

ACEPTACIÓN DE DEFECTOS MECÁNICOS EN ESTRUCTURAS

Martín Eduardo Polimeni
Ingeniero Civil.
Ciudad de Buenos Aires - Argentina.

Profesor Estructuras Metálicas II de la Escuela Superior Técnica del Ejército.
Docente de la asignatura Cimentaciones de la FIUBA.
Miembro de la Comisión Permanente de Estructuras de Acero del CIRSOC.

Resumen del Trabajo

Es frecuente, en el ejercicio de la Ingeniería Estructural, encontrarse con estructuras que presentan **defectos mecánicos (fisuras)** y que exigen, en principio, una inmediata evaluación de su **confiabilidad**. Sin embargo, esas fisuras, pueden no comprometer la **estabilidad** de las estructuras. Para poder demostrarlo se recurre a la **Mecánica del Daño** (Damage Mechanics) y a la **Mecánica de Fractura** (Fracture Mechanics). Aplicando ambas, podemos calcular:

- la estabilidad de la fisura → **Aceptación de defectos**.
- su velocidad de propagación (FATIGA) → **Vida útil remanente**.

Estas disciplinas se han desarrollado a partir de la segunda mitad del siglo XX y son aplicables a, prácticamente, **todo tipo de materiales de construcción** (hormigón, rocas, metales, polímeros). Como ejemplo se aplica la Mecánica de Fractura al estudio de la confiabilidad de un silo de gran capacidad en el cual se desarrollaron fisuras en su pared por **subarmado** (resultado de no haberse considerado las **condiciones de borde** del estado membranar). El análisis del **comportamiento de estas fisuras** a partir de CMOD (crack mouth opening displacement) y el respectivo campo tensional, demostró que, aunque con menor confiabilidad, ésta se mantenía dentro de valores aceptables y que no era necesario ningún refuerzo u otro tipo de reparación.

Abstract

*It's frequent, in Structural Engineer exercise, to deal with structures that present **mechanical defects (cracks)** that demand, in principle, an immediate evaluation of its **reliability**. Nevertheless, those cracks can not jeopardize the **stability** of those structures. To demonstrate it resorts to the **Damage Mechanics** and to **the Fracture Mechanics**. Applying both, we can calculate:*

- *the crack stability → Acceptance of Defects.*
- *its speed of propagation (FATIGUE) → Remainder life.*

*Those disciplines have been developed from the second half of XX century and are applicable to, practically, **all type of construction materials** (concrete, rocks, metals, polymers). As an example it's applied the Fracture Mechanics to the study of the reliability of a great capacity silo, in which cracks in a **sub reinforced** wall, were developed (consequence to have not considered the membrane state **boundary conditions**). The **behavior analysis** of these **cracks** from CMOD (crack mouth opening displacement) and the respective **tensional field**, demonstrated that, although with smaller reliability, this one remains within acceptable values and that it was not necessary to increase reinforcement or another repair.*

1. INTRODUCCIÓN.

- 1.1 El problema estructural a tratar y la propuesta de una posible solución.
- 1.2 Definición de **defecto mecánico**. Tipología.
- 1.3 Escala del fenómeno: dimensión relativa de las discontinuidades (fisuras) con respecto a los constituyentes del material y de la dimensión del componente estructural.
- 1.4 Análisis de un cuerpo sólido fisurado.

2. CONSIDERACIONES, SOBRE LOS ACTUALES MÉTODOS DE CÁLCULO.

- 2.1. Cálculo de tensiones y deformaciones. Comparación de Valores. Ecuaciones diferenciales sin Principios físicos subyacentes.
- 2.2. Cálculo mediante Métodos Energéticos. Ecuaciones Integrales. Principio de mínima energía.

3. MECÁNICA DE FRACTURA.

La Mecánica de Fractura aplicada a materiales con distinto comportamiento $\sigma - \varepsilon$ o $P - \Delta$ y especialmente aplicada al H^oA^o y H^oP^o.

4. EJEMPLO de evaluación de la CONFIABILIDAD estructural de una Obra de H^oA^o con defectos mecánicos actuales y/o potenciales.

5. CONCLUSIONES.

6. BIBLIOGRAFÍA.

1. INTRODUCCIÓN

- 1.1. En el ejercicio de la Ingeniería Estructural es habitual que se deban encarar las siguientes tareas:

- 1.1.1 Evaluación de la CONFIABILIDAD estructural de una Obra (nueva o con cierta antigüedad)
- 1.1.2 Aplicación del Control de Calidad a la etapa de Mantenimiento (ver punto 1.2.3).
- 1.1.3 Peritajes (similar a 1.1.1) cuyas conclusiones se utilizarán en la Toma de Decisiones empresariales.

También es frecuente y más de lo que se supone, que se encuentren:

- 1.1.4 DEFECTOS MECÁNICOS (se definirán más adelante).
- 1.1.5 ERRORES de CÁLCULO en la documentación de Obras ya construidas.

- 1.2. Definición de Defecto Mecánico. En los materiales y en las estructuras se suele encontrar una variedad de defectos (iniciales o durante la vida útil). Por ejemplo:

- **Materiales.**

- Corrosión
- Carbonatación (H^o). Baja resistencia

- **Estructuras.**

- Errores dimensionales. Desalineación.
- Etc.

Sin embargo y aunque algunos de los defectos detallados pueden preocupar, ninguno es tan inquietante como lo son las FISURAS (separaciones, discontinuidad del material, fragmentación de secciones, etc.). A estas fisuras, las denominamos **Defectos Mecánicos**.

A su vez, a estas fisuras las podemos clasificar en, considerando parámetros de medición (para **HORMIGÓN**):

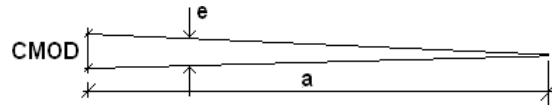


Figura 1

CMOD: apertura de la boca de la fisura (crack mouth opening displacement).

a: longitud.

e: ancho. De modo práctico, sólo consideraremos, en la siguiente clasificación, el valor de "e":

- de **gran** dimensión $e > 0.3 \text{ mm}$.
- de **mediana** dimensión $0.1 < e < 0.3 \text{ mm}$.
- de **pequeña** dimensión $e < 0.1 \text{ mm}$.
- **fisuras potenciales**.

estas últimas, son de gran importancia dado que puede ocurrir que:

- un cálculo indique que deba ocurrir fisuración.
- la fisura no se detecta ni visualmente ni mediante END.

Sin embargo, y debido a la resistencia a tracción del H° (bastante variable) es posible que la fisura no se haya iniciado pero que este a punto de hacerlo. A este caso, lo denominaremos fisura potencial.

Aclaremos el punto anterior. Se muestra el gráfico $P - \Delta$ de una probeta de hormigón (no armado) sometida a tracción.

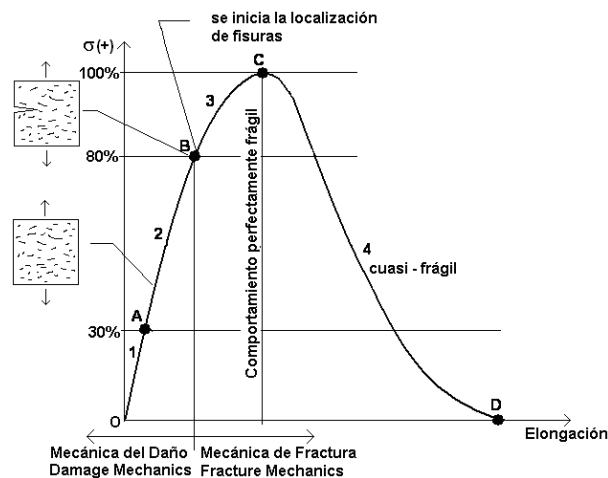


Figura 2

Hasta el punto **A** no se inician fisuras (debidas a la carga exterior). Sin embargo, a medida que nos acercamos al punto **B** se presentan lo que hemos denominado fisuras potenciales.

