

MECANICA DE FRACTURA EN ESTRUCTURAS NAVALES

Raúl Ortúzar Maturana *

Abstracts:

Fractura se define como la culminación del proceso de deformación plástica. Se manifiesta como la separación o fragmentación de un cuerpo sólido en dos o más partes bajo la acción de un estado de cargas. A continuación, se clasifican los tipos de fallas que involucran la iniciación y propagación de fisuras o grietas, y se realiza una breve descripción de cada una de ellas. En la tercera parte, se establecen los parámetros fracto-mecánicos del análisis de las grietas estructurales, el factor de intensidad de esfuerzos "K" y la descripción del campo de esfuerzos en la punta de la grieta. Luego, se presentan los antecedentes y causas de las catastróficas fallas de los primeros cascos soldados y los defectos de los actuales. Se presentan los diferentes modos de agrietamiento de las uniones soldadas, utilizadas comúnmente en los buques y sus diversas causas. Incluye además, antecedentes metalúrgicos de los cordones de soldadura.

Introducción.

La construcción de los primeros buques de acero soldados, después de una época de cascos remachados, trajo consigo serios problemas estructurales por la aparición de grandes grietas que colapsaban la estructura. Estas situaciones fueron atribuidas a fractura frágil, que simplemente agrietaba cubiertas y mamparos, sin una explicación clara de lo ocurrido.

Así, el incremento del porcentaje de carbono en los aceros fue el más económico e importante elemento de aleación requerido para alcanzar altas propiedades de resistencia en el acero. Sin embargo, este aumento afecta sensiblemente las propiedades de soldabilidad del acero y muy especialmente la tenacidad de éste; o sea la capacidad para resistir una mayor cantidad de esfuerzo sin deformarse plásticamente.

Para entender con mayor profundidad el significado de lo que es una fractura frágil, agrietamiento, tenacidad y otros términos asociados, se desarrollará a continuación una breve descripción de éstos.

Fractura.

Se puede definir la *fractura* como la culminación del proceso de deformación plástica. En general, se manifiesta como la separación o fragmentación de un cuerpo sólido en dos o más partes bajo la acción de un estado de cargas.

En particular, para diferenciar los tipos de fractura que existen, considerando el fenómeno en el extremo de la grieta, se pueden definir claramente dos grupos:

- Fractura *Dúctil* es aquella que progresa como consecuencia de una intensa deformación plástica asociada al extremo de la grieta.
- Fractura *Frágil* es aquella que se propaga con muy poca deformación plástica en el vértice de la grieta.

Es obvio que en la práctica es muy difícil establecer un límite preciso entre ambos tipos de fractura; sin embargo, desde el punto de vista ingenieril es importante caracterizar si la fractura se produce de manera rápida o lenta.

La fractura rápida se caracteriza por la propagación inestable de una fisura en una estructura, pero este tipo de fractura puede o no estar precedida de una propagación lenta de la fisura. Así, en los casos de fallas estructuras, éstas son iniciadas por esfuerzos aplicados inferiores a los de diseño. Esto contribuye al carácter catastrófico de tales fallas y lleva a que ellas sean consideradas, en general, como fracturas frágiles.

En cambio, la fractura lenta se caracteriza por una propagación estable de la fisura y que para su crecimiento requiere de un incremento continuo de las cargas aplicadas.

Análisis de esfuerzos en Grietas.

El estudio de fracturas en elementos estructurales ha evolucionado en las últimas décadas con el análisis de la sensibilidad de los defectos de los extremos de las grietas o fisuras. Estas actúan como concentradores de esfuerzos, ya que al aplicarse una fuerza externa a un cuerpo elástico que contiene una grieta, el material justamente adelante de la grieta es sometido a esfuerzos de tracción (σ) muy grandes. Asimismo, se presentan esfuerzos de corte (τ) sobre planos a 45° respecto al plano de la grieta. De modo que en el vértice de tal grieta, se alcanza el valor del esfuerzo admisible o el de fluencia, aunque el esfuerzo medio a que está sometido el cuerpo se mantenga en valores muy inferiores. Luego, la fractura se puede producir cuando es sobrepasado el valor del esfuerzo de fluencia en el vértice de la fisura o grieta.

Mecanismos de fallas.

Existe una amplia clasificación de tipos de fallas que involucran la iniciación y propagación de fisuras o grietas, siendo la siguiente la clasificación más general:

1. Fractura Frágil.
2. Fractura Dúctil.
3. Fatiga.
4. Creep.
5. Corrosión-Fatiga.
6. Corrosión-Esfuerzo.

Fractura de Buques Soldados.

