

FRACTURA DE BUQUES

Raúl Ortúzar Maturana *



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, situaciones que fueron atribuibles a fractura frágil, o que simplemente agrietaban cubiertas, mamparos sin una explicación clara de lo ocurrido. Así veremos que 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, como veremos más adelante, afecta sensiblemente las propiedades de soldabilidad del acero y muy especialmente la tenacidad de éste; o sea la capacidad para resistir 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. Para posteriormente, describir los desastrosos resultados iniciales y los que aún se presentan en los buques de guerra, y finalmente analizar las características de la fractura frágil de gran ocurrencia.

Esfuerzo - Deformación.

Existe una relación muy estrecha entre

la deformación (ϵ) y el esfuerzo (σ) que soporta un determinado cuerpo, tal como muestra la figura 1. Se define una deformación elástica cuando el cuerpo es sometido a un esfuerzo dado el punto de fluencia (σ_{ys}), recuperando posteriormente su forma inicial. La deformación plástica es cuando al pasar el punto de fluencia (σ_{ys}), este cuerpo al serle aliviada su carga mantiene una deformación dada (ϵ_{pl}).

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.

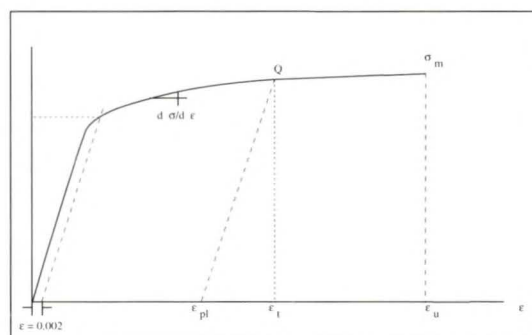


Figura 1: Esquema de la curva esfuerzo-deformación, con las principales características destacadas en ellas.

En particular, para diferenciar los tipos de fractura que existen, se puede definir claramente, si consideramos el fenómeno en el extremo de la grieta que posea el cuerpo, en dos grupos:

- Fractura *Dúctil* es aquella que progresa como consecuencia de una intensa deformación plástica asociada al extremo de la grieta.

* Teniente 1º. Ingeniero Naval Mecánico, actualmente en Curso Magister en Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María.

- 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 la mayoría de los casos de fallas de estructuras éstas fueron iniciadas por esfuerzos aplicados inferiores a los de diseño. Esto contribuyó al carácter catastrófico de tales fallas y llevó a que ellas fueran 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 sido revolucionado 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, tal como muestra la figura 2. Ya que al aplicarse un esfuerzo de tensión (S_n) exterior a un cuerpo elástico que contiene a una grieta, el material justamente adelante

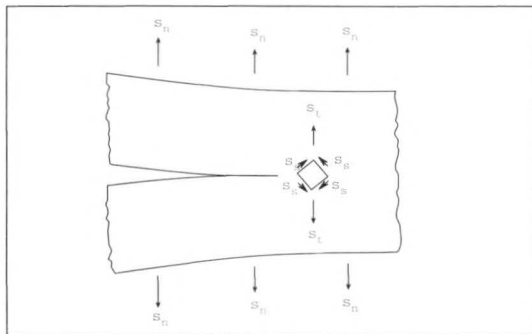


Figura 2: Análisis general de esfuerzo en una grieta.

de la grieta es sometido a esfuerzos de tensión (S_t) muy grandes. Esto, a su vez, equivale a un esfuerzo de corte (S_s) sobre planos a 45° con el plano de la grieta. De modo que el vértice de aquellas alcanza el valor de la tensión de diseño o teórica, aunque la tensión remota o media a que está sometido el cuerpo se mantenga en valores muy inferiores. Luego, de acuerdo a este concepto, la fractura se produce cuando se alcanza el valor del esfuerzo de diseño 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 más general:

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

El detalle de cada modo es interesante pero excede el tema de esta publicación.

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 de la fractura.