Desde el punto **O** hasta el punto **B** se desarrollan las fisuras de pequeña y mediana dimensión $\sim 0 \text{ mm} < e < 0.3 \text{ mm}$

A partir del punto **B** las fisuras pequeñas y medianas, distribuidas, hasta ese momento, en forma aleatoria y existiendo una uniformidad aproximada de deformaciones a lo largo de la probeta, tienden a aglutinarse (localizarse en fisuras mayores (strain localization)) y, a partir de este punto, se van incrementando sus parámetros (CMOD, a, e) y la deformación a lo largo de la probeta deja de ser uniforme. Esta es la etapa, (sumamente peligrosa

pues puede concluir en la fragmentación del componente estructural) que se estudia mediante la Mecánica de Fractura.

Aclaremos el punto 1.1.2. En la evaluación de la CONFIABILIDAD de una estructura para la determinación de la VIDA ÚTIL REMANENTE (VUR), es necesario actualizar, aplicando la Mecánica de Daño y la Mecánica de Fractura, el conocimiento de la resistencia R de la estructura. Si diagramamos:

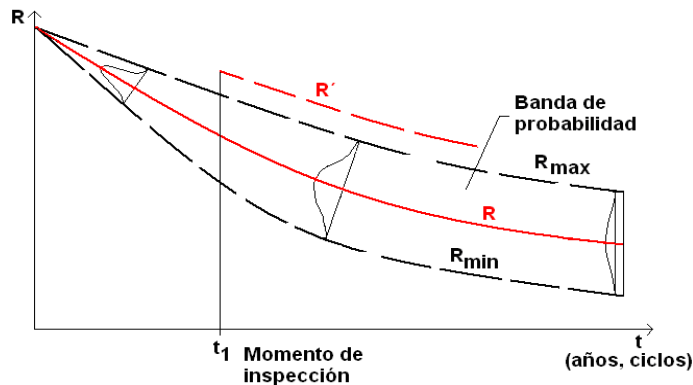


Figura 3

A medida que transcurre el tiempo o ciclos, disminuye la certidumbre sobre los valores de Resistencia. Disminuye el valor medio $\bar{R}$ y se incrementa el coeficiente de desvío δ (la curva de distribución se achata). En cada inspección (Control de Calidad de Mantenimiento) por ejemplo, al tiempo t_1 , el conocimiento (y por lo tanto, la confiabilidad) se incrementa, incluso superando el valor estadístico R_{max} (depende de los instrumentos de cálculo y de medición utilizados) creándose una nueva curva de deterioro R' .

1.3. Escala del fenómeno. Recurrirémos a tres niveles de comparación.

IDEAL: se trata de un cuerpo sólido **homogéneo, isótropo y continuo**. Corresponde al estudiado por la Teoría de la Elasticidad y Resistencia de Materiales. Coincide con la **representación** gráfico - intuitiva del **espacio matemático** (ideal) en el cual, no existen direcciones privilegiadas (isotropía) y al que se le aplican funciones continuas (analíticas) (continuidad y homogeneidad).

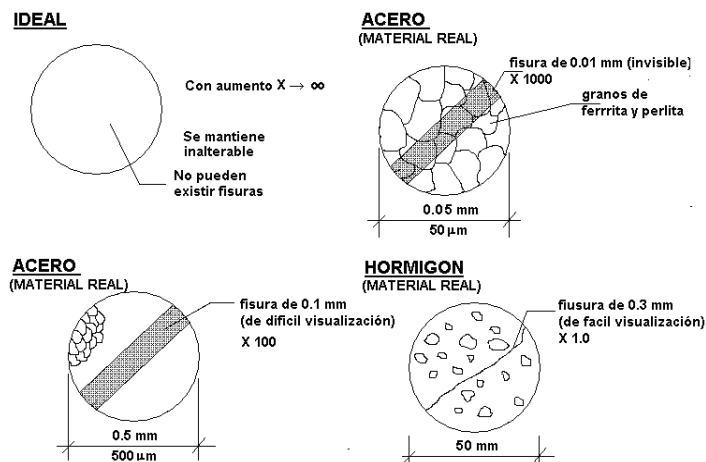
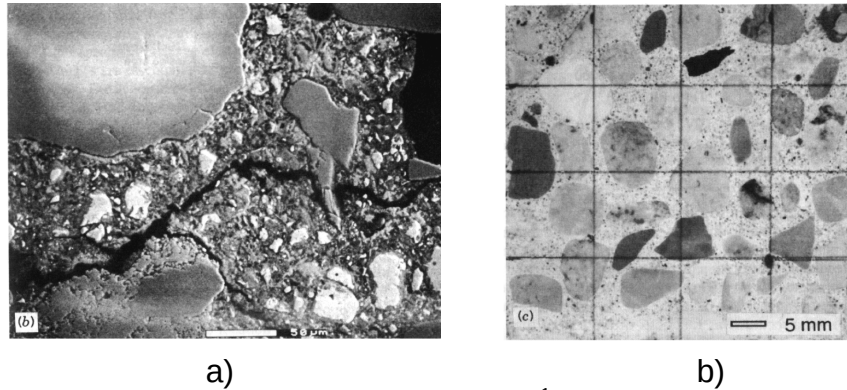


Figura 4

En lo anterior, se puede observar la enorme diferencia cuantitativa, que se transforma en cualitativa, en lo que se refiere a la aplicación de **un mismo instrumento matemático: funciones continuas en un espacio homogéneo, isótropo y continuo.**



(extraído de SHAH¹)
Figura 5

- 1.4. Analizaremos a continuación, de modo gráfico – intuitivo, el problema de un cuerpo sólido fisurado. Supondremos fisuras del tipo lenticular y consideraremos, además, dos distintas dimensiones relativas entre cuerpo y defecto (los dos cuerpos son idénticos).

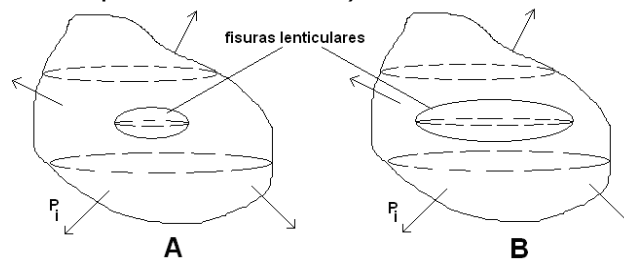


Figura 6

que, en la Mecánica de Fractura, se representa en el plano y de modo genérico:

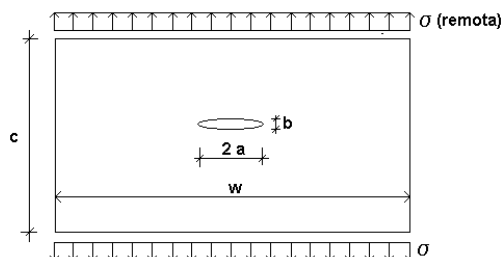


Figura 7

Si intentáramos conocer la CONFIABILIDAD estructural del cuerpo fisurado, tendríamos dos opciones:

- la primera, que por ahora consideramos prácticamente irrealizable, que consistiría en la aplicación de una **Teoría de la Elasticidad de cuerpos sólidos heterogéneos, anisótropos y continuos.** Se aplicaría, de este modo, una metodología similar a la de Cálculo actual convencional incluido el Método de los Elementos Finitos.