Para satisfacer la urgente demanda de un gran número de buques necesarios para la guerra, en 1940, los Estados Unidos emprendió por primera vez en la historia, la construcción a gran escala de buques soldados. En ese entonces, la técnica de soldadura de planchas de acero había sido bien establecida, pero no se tenían suficientes conocimientos acerca del diseño y fabricación de grandes estructuras soldadas y poco se sabía de las características a la fractura.

Las fallas de los buques empezaron en el invierno de 1942-43, ver foto adjunta, cuando el buque tanque T-2 *Schenectady*, navegando en mar calma se partió en dos en Portland, Oregon. El esfuerzo registrado en la cubierta fue sólo de 9.900 psi [7 Kg/mm²]. La fractura se extendió a través de la cubierta justo delante del puente y alrededor de toda la sección transversal del buque. Otro ejemplo, es el buque tanque *Ponagansett* que en diciembre de 1947 se partió en dos en la bahía de Boston. La fractura iniciada desde un cordón de soldadura de punto entre una pequeña unión de la base de un guía espía y la plancha de cubierta. La temperatura de transición dúctil frágil (TTDF) del material era de 10°C, mientras que la temperatura al ocurrir la falla era de 2°C.¹

Durante la Segunda Guerra Mundial, en que Estados Unidos construyó más de 5000 buques, de los cuales en app. 1000 se detectaron más de 1300 fallas estructurales de variada magnitud en los tres primeros años de servicio. Serias fallas como la fractura completa de la cubierta y planchaje de la quilla ocurrieron en alrededor de 250 buques. Este número no incluye las causas como resultado de los daños de guerra o causas externas como son varadas o colisiones. Alrededor de 20 buques se partieron en dos o debieron ser abandonados por haberse encontrado una falla estructural masiva.

Los informes y textos que detallan y explican estos defectos son innumerables, concluyendo que las principales razones fueron:

- a) Diseño inadecuado de uniones, lo que produjo concentradores de esfuerzos.
- b) Fracturas producidas por el comportamiento frágil del acero a baja temperatura.
- c) Defectos en la soldadura.
- d) Geometría inadecuada de los entalles en el diseño de las soldaduras.

La investigación estadística de tales fallas, indica que en alrededor del 50%, fueron originadas por discontinuidades estructuras, incluyendo vértices en ángulo recto, extremos de quillas laterales, etc. En un 40% de la fallas comenzaron por defectos de soldadura tales como grietas superficiales del cordón, grietas bajo cordón y deficiente unión de la soldadura con el metal base.

El remanente 10% es atribuido a defectos metalúrgicos del acero, tales como zonas afectadas térmicamente por la soldadura y ranuras en los extremos de los bordes de planchas. En general todas las fallas originadas en aberturas del planchaje fueron causadas por concentraciones severas de esfuerzos.

Se suma el hecho de que los factores de seguridad convencionales estaban basados en las propiedades del esfuerzo de resistencia máxima UTS (Ultimate Tensile Strength) del acero, que corresponde al valor máximo en un ensayo de tracción y que era hasta ese momento empleado satisfactoriamente. Luego, no se consideraba los modos de fractura ni los concentradores de esfuerzos. Así un caso clásico de falla por concentradores de esfuerzo son los buques clase “Liberty” producto de un diseño inadecuado de los vértices de los cuarteles, que estaban confeccionados a 90 grados. Estos defectos fueron corregidos con un refuerzo redondeado que redujo a una cuarta parte la energía absorbida por el vértice original. En el caso de los buques clase “Victory”, el adecuado rediseño de los vértices permitió reducir la energía absorbida en 20 veces respecto a la original.

En 1948, la American Bureau of Shipping especificó, como resultado de las primeras investigaciones, requerimientos de Pruebas de Impacto para aceros de buques y procedimientos de fabricación; siendo las pruebas de impacto una medida de la capacidad de un material para resistir un impacto que se denomina Tenacidad. Al mismo tiempo se especificaron técnicas de soldadura y especificaciones para minimizar los defectos.

Características de la Fractura Frágil.