Las fallas de los buques empezaron en el invierno de 1942-43, ver figura 3. El buque tanque *T-2 Schenectady*, navegando en mar calmado se partió en dos en Portland, Oregon. El esfuerzo registrado en la cubierta fue sólo de 9900 psi (7 Kg/mm²). La fractura se extendió a través de la cubierta

justo delante del puente y alrededor en la mitad del buque.

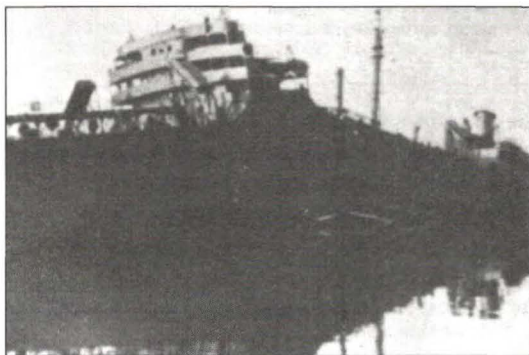


Figura 3: Buque tanque "Schenectady".

Durante el período de la Segunda Guerra Mundial en que Estados Unidos construyó más de 5000 buques, en alrededor de 1000 buques se detectaron más de 1300 fallas estructurales de variada magnitud hasta antes de abril de 1946. Se debe considerar que muchos de los buques no tenían más de tres años de servicio.

Serías 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 grandes defectos son innumerables, concluyendo que las principales razones fueron: Diseño inadecuado de uniones, lo que produjo concentradores de esfuerzos.

Fracturas producidas por el comportamiento frágil del acero a baja temperatura.

Defectos en la soldadura.

Geometría inadecuada de los entalles en el diseño de las soldaduras.

El origen de las fallas de acuerdo con la investigación estadística de fallas de buques americanos durante la Segunda Guerra Mundial, alrededor del 50% de las fallas

fueron originadas por discontinuidades estructurales, incluyendo vértices en ángulo recto, extremos de quillas laterales, etc. Alrededor del 40% de la fallas comenzaron desde 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 otras palabras todas las fallas originadas en ranuras son causadas por concentraciones severas de esfuerzos.

Además de que los factores de seguridad convencionales eran basados en las propiedades del esfuerzo máximo UTS (Ultimate tensile strength) del acero, que el 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.

Caso clásico de falla por concentradores de esfuerzo son los buques clase "Liberty" producto de un diseño inadecuado de los vértices de los cuarteles, en especial la figura 3, que estaba terminado a 90 grados. Estos defectos fueron corregidos con un refuerzo redondeado que redujo a una cuarta parte la energía absorbida por el vértice original, tal como muestra la figura adjunta. En el caso de los buques clase "Victory" el adecuado rediseño de los vértices permitió reducir la energía absorbida en 20 veces que la original.

Un número de serías fallas partieron como una de sin importancia; por ejemplo en diciembre de 1947 el buque tanque *Ponagansett* 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.

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 suele llamarse tenacidad. Al mismo tiempo se especificaron técnicas de soldadura y especificaciones para minimizar los defectos.

Como resultado de estas modificaciones en los diseños, materiales y fabricación, el número de fracturas frágiles ocurridas en estructuras soldadas o parcialmente soldadas en la posguerra disminuyó drásticamente, pero no desapareció completamente. Entre 1951 y 1953 dos buques cargueros relativamente nuevos y un buque tanque se partieron en dos.

En el invierno de 1954, un buque tanque construido en astilleros británicos en 1952 se partió en dos en el mar de Irlanda. Este buque era soldado, espaciado longitudinalmente; el cual tenía un diseño mejorado, soldadura de calidad y un acero que había sido usado anteriormente; y que además había sido certificado por una gran cantidad de expertos de la época. El buque tenía una eslora de 190 metros y que al momento del accidente desplazaba 35.000 toneladas. La fractura fue limpia en dos partes, ocurrida inmediatamente adyacente al mamparo transversal de la cuaderna maestra. Lo curioso es que ambas mitades del buque fueron salvadas, mostrando el planchaje que la falla había ocurrido de manera frágil. La fractura no era, excepto en una corta longitud (no de la posición de inicio), coincidente con la soldadura a tope del planchaje del casco; sino que seguía la línea del mamparo. La falla fue atribuida a un mal diseño de las uniones de los longitudinales con los mamparos que generó una concentración local de esfuerzos.