- la segunda opción sería aplicar la Mecánica de Fractura, no al estudio del cuerpo sólido, sino a la **fisura**. Se considera, por esta razón, a la **fisura, discontinuidad, defecto**, etc., como un **nuevo componente estructural**.

Explicamos, ahora, la razón por la cual más arriba hemos considerado dos cuerpos sólidos **A** y **B** con distintas relaciones de dimensiones cuerpo/fisura: relación $\frac{2a}{w}$ de la Figura 7.

Ocurre que, en la Mecánica de Fractura, para **un mismo campo tensional** (tensión σ remota), la estabilidad de la fisura (su no propagación) depende de las dimensiones $2a$ y w . Es decir, se puede dar que:

- en el cuerpo **B**, la confiabilidad sea nula (el cuerpo se fragmenta $\equiv$ colapso de la estructura).
- en el cuerpo **A**, la fisura sea estable y, por lo tanto, el cuerpo permanezca integro.

Se supone, de inmediato, que debe existir una relación $\frac{2a}{w}$ de inestabilidad

indiferente. Esto es correcto y esa dimensión, por ejemplo $2a_0$, es nuestro valor de referencia para evaluar el grado de confiabilidad.

En el punto 3 se desarrollará lo anterior, utilizando el instrumento matemático.

2. CONSIDERACIONES SOBRE LOS ACTUALES MÉTODOS DE CÁLCULO.

Como en las casi totalidad de los fenómenos mecánicos, sea estos estáticos o dinámicos, aplicados a medios continuos (o trayectorias continuas) disponemos, en la actualidad, de **dos métodos** para analizarlos:

2.1 Aquel en que se aplica el **cálculo diferencial** y en el cual se adoptan variables que se corresponden con parámetros y propiedades físicas y funciones continuas $F(x,y,z)$ aplicables tanto a:

- la ley que gobierna el fenómeno físico.
- las condiciones de borde.

Al aplicar este método, debemos adoptar un ámbito (cuerpo sólido) que coincida con el **campo de validez** del mismo instrumento matemático o sea, campo de validez $\equiv$ constitución física del cuerpo sólido (en nuestro caso), **homogéneo, isótropo y continuo**.

Las **leyes que gobiernan** el fenómeno físico se corresponden con las estudiadas por la Teoría de la Elasticidad. Sin embargo, este método presenta como mayor dificultad:

- 2.1.1 que la **ley que gobierna** un problema físico determinado se corresponde con una ecuación diferencial en derivadas parciales y que, por lo tanto:
- 2.1.2 **las condiciones de borde** (o de contorno) sólo puede ser expresadas, matemáticamente, mediante funciones: $F(x,y,z)$ (y no con cantidades discretas como en el caso de las ecuaciones diferenciales ordinarias).

El desarrollo de los métodos numéricos:

- Diferencias Finitas.
- Método de los Elementos Finitos (MEF).

constituye un enorme avance en el cálculo estructural, sin embargo, debemos tener en cuenta que:

- aún se aplican a materiales ideales (homogéneos, isotrópicos, continuos).
- todavía se siguen utilizando, masivamente, programas que se limitan al rango elástico lineal. En nuestro caso, la diferencia es significativa.

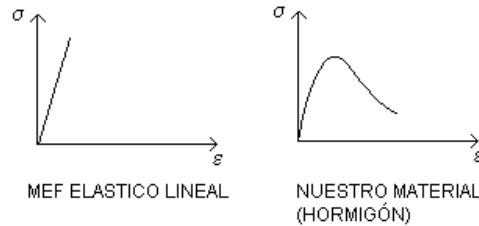


Figura 8

En el método que utiliza el cálculo diferencial no existen Principios Físicos totalizadores aplicables a la CONSERVACIÓN de alguna variable física.

2.2 Cálculo mediante Métodos Energéticos. Ecuaciones Integrales.

Este método, que ha hecho posible el desarrollo de la Mecánica de Fractura, si bien considera como el primer método las variables:

σ_{ij} : Tensión

ε_{ij} : Deformación

entes ideales (no mensurables) que nacen de una operación matemática: **paso al límite**, sólo lo hacen de modo secundario para establecer el concepto de Energía Interna de Deformación:

$$U = \frac{1}{2} \iiint_V (\sigma_x \cdot \varepsilon_x + \sigma_y \cdot \varepsilon_y + \sigma_z \cdot \varepsilon_z + \tau_{xy} \cdot \varepsilon_{xy} + \tau_{xz} \cdot \varepsilon_{xz} + \tau_{yz} \cdot \varepsilon_{yz}) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (1)$$

El método se basa en el Principio de Energía Total Mínima que considera el balance que se puede presentar en un cuerpo sólido fisurado o íntegro.

F: Trabajo de las fuerzas externas (activas y reactivas).

U: Energía Interna de Deformación (elástica y/o plástica).

W : $\begin{cases} \text{Pérdida de Energía por el desarrollo de fisuras.} \\ \text{Ganancia de Energía Superficial por el desarrollo de fisuras.} \end{cases}$

$$\Pi = U - F + W \quad (2)$$

Para obtener un valor mínimo:

$$\boxed{\frac{\partial \Pi}{\partial a} = \frac{\partial (U - F + W)}{\partial a} = 0} \quad (3)$$

siendo “a”: la dimensión de la fisura.

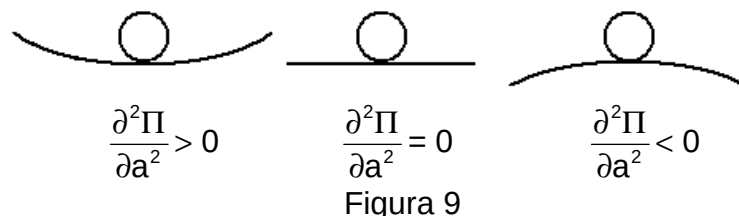
Si bien esta es la Ecuación Fundamental (por otra parte bellamente sencilla), también lo es, su segunda derivada $\frac{\partial^2 \Pi}{\partial a^2}$, dado que ésta, puede tomar los siguientes valores:

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial a^2} = \begin{cases} > 0 \rightarrow \text{Crecimiento estable (a)} \\ = 0 \rightarrow \text{Crecimiento estacionario (b)} \\ < 0 \rightarrow \text{Crecimiento Inestable (c)} \end{cases} \quad (4)$$

Aclaremos esta ecuación, pues parece presentar términos en conflictos:

- Crecimiento Estable:** significa que si se incrementan las cargas exteriores, la fisura se propagará de modo proporcional (no directamente) y que, por lo tanto, **el comportamiento es previsible**.
- Crecimiento Estacionario:** término en aparente conflicto crecimiento vs. comportamiento estacionario, significa, simplemente, que si no se incrementan las cargas la fisura se mantiene **estable**.
- Crecimiento Inestable:** caso catastrófico. Si se da esta condición, el colapso sería inevitable (aunque no siempre: ver punto 3) dado que el componente se fragmentaría (esto si es inevitable).

Obsérvese, que las tres condiciones de equilibrio tratadas, se corresponden con los ya conocidos diagramas de análisis de inestabilidades:



Este tema lo desarrollaremos, en detalle y de modo que puede ser aplicable a casos concretos, en el punto 3. La **Mecánica de Fractura**. Quizás lo más importante de éste segundo método, Energético, es que, además de presentar una **suprema belleza** debido a su sencillez, deriva de un Principio de la Física (Naturaleza) que puede **Intuirse**⁽¹⁾ y nos remitimos a la afirmación de LEONARDO: (damos tres versiones):

- “**Nessuna azione naturale si pó abbreviare**”.
- “**Toda acción llevada a cabo por la naturaleza lo hace por el camino más corto**” Códice ARUNDEL 263.