La fractura frágil se caracteriza por:

1. La grieta se propaga con muy poca deformación plástica en el vértice de ésta.
2. Dos factores siempre necesarios para que ocurra la iniciación de la fractura frágil son en bajas temperaturas y esfuerzos.
3. El inicio de la inestabilidad se inicia con esfuerzos nominales menores a los esfuerzos de fluencia.
4. Espesores mayores del planchaje producen generalmente efectos más serios que en las planchas delgadas. Lo anterior, debido a que la temperatura de transición dúctil frágil (TTDF) se incrementa en planchas soldadas y/o con procesos de conformado.
5. La fractura frágil en las cubiertas y/o casco de buques, construidos en aceros al carbono, es perpendicular al plano de la fisura o sea se propaga en la dirección transversal porque los mayores esfuerzos en el casco de un buque son longitudinales. En cambio, la fractura dúctil ocurre normalmente a un ángulo de 45 grados.
6. La falla se caracteriza en la zona fracturada por tener un aspecto brillante y granular.

Como se mencionó anteriormente el efecto de la temperatura en el desarrollo de la fractura frágil es muy importante, siendo la prueba o ensayo de impacto la medida cuantitativa de tal efecto. Este ensayo se realiza con probetas entalladas, proveyendo información de la resistencia de un material a la fractura repentina. O sea, mide la tenacidad a la fractura al cuantificar la cantidad de energía absorbida por una probeta entallada, cuando una masa W de un martillo de péndulo cae libremente, rompiendo una determinada probeta, tal como lo muestra la siguiente figura. Esta prueba es conocida como ensayo Charpy:^{2, 5}

La composición química del acero también tiene una gran influencia sobre la temperatura de transición. El contenido de Manganeso está destinado al control de los sulfuros y el molibdeno a minimizar la fragilización por temple. El Níquel se utiliza para aumentar la tenacidad del acero. Además, el efecto combinado del Níquel y el Molibdeno contribuyen a mejorar su templabilidad.

Mecánica de Fractura.

La integridad de una estructura está estrechamente ligada a la presencia de defectos que se traducen en grietas. Luego, los criterios de diseño basados en el esfuerzo máximo admisible o esfuerzo de fluencia no son suficientes para analizar estructuras fisuradas. La Mecánica de Fractura se dividirá a su vez en Lineal Elástica y Elastoplástica, de acuerdo con criterios basados en el tamaño de la zona de fluencia que presenta la punta de la grieta.

Esfuerzos en la punta de la grieta, factor K .

En un material isotrópico linealmente elástico, bajo condiciones de esfuerzo plano o deformación plana, los campos de esfuerzos y de deformaciones en la punta de la grieta presentan una singularidad del

orden de $r^{-1/2}$. Tal expresión fue desarrollada por Irwin,^{2 y 3} quien demostró que, en la vecindad de la punta de la grieta, el campo de esfuerzos elásticos puede ser expresado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\mathbf{s}_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2 \cdot \mathbf{p} \cdot r}} \cdot \mathbf{s}_{ij}(\mathbf{q}) \quad \mathbf{e}_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2 \cdot \mathbf{p} \cdot r}} \cdot \mathbf{e}_{ij}(\mathbf{q})$$

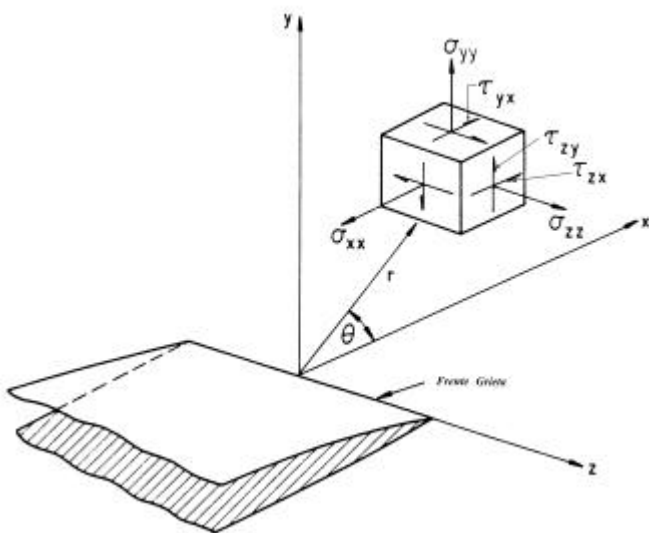
Es decir, el campo de esfuerzos en la punta de la grieta en el Modo I está dado por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{s}_x \\ \mathbf{s}_y \end{bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2 \cdot \mathbf{p} \cdot r}} \cdot \cos\left(\frac{\mathbf{q}}{2}\right) \cdot \begin{bmatrix} 1 - \sin\left(\frac{\mathbf{q}}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{3\mathbf{q}}{2}\right) \\ 1 + \sin\left(\frac{\mathbf{q}}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{3\mathbf{q}}{2}\right) \end{bmatrix}$$

