bridge Design Specifications”
- 13- NATIONAL STEEL BRIDGE ALLIANCE: “A Fatigue Primer for Structural Engineers”.
- 14- PÉREZ IPIÑA, J.: “Mecánica de Fractura” Edit. Alsina.