⁽¹⁾ Esta observación de Leonardo, hecha en el Siglo XV, es equivalente, a nuestro entender, a varias Monalisas. Las tres anticipan el Principio de Mínima Energía Total:

- Non si pro abbreviare → se trata de un mínimo
- Camino más corto o más económico.

Todas las formas literarias de $\partial \Pi = 0$.

- **Recuerdo** otra (cito de memoria) “**La naturaleza se comporta del modo más económico**”.

Analizando estos últimos conceptos y resumiendo (diagramas, para simplificar, en el plano):

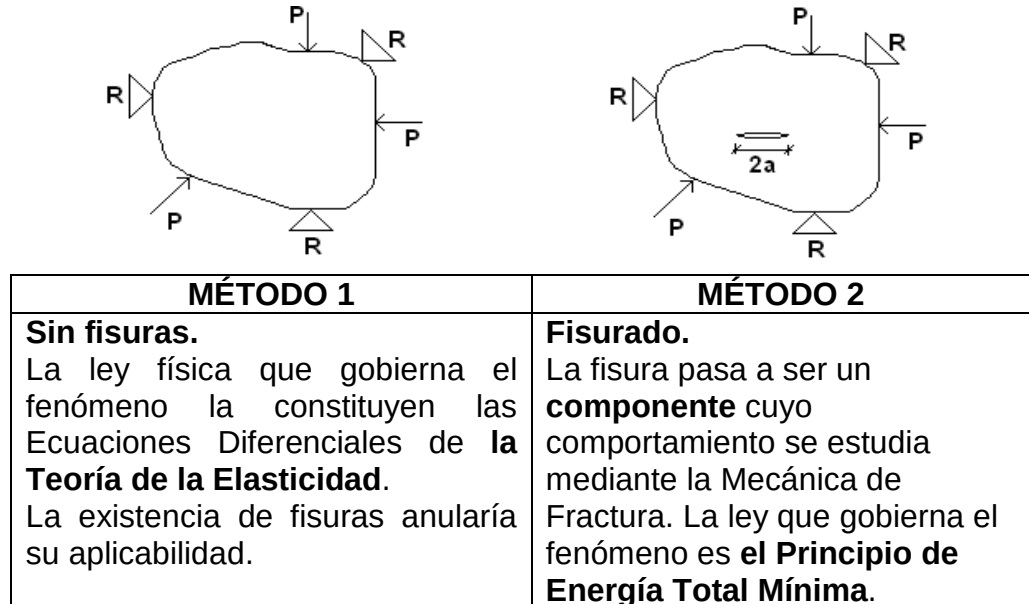


Figura 10

3. La **MECÁNICA DE FRACTURA** aplicada a materiales con distinto comportamiento $\sigma - \varepsilon$ o $P - \Delta$ y especialmente aplicada al HºAº y/o HºPº. Los comportamientos posibles los reducimos a los tres siguientes:

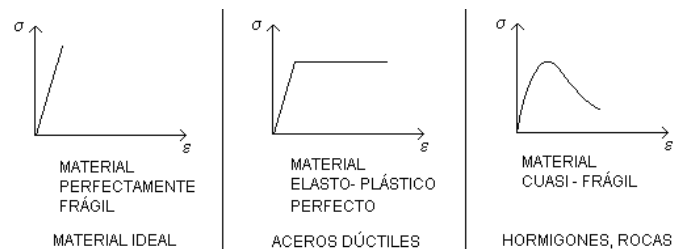


Figura 11

3.1. Criterio general.

De acuerdo a lo tratado en el punto 2, es evidente que sólo es posible encarar el problema de la evaluación de la Confiabilidad Estructural de un componente fisurado mediante Métodos Energéticos. Cálculos aplicando los métodos convencionales basados en la Teoría de la Elasticidad, Resistencia de Materiales, etc. y que tienen en cuenta materiales homogéneos, isótropos y continuos, pueden conducir a obtener resultados que, en algunos casos, pueden derivar en decisiones que incluyan:

- **Reparaciones** muy importantes (en general, de imposible o muy dificultosa realización).
- La **demolición** de la estructura.

Se ha visto, además, que lo más adecuado y correcto es:

- 3.1.1. aceptar la fisura como si fuera un componente estructural.

- 3.1.2. estudiar su comportamiento, sobre todo, su probable propagación según se ha tratado en el punto 2.2.
- 3.1.3. recurrir, para encarar lo anterior (3.1.1 y 3.1.2), a Métodos Energéticos que son los adoptados por la Mecánica de Fractura, de tal modo de determinar:

$$3.1.3.1. \quad \frac{\partial^2 \Pi}{\partial a^2} \begin{cases} > 0 \\ = 0 \\ < 0 \end{cases} \text{ aplicando, a los valores obtenidos, un}$$

coeficiente de seguridad $\gamma \geq 2$.

- 3.1.3.2. o estimar la Vida Útil Remanente (VUR), en los casos en que los componentes estructurales se encuentren sometidos a cargas repetitivas, variables en el tiempo, debido a cuya acción, se pueda desarrollar el fenómeno de FATIGA (avance de la fisura con cada ciclo) $\frac{da}{dN}$ siendo:

a: dimensión fisura.

N: cantidad de ciclos.

La FATIGA puede ser, a su vez,

- de alto ciclaje
- de bajo ciclaje

esta última, temible en las Obras de H^oA^o y/o H^oP^o.

- 3.2. Esta Metodología (3.1), sin embargo, no puede ser correctamente aplicada sin un previo y, frecuentemente, muy detallado análisis de la estructura fisurada que estamos analizando. Recurrimos a un ejemplo muy sencillo. Supongamos dos esquemas de vigas isostáticas y un esquema de viga continua, todas con la armadura incorrectamente colocada:

3.2.1. Isostática.

3.2.1.1. Simplemente apoyada.

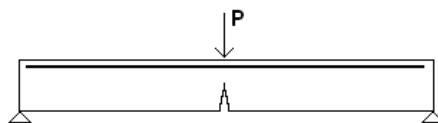


Figura 12

3.2.1.2. Voladizo (balcón).

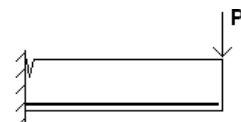


Figura 13

- 3.2.2. **Viga continua** de dos tramos y que, por alguna razón, se encuentra subarmada o, como lo consideramos en este ejemplo para simplificar, que no posee armadura superior o sólo cuenta con las de percha.



Figura 14

3.2.3. Las posibles razones del subarmado son:

3.2.3.1. armadura con cuantía correcta pero posicionada, **solamente** en la zona de compresión.

3.2.3.2. por **error de ingeniería**: cálculo⁽²⁾ o en los planos de detalle (planilla de doblado).

3.2.3.3. **Construcción deficiente**:

3.2.3.3.1. incorrecta interpretación de los planos constructivos.

3.2.3.3.2. la armadura fue “aplastada” durante el llenado (caso típico de la armadura superior de la losa de balcón).

Como comentamos mas arriba, en las Figuras 12, 13, y 14 se detallan algunas posibilidades de armadura incorrectamente calculada y/o colocada.

Es evidente, que en el caso de Figuras 12 y 13, es muy poco lo que se puede analizar. Se trata de sistemas no redundantes y el desarrollo de fisuras conduce al colapso → Recomendación: demolición o refuerzos extraordinarios.