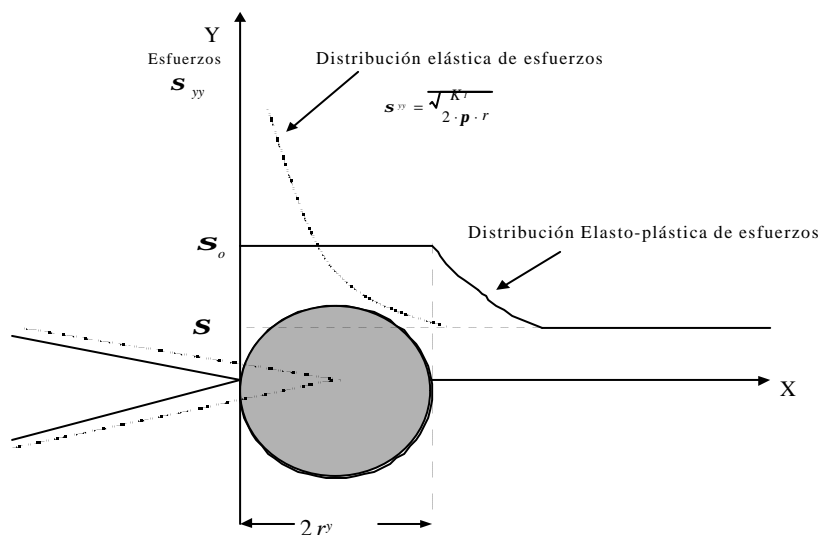
$$\mathbf{t}_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2 \cdot \mathbf{p} \cdot r}} \cdot \left(\sin \frac{\mathbf{q}}{2} \cdot \cos \frac{\mathbf{q}}{2} \cdot \cos \frac{3\mathbf{q}}{2} \right)$$

$$\mathbf{s}_z = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \mathbf{n} \cdot (\mathbf{s}_x + \mathbf{s}_y) \end{array} \right\}$$

Esfuerzo plano y Deformación plana, respectivamente.



El factor de intensidad de Esfuerzos “K” depende linealmente de la carga aplicada y es una función de la longitud de la grieta y otros parámetros geométricos característicos del cuerpo. Este factor K entrega una medida del nivel de deformación en la vecindad de la grieta en una condición de pequeña fluencia para



una amplia variedad de geometrías.

Su expresión está dada por la siguiente ecuación:

$$K = \mathbf{s} \cdot \sqrt{\mathbf{p} \cdot a} \cdot F(a/W)$$

siendo :

K = Factor de Intensidad de esfuerzos [$\text{MPa} \sqrt{m}$].

\mathbf{s} = Esfuerzo remoto aplicado al cuerpo [MPa].

a = Largo de la grieta [m].

$F(a/W)$ = Factor de forma del cuerpo.

W = Ancho del cuerpo.

Existe una amplia gama de métodos para determinar los factores K , los cuales se pueden dividir en Analíticos, Numéricos, Experimentales.

Tamaño Zona Plástica.

Irwin² determinó que si la zona plástica es pequeña con respecto a las dimensiones características del sistema (longitud de la fisura, espesor del material) la formación de tal zona puede ser considerada como una perturbación a la solución elástica, asumiendo que la zona plástica es circular.

Considerando el estado de esfuerzos a lo largo de $y = 0$ para la grieta central cargada en el Modo I, la condición de equilibrio estipula que si se despeja “ r ” para el caso de esfuerzo plano se tiene que el tamaño de la zona plástica será igual a^2 :

$$r_y = \frac{1}{2\mathbf{p}} \cdot \left(\frac{K_I}{\mathbf{s}_o} \right)^2$$

Ahora si se cumple la condición de que “ r_y ” es mucho menor que el espesor (B) y la longitud de la grieta(a), puede considerarse esta zona como una perturbación del campo elástico y su longitud puede ser tratada como hipotética de la siguiente forma:^{5, 6}

$$a^* = a + r_y$$

De este modo la expresión será igual a:

$$K_I = \mathbf{s} \cdot \sqrt{\mathbf{p} \cdot (a + r_y)} \quad \text{para cuerpo infinito}$$

$$K_I = f(a/W) \cdot \mathbf{s} \cdot \sqrt{\mathbf{p} \cdot (a + r_y)}$$

para cuerpo finito

Luego, para el estado de deformación plana el tamaño de la zona plástica es igual a:

$$r_y = \frac{1}{6\mathbf{p}} \cdot \left(\frac{K}{\mathbf{s}_o} \right)^2$$

Forma de Zona Plástica.