En el caso de la Figura 14, sistema hiperestático, puede darse:

- que la **fisura se inicie y no se propague** debido a la rigidez de los tramos (rotaciones muy pequeñas).
- **que no se inicie** y, en este caso, la debemos considerar una **fisura potencial**.
- que la fisura se propague totalmente, fragmentado la viga continua y transformándola en un sistema de dos vigas simplemente apoyadas. En este caso, es posible (se debe verificar), que el sistema sea recuperable (confiabilidad aceptable) sin necesidad de realizar reparación o refuerzo alguno. Como conclusión de este punto → Previo a aplicar cualquier metodología (energética o no) es necesario analizar el problema con un **sano juicio ingenieril**.

3.3. Adoptada la Mecánica de Fractura como disciplina fundamental para el análisis del comportamiento de la fisura (complementada, por supuesto, con los métodos convencionales de cálculo, en especial, el MEF) nos proponemos, en este punto, analizar:

3.3.1. cuales son las PROPIEDADES FRACTOMECÁNICAS del material, en este caso el HORMIGÓN, de comportamiento CUASI – FRÁGIL.

Se trata de determinar las propiedades de un hormigón de calidad (por ejemplo, H – 30, con cierta granulometría, relación a/c etc.).

FISURADO: indistintamente, podemos determinar, el comportamiento de:

- un **cuerpo sólido** fisurado.
- una **fisura** dentro de un cuerpo sólido.

⁽²⁾ En el ejemplo que tratamos en el punto 4 se trata, efectivamente y aunque parezca extraño, de un error de cálculo dado que de las tres solicitaciones internas (M, N, Q) sólo se consideró N (en la dirección vertical del componente).

3.3.2. cómo se obtienen, **mediante ensayos**, las propiedades fractomecánicas.

3.3.3. Partiendo de los siguientes datos:

3.3.3.1. **Acciones exteriores.**

3.3.3.2. **Valores del campo tensional** obtenidos mediante cálculo.

3.3.3.3. **Propiedades fractomecánicas del Hormigón** (ensayos).

3.3.3.4. **Dimensiones de la fisura** y su posición dentro del cuerpo sólido (GEOMETRÍA).

SE VERIFICA, mediante Métodos de la Mecánica de Fractura, si la fisura es o no ESTABLE. Es evidente que la decisión de lo que se debe hacer con la estructura fisurada (reparar, no reparar, demoler, etc.) depende de ese resultado.

3.4. Análisis del comportamiento de una fisura. Hemos visto, en el punto 2.2 y en la consideración del balance energético, tres parámetros:

- U: Energía Interna de Deformación.
- F: Trabajo realizado ($\equiv$ energía) por las acciones exteriores
- W: energía necesaria para formar (propagar) la fisura.

La Energía Total $\Pi = U - F + W$ pasa por un mínimo (Principio de Mínima Acción) derivando:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial a} = \frac{\partial (U - F + W)}{\partial a} = 0 \quad (5)$$

o reordenando:

$$\boxed{\frac{\partial (F - U)}{\partial a} = \frac{\partial W}{\partial a}} \quad (6)$$

siendo – a – la dimensión (longitud) de la fisura.

Denominamos, a cada uno de los miembros:

$$\boxed{G_q = R} \quad (7)$$

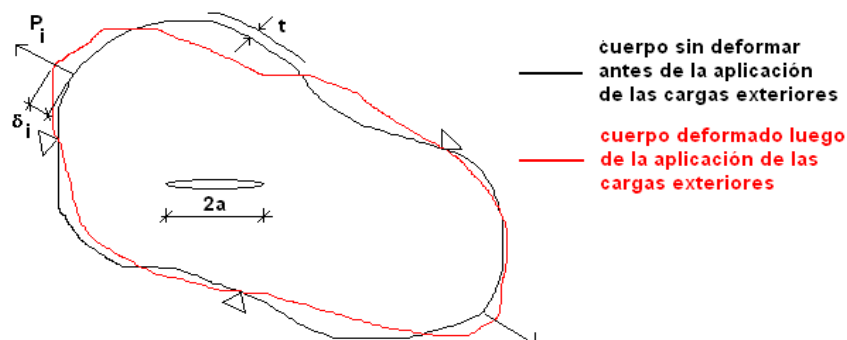


Figura 16

Estos parámetros, G_q y R , son de fundamental importancia para la Mecánica de Fractura y, frecuentemente, no son bien interpretados. No son símbolos de ENERGÍA tal como lo son U , F y W , sino, de su **variación** y, además, de la TASA de VARIACIÓN de esas energías.

G_q : Tasa⁽³⁾ de Liberación de Energía (Energy Release Rate).

La misma observación se puede aplicar a R.

Para aclarar estos conceptos, podemos adoptar la siguiente imagen gráfico – intuitiva.

El cuerpo sólido que rodea a la fisura! se puede considerar como la fuente de energía, suministrada mediante un cierto flujo o caudal, esto es:

$$G_q = \frac{\partial(F-U)}{\partial a} \quad (8)$$

necesaria para que la fisura se propague:

$$R = \frac{\partial W}{\partial a} \quad (9)$$

Si se interpreta esta imagen gráfico – intuitiva, ya no cabe duda alguna, que el protagonismo lo tiene la fisura (¿se propaga?, ¿no se propaga?) y que la estructura⁽⁴⁾ (cuerpo sólido), se transforma en un simple proveedor de energía!

El símbolo G_q corresponde a la tasa de liberación de energía para la unidad de espesor:

$$G_q = \frac{1}{t} \frac{\partial(F-U)}{\partial a} \quad (10)$$

Si tenemos en cuenta, nuevamente, la inestabilidad de la fisura (analizando la derivada segunda) y repitiendo las ecuaciones del punto 2.2

$$\frac{\partial R}{\partial a} - \frac{\partial G_q}{\partial a} < 0 \quad \frac{\partial R}{\partial a} - \frac{\partial G_q}{\partial a} = 0 \quad \frac{\partial R}{\partial a} - \frac{\partial G_q}{\partial a} > 0 \quad (11)$$

podremos conocer el comportamiento de la fisura analizada y con ello, concluir sobre la confiabilidad actual de la estructura analizada.

Como en todas las oportunidades en que se aplican los **métodos energéticos** y el **cálculo variacional**, comienza a aflorar la **belleza intrínseca** de esta metodología.

4. Ejemplo de evaluación de la Confiabilidad Estructural de una Obra, de H°A° y de H°P° con defectos mecánicos actuales y/ o potenciales.

Este ejemplo se corresponde con un caso real. El Proyecto Original (PO) contenía de una serie de errores u omisiones en el cálculo de los esfuerzos considerados por la incorrecta adopción de las condiciones de borde.

La Obra analizada es un silo de aprox. 30.000 m³ de capacidad, 36 m de diámetro y 34 m de altura.

El diseño original no contemplaba la materialización adecuada de las condiciones de borde (fuste – fundación y fuste – cubierta).

⁽³⁾ En ingles RATE lo podemos traducir como: TASA VELOCIDAD (impropiamente), RAZÓN, etc.

⁽⁴⁾ Cuya integridad es, en realidad, lo que nos interesa conocer.

Se debe tener en cuenta que en las tareas de ingeniería, correspondientes a la evaluación de defectos actuales y/o potencial, y de cuyas conclusiones se deban tomar Decisiones Empresarias, se deben extremar los recursos de análisis estructural: consideración de condiciones de bordes, métodos, de cálculo de esfuerzos característicos, verificación de dimensionamientos, etc. y llevarlos a niveles que, habitualmente, no son necesarios en una Obra convencional.

Si bien los errores y omisiones se presentan en toda la Obra, principalmente cuentan los que conducen al SUBARMADO VERTICAL del FUSTE en su borde inferior.

En este ejemplo y por razones de límites de extensión de la presentación, sólo incluiremos los resultados de una de la combinaciones de carga analizadas: Acción del material ensilado sumado al postesado del fuste, El modelo fue procesado mediante un programa de Elementos Finitos especialmente aplicable a suelos y cuyos diagramas de esfuerzos característicos son:

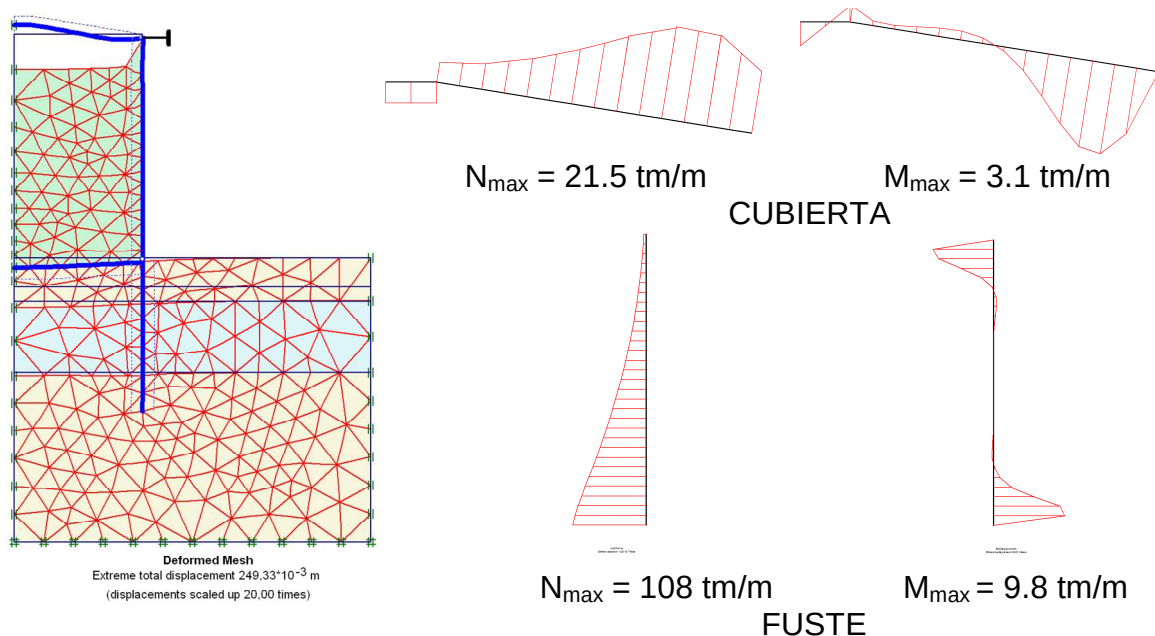


Figura 17

El momento $M_{\max}$, en el borde inferior, corresponde al caso de las acciones del material ensilado (sin sobrepresión) más el postesado del fuste (contraria). Se deben agregar, a este valor:

- un incremento de la acción del material ensilado del 50% por sobrepresión.
- el efecto de la variación de temperatura (adoptada en $\pm 30^\circ\text{C}$) igual $M_{T(+30^\circ)} = 6.7 \text{ tm/m}$

Por lo tanto, los esfuerzos resultantes son:

$$M_{\text{pst+me+T}^\circ} = 21.4 \text{ tm/m}, \quad N_{\text{pst+me+T}^\circ} = -108 \text{ t/m}$$

→ Armadura necesaria $F_e = 21 \text{ cm}^2/\text{m} > 6 \text{ cm}^2/\text{m}$ (armadura exterior existente).

→ la fisuración es INEVITABLE y caben dos observaciones:

- la verificación debe hacerse con esta combinación. Es posible que, en una cierta oportunidad de la vida servicio, se inicie una fisura mientras que hasta entonces, esa fisura, puede considerarse potencial.
- si la fisura se encuentra en el interior y en la parte inferior del fuste, es posible que nunca llegue a ser detectada visualmente por su posición, (acumulación, polvo etc.), por lo tanto, debe considerarse como existente y recurrir al END para detectarla.

Cuando se investiga un caso de **fisuración actual o potencial**⁽⁵⁾, casi siempre, se le presentan, al estructuralista, dos situaciones bien diferenciadas con respecto a la evaluación de como la fisuración comprometerá a la estructura desde el punto de vista resistente y/o funcional:

- la de los profesionales experimentados que, intuitivamente⁽⁶⁾ saben si se trata o no de un defecto aceptable de la fisura actual o potencial.
- la de los responsables de la Obra, que, en general, no son estructuralistas y a quienes se le debe demostrar, de modo ingenieril, la condición de **defecto aceptable** de la fisura actual o potencial.

A esta última situación esta orientado el presente Trabajo.

En el caso que nos ocupa: la posible (casi segura) iniciación y propagación de fisuras debido al excesivo subarmado detectado en la revisión del cálculo estructural con la Obra ya construida, la fisura (actual o potencial), puede iniciarse y propagarse parcialmente sin, prácticamente, afectar la confiabilidad de la Obra. Como en el caso de la viga continua del punto 2, no se dan las condiciones geométricas globales de la estructura como para que la fisura se propague (similar al acueducto de SEGOVIA (conjunto de piedras apoyadas una encima de la otra formando arcos)⁽⁷⁾.

Se han desarrollado muchos métodos para cuantificar el comportamiento de una fisura dentro de un campo tensional aplicado al hormigón. Se trata de una disciplina muy joven y, por lo tanto, su normalización todavía se encuentra en pleno proceso. De todos modos, para este Trabajo, hemos adoptado el del Comité Técnico 89 - FMT del RILEM. Se trata del método de JENQ y SHAH

⁽⁵⁾ Pueden darse dos posibilidades de fisura potencial:

- la que luego de comprobarse **errores** de armado en el **cálculo** de una Obra ya construida y no habilitada (nuestro caso: subarmado) nos permita suponer la iniciación de fisuras luego de solicitar externamente a la estructura.
- la que no se han manifestado, pero existiendo un campo tensional que podría iniciar fisuras por autotensiones, por ejemplo, retracción hidráulica y térmica.

⁽⁶⁾ Hemos comprobado que, frecuentemente, el conocimiento intuitivo se encuentra, actualmente, eclipsado, posiblemente por exceso de información. En estos casos siempre damos el ejemplo de los antiguos constructores romanos de puentes (ponti fex) que, carentes de conocimientos científicos, habían desarrollado, notablemente, sus capacidades intuitivas. Cabe destacar, por ejemplo, al acueducto de SEGOVIA. Los constructores “colocaban” las fisuras (separación, discontinuidad, etc.) sabiendo que el comportamiento global de la estructura mantendría el equilibrio del conjunto (piedras, separaciones). Consideraban a la “fisura” como un componente estructural más.

⁽⁷⁾ Cuando una fisura importante se forma por la concentración de microfisuras (punto B de la Figura 2), es posible interpretarlo como que la estructura se alivia fisurándose, para mantener la estabilidad. Este fenómeno, es impresionantemente similar al que se describe en psicoanálisis: ante una situación estresante insoportable, una persona se enferma para seguir viviendo.

que adopta dos parámetros fractomecánicos K_{IC}^S (Tenacidad a Fractura) y $CTOD_c$ (Crack Tip Opening Displacement).