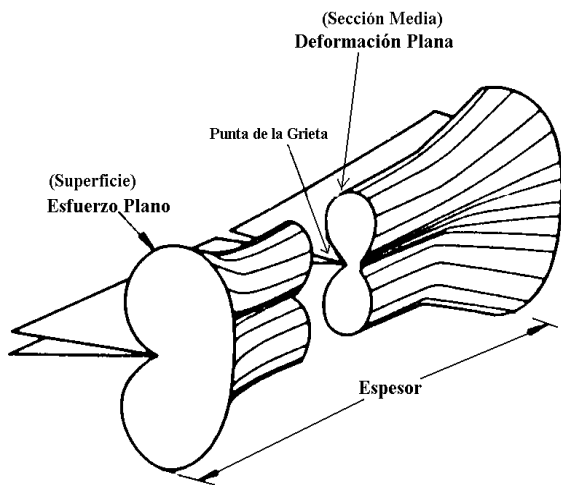
Para determinar la forma de la zona plástica, de acuerdo a la teoría de la Energía de distorsión o criterio de fluencia de Von Mises, se considera al material elástico perfectamente plástico no tomando en cuenta la redistribución de esfuerzos debido a deformación plástica. El criterio de fluencia Von Mises, definido en términos de los componentes principales, $\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \mathbf{s}_3$, es:⁵

$$(\mathbf{s}_x - \mathbf{s}_y)^2 + (\mathbf{s}_y - \mathbf{s}_z)^2 + (\mathbf{s}_z - \mathbf{s}_x)^2 = 2 \cdot \mathbf{s}_o^2$$

Substituyendo, de acuerdo al criterio de fluencia, en las ecuaciones del campo de esfuerzos, y normalizando la expresión al dividir por r_y , resulta que:²

$$\frac{r_p}{r_y}(\mathbf{q}) = \begin{cases} \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{4} \text{sen}^2 \mathbf{q} + \frac{1}{2} \cos \mathbf{q} \right) \\ \left(\frac{3}{4} \text{sen}^2 \mathbf{q} + \frac{1}{2} (1 - 2\mathbf{n})^2 \cdot (1 + \cos \mathbf{q}) \right) \end{cases}$$

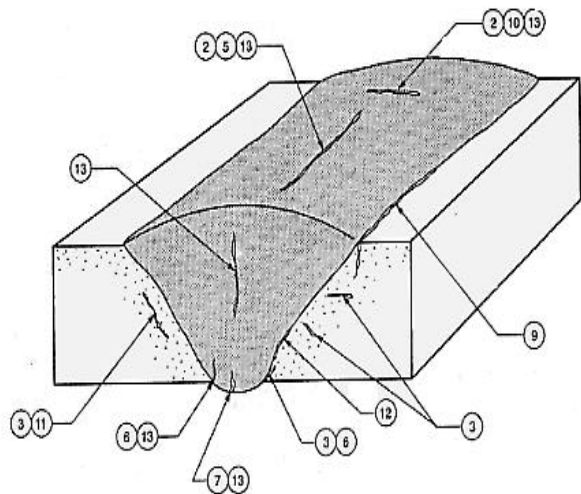
Esfuerzo plano y Deformación plana, respectivamente; siendo su expresión gráfica la siguiente:



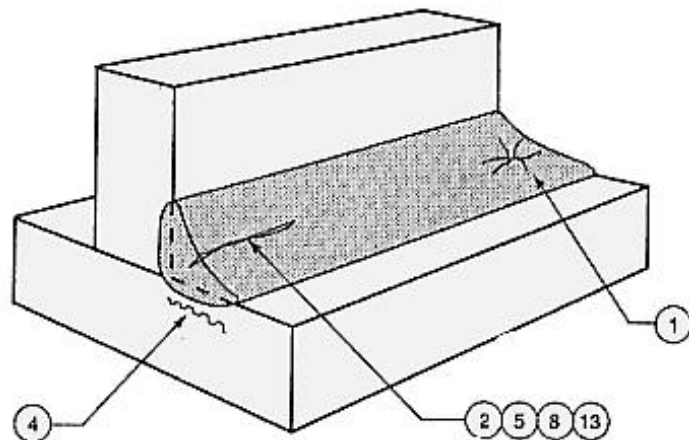
En resumen, el tamaño y forma de la zona plástica depende del estado de esfuerzos actuando en la punta de la grieta.