Obsérvese, la total semejanza con el método de ensayo para obtener las propiedades fractomecánicas de un hormigón de una determinada calidad:

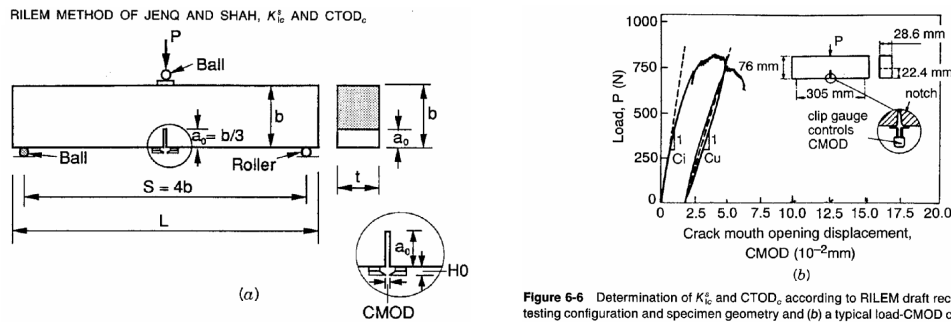


Figure 6-6 Determination of K_{IC} and $CTOD_c$ according to RILEM draft recommendation: (a) testing configuration and specimen geometry and (b) a typical load-CMOD curve measured.¹⁶

(extraído de SHAH¹)

Figura 18

La semejanza consiste en:

- como en este caso, ya existe (o existirá) una microfisura: (punto B del diagrama $P - \Delta$), se determina K_{IC}^S mediante los métodos usuales en la Mecánica de Fractura.
- luego se determina el **CTOD** midiendo, previamente, la abertura de la **boca** de la fisura **CMOD** (Crack Mouth Opening Displacement).

Se debe tener en cuenta, y esto es fundamental, que **la fuerza P , en la realidad, no se incrementa (con sí se lo hace en el ensayo)**, dado que la **configuración global de la estructura**, el fuste del silo, no se lo permite. Un posible diagrama sobre el comportamiento de la estructura sería:

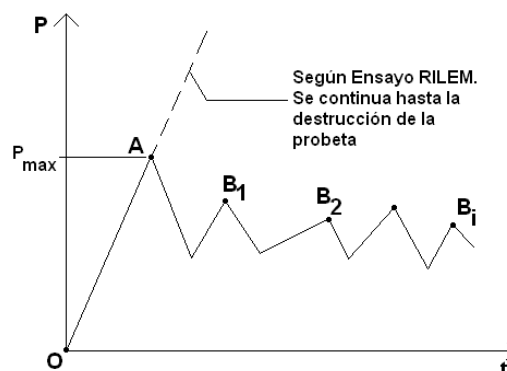


Figura 19

O: sin fisura; situación actual: **descargado**.

A: **Carga máxima** (combinación mas desfavorable de acciones externas y auto tensiones).

B_i: sucesivas cargas, siempre menores que la que produjo la macrofisura.

En este caso, debido a lo cíclico de las cargas y, ya desarrollando un cálculo casi sofisticado, se podría investigar el comportamiento de la fisura solicitada por el fenómeno del FATIGA.

Más arriba, en los puntos 2.2 y 3.4, obtuvimos dos parámetros de fundamental importancia para la Mecánica de Fractura. Estos son (los designamos de modo genérico):

G: Tasa⁽⁸⁾ de Liberación de Energía de Deformación Elástica (Elastic Strain Release Rate). La hemos asimilado a una especie de “fuente” que puede, en ciertas condiciones, propagar una fisura.

R: Tasa⁽⁹⁾ de Variación del Trabajo necesario para propagar una fisura. Es igual, por lo tanto, a la resistencia que el sólido opone al avance de una fisura y que, en el hormigón, consiste en una serie de obstáculos que debe enfrentar la punta de una fisura:

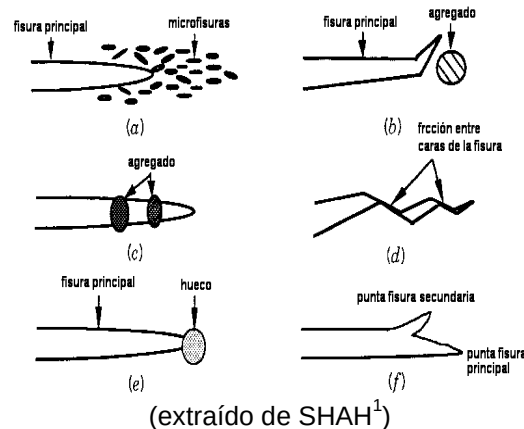


Figura 20

Obstáculos que impiden el avance:

- Microhueco.
- Agregados gruesos.
- Agregados finos.
- Fenómeno de (puenteo) entre las caras de la fisura.
- Hueco.
- Ramificación de la punta de la fisura.

Estos mecanismos “ductilizan” el material impidiendo el tipo de fractura propio de los materiales frágiles. Por esta razón, a los hormigones se los califica como CUASI – FRÁGILES.

Es necesario, a su vez, diferenciar las energías, como:

- Disponibles en el cuerpo sólido como deformación elástica (incluida la contenida en la zona del proceso de fractura, si es elástica, es decir, reversible), además, del Trabajo de las fuerzas exteriores; (una especie de resorte comprimido con una energía potencial elástica acumulada y apta para realizar un trabajo) **F** y **U**.
- Necesarias para la propagación de la fisura, **W**.

Obsérvese que no se comparan estos valores para determinar la estabilidad de las fisuras, sino la **tasa de variación de éstas con respecto al avance de la fisura**.

^{(8),(9)} Es fundamental, precisar el concepto de TASA (rate) de.... Se trata, en nuestro caso, de la variación infinitesimal de energías (o trabajos) con respecto al avance de la fisura.

Designando – a – a la dimensión de la fisura en el sentido de propagación, las TASAS son

$$G = \frac{\partial (F - U)}{\partial a} \text{ y } R = \frac{\partial W}{\partial a} \text{ como ya se indicara anteriormente.}$$

Debido a que la **Energía Potencial Total**: $\Pi = U - F + W$ debe anularse para cumplir con el **Principio de Mínima Acción** $\frac{\partial \Pi}{\partial a} = 0$, obtenemos los valores

del punto 3.4., además de conocer el punto de inestabilidad $\frac{\partial^2 \Pi}{\partial a^2} = 0$.

Si diagramamos lo analizado, obtenemos el siguiente gráfico⁽¹⁰⁾:

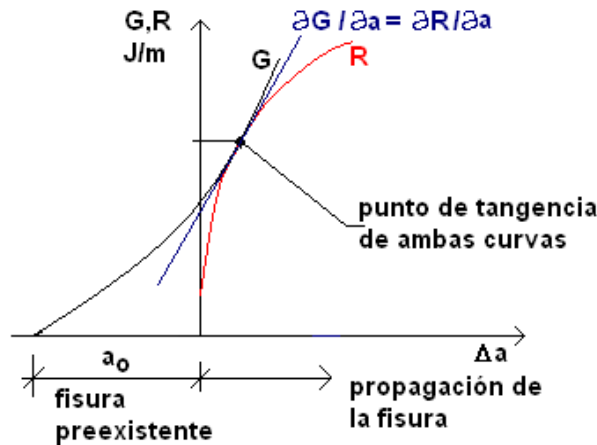


Figura 21

Adoptando el método de JENQ y SHAH realizados con probetas a flexión de tres puntos:

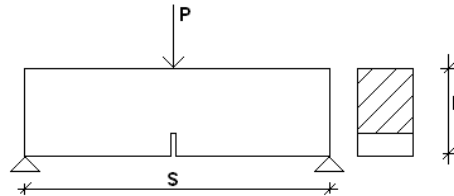


Figura 22

se han obtenido los siguientes valores para una determinada calidad de hormigón:

Table 6-7 Values of K_{Ic}^1 and $CTOD_c$ from Three-Point Bend Beams Tested by Jenq and Shah and John and Shah

Test Number ^a	Dimensions (mm)			f'_c (MPa)	w/c	d_a (mm)	E (GPa)	a_0/b	a_c/b	K_{Ic}^1 (MPa m ^{1/2})	$CTOD_c$ (mm) ^c	G_{Ic}^1 (N/m) ^b
	S	b	t									
1	305	76	29	25.2	0.65	19	33.6	0.293	0.531	1.127	0.0231	46.63
2	305	76	29	25.2	0.65	19	33.6	0.293	0.535	0.989	0.0198	35.91
3	305	76	29	25.2	0.65	19	33.6	0.293	0.548	0.891	0.0180	29.14
4	305	76	29	25.2	0.65	19	33.6	0.293	0.498	0.968	0.0196	34.40
5	609	152	57	25.2	0.65	19	33.6	0.324	0.511	1.001	0.0269	36.78
6	609	152	57	25.2	0.65	19	33.6	0.318	0.377	0.787	0.0089	22.74
7	914	229	86	25.2	0.65	19	33.6	0.333	0.385	0.940	0.0122	32.43
8	914	229	86	25.2	0.65	19	33.6	0.333	0.347	1.106	0.0076	44.91
9	305	76	29	27.2	0.65	4.8	25.4	0.293	—	0.708	0.0077	19.74
10	609	152	57	27.2	0.65	4.8	25.4	0.324	—	0.719	0.0118	20.35
11	914	229	86	27.2	0.65	4.8	25.4	0.333	—	0.693	0.0083	18.95
12	305	76	29	39.4	0.45	4.8	32.4	0.293	—	0.897	0.0084	24.77
13	609	152	57	39.4	0.45	4.8	32.4	0.324	—	0.966	0.0085	28.75
14	914	229	86	39.4	0.45	4.8	32.4	0.333	—	1.010	0.0121	31.39
15	305	76	29	27.6	0.45	Paste	20.8	0.293	—	0.601	0.0076	17.41
16	609	152	57	27.6	0.45	Paste	20.8	0.324	—	0.599	0.0062	17.27
17	914	229	86	27.6	0.45	Paste	20.8	0.333	—	0.654	0.0068	20.63
18	203	76	25	110	0.22	8	56.6	0.329	—	2.130	0.0112	80.23

Source: From refs. 17 and 21.

^a Values of K_{Ic}^1 and $CTOD_c$ for tests 9-17 are average values of several beams.

^b $G_{Ic}^1 = (K_{Ic}^1)^2/E$.

(extraído de SHAH¹)

Figura 23

⁽¹⁰⁾ Aunque existe una elevada complejidad en los posibles casos, este diagrama es sólo ilustrativo. Es, sin embargo, conceptualmente válido.

Obsérvese que el valor de G_{Jc}^s , para una cierta calidad de hormigón, por ejemplo la correspondiente a $E = 25.4 \text{ GPa}$, depende, como es de esperar, del valor de la carga. De este modo, se pueden trazar varias curvas G_{Jc}^s (propiedad fractomecánica del hormigón):

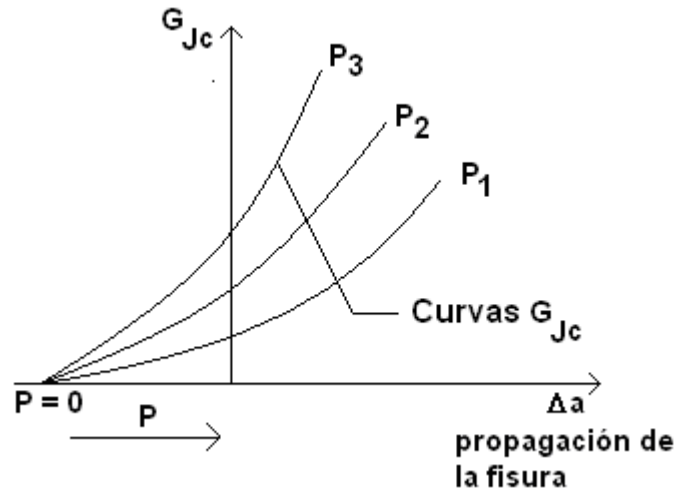


Figura 24

Pero como solo existe una curva R, que depende de la geometría del sólido y de la **dimensión de la fisura**, solo una curva G_{Jc}^s será tangente con dicha curva R.

Concluyendo: en el presente caso, la verificación de la estabilidad de la fisura, cuya existencia es ACEPTABLE (nivel de aceptación de defectos), se ha encarado, tal como se explicara más arriba, por razones formales, dado que las fisuras iniciadas en las fibras traccionadas avanzan escasamente y no comprometen la estabilidad global (no local) de la estructura; solo producen una leve disminución de la confiabilidad de la Obra. De otro modo y a pesar de ésta última consideración, calificamos al cálculo original como defectuoso por no cumplir ni con la Normativa ni con las Reglas del Arte.

5. CONCLUSIONES.

En cierta oportunidad se le pidió al eminente astrofísico Sir Arthur Eddington una definición de FÍSICA y éste contestó: "Es lo que se encuentra en un buen tratado de Física, por ejemplo, el Annalen der Physik".

Si seguimos este criterio y se nos pregunta ¿que es un cálculo estructural correcto?, podríamos responder que es aquel en el que se ajusta a las indicaciones y metodología de un buen Tratado sobre Estructuras, por ejemplo: LEONHARDT⁴ (citaremos este Texto ya que se refiere, específicamente, al caso tratado en el presente Trabajo).

Hemos tratado de demostrar y creemos haberlo logrado, que a una estructura de H^oA^o y H^oP^o **incorrectamente dimensionada** (subarmada) debido a omisiones en la obtención de esfuerzos característicos, se la puede analizar mediante la Mecánica de Fractura y demostrar, de este modo, que su **confiabilidad es aceptable**.

Prácticas que conducen, como en el presente caso, a omitir el campo tensional, consecuencia de las perturbaciones de borde, parecen burlarse de

quienes, con una sana conducta ingenieril, diseñan apoyos complejos, **articulados** (cruce de armadura) o **deslizantes** (apoyos de neopreno) para atenuar o disminuir dichas perturbaciones.

Nuestra opinión, y teniendo en cuenta que nuestro Informe Técnico y sus conclusiones se utilizarán, con seguridad, en la Toma de Decisiones Empresariales es que, ante las posibles preguntas del comitente tales como:

- ¿Es este cálculo correcto? y en el caso de respuesta negativa:
- ¿Existe riesgo (convencionalmente cuantificado) de colapso o fuera de servicio?

es que, **la primera de las preguntas se debe responder negativamente (en casos de cálculos incorrectos como el que nos ocupa) aunque a la segunda se la pueda, también, responder negativamente.**

6. BIBLIOGRAFÍA.

1. SHAN, S. R.; SWARTZ, S. E.; OUYANG, CHENGSHENG: "Fracture Mechanics of Concrete" Editorial: John Wiley & Sons (1995).
2. WEERTMAN, J.; WEERTMAN, J., R.: "Elementary Dislocation Theory". Editorial: Oxford University Press (1992).
3. HERZTBERG, R. W.: "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials". Edit. John Wiley & Sons. (1983).
4. LEONHARDT, F.: "Hormigón Pretensado" (1967).