Defectos en Soldadura.

Uno de los principales defectos que presentan las estructuras navales son originados por defectos de las uniones soldadas que provocan fisuras o grietas, tal como lo muestran las siguientes figuras:^{4, 6}

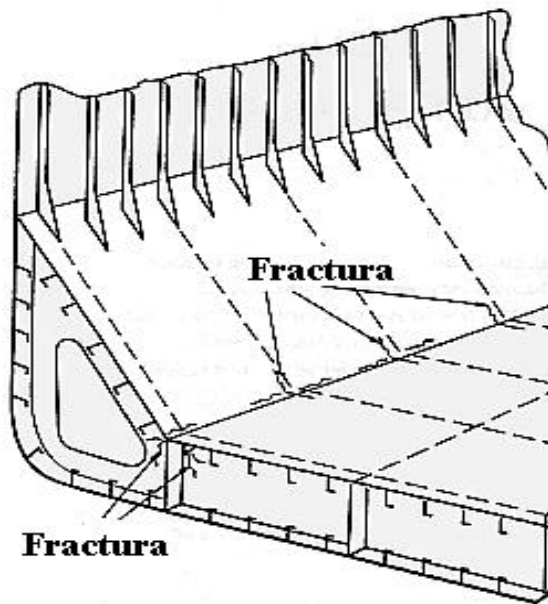


- a) Agrietamiento del Metal Base:
 Contaminación por Hidrógeno.
 Esfuerzos residuales.
 Esfuerzos excesivos.
 Alta templabilidad.
- b) Agrietamiento del Metal de Soldadura:
 Alta rigidez de la unión.
 Excesiva dilución del metal base.
 Electrodo defectuosos.
 Depósito pequeño.
 Distorsión angular.
 Grietas de cráter.
- c) Porosidad:
 Exceso H, N, y O.
 Alta velocidad de solidificación.
 Presencia de óxidos, pinturas y grasas o aceites en el metal base.
 Electrodo GMAW sucio.
 Operación, corriente y gap inadecuados.
 Exceso de humedad en unión o electrodo.
- d) Inclusiones:
 Eliminación inapropiada de la escoria.
 Atrapamiento de óxidos refractarios.
 Tungsteno en metal base.
 Diseño inadecuado de la unión.
 Inclusiones de óxidos (GMAW, GTAW).



Defectos de Diseño.

Además, en las estructuras navales se presentan agrietamientos debido a diseños inapropiados que permiten el crecimiento de grietas en una condición normal de operación, a pesar de que existen normas de las sociedades clasificadoras que regulan lo anterior. También, se presentan agrietamientos producto de mala estiba de la carga, situación que se presenta comúnmente en buques mercantes y/o de transporte naval, porque se sobrepasan los momentos máximos de flexión y fuerzas de corte de la viga-buque. Estos efectos se ilustran en la siguiente figura.⁶



Conclusiones.

A partir de los trágicos hechos marítimos y al gran incremento tecnológico en el desarrollo de nuevos materiales, es que el incremento del estudio de la *Mecánica de Fractura* que presentan los materiales sólidos, ha contribuido en forma importante a mejorar los diseños, prevenir y disminuir las fallas y a incorporar nuevas aleaciones y materiales a equipos y sistemas. Es así como esta disciplina ha permitido considerar cuantitativamente el riesgo de tener una grieta en un material, cuyas propiedades fracto-mecánicas pueden ser conocidas.

NOTAS

* Capitán de Corbeta. Ingeniero Naval Mecánico. Magíster en Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María, 1998.

Trabajo presentado en el XVI Congreso Panamericano de Ingeniería Naval, Transporte Marítimo e Ingeniería Portuaria, "COPINAVAL'99", Octubre 1999, Cartagena de Indias, Colombia.

1. Analysis of Welded Structures, K.Masubuchi, MIT, USA, 1980
2. Mechanical Behavior of Materials, N. Dowling, USA, 1992.
3. Fracture and Fatigue control in Structures, J. Barsom, S. Rolfe, USA, 1990
4. Principios de Metalurgia Física. R. Reed-Hill, Florida, USA, 1978.
5. Diseño en Ingeniería Mecánica, J. Shigley, C. Mischke, USA. 1995.
6. Guildelines for Surveys, Assessment and repair of hull structure. IACS, 1995.