En enero de 1972 un buque integrado barcaza-remolcador llamado *Martha R. Ingram* se partió en dos y se hundió en la bahía de

Port Jefferson, Long Island, New York, ver figura 4. Este buque tenía 189 metros de eslora, había cruzado a través de dos huracanes y tenía solo 9 meses de servicio cuando la falla ocurrió.

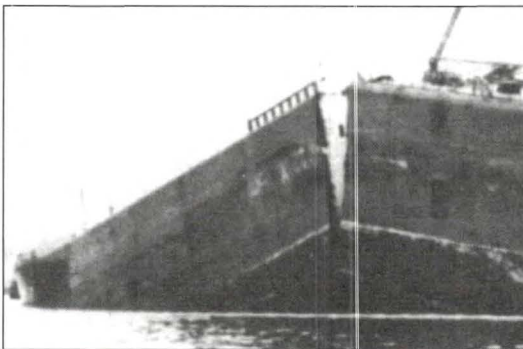


Figura 4

También se pueden citar agrietamientos presentados por diversas causas en diferentes unidades de guerra de las últimas décadas como:

- Unión de proa de la superestructura del puente con la cubierta principal de las fragatas tipo 12, como lo indica la figura 5.

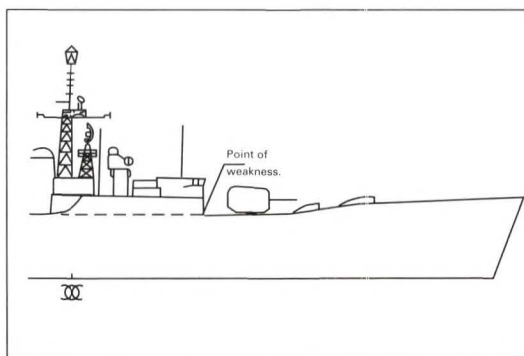


Figura 5: Agrietamiento unión superestructura fragata tipo 12.

- Unión del mamparo de la sala Ikara con la superestructura principal en las fragatas clase Leander.
- Unión entre los mamparos longitudinales y transversales en la parte baja de la superestructura en los destructores tipo 81, como muestra la figura 6.

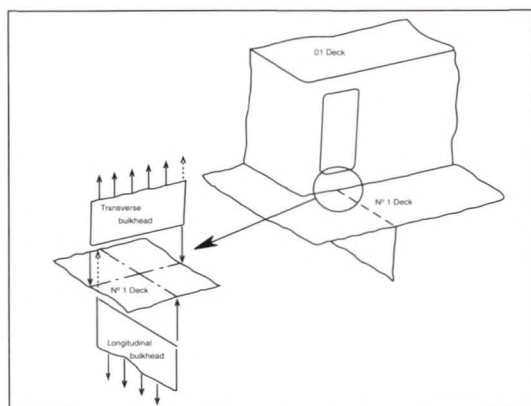


Figura 6: Agrietamiento unión superestructura destructor tipo 81.

Parte superior de los mamparos de la cubierta inferior a la principal en destructores clase County, como muestra la figura 7.

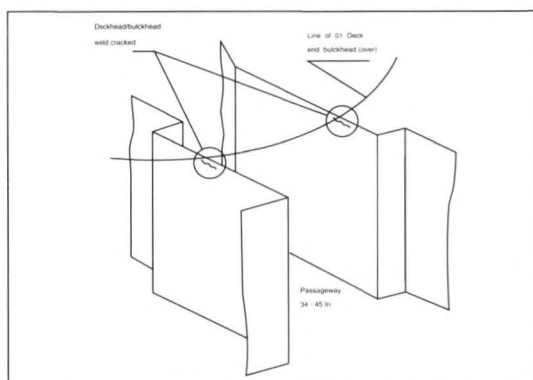


Figura 7: Agrietamiento en mamparos destructores clase County.

Falla en el extremo del mamparo de la superestructura en las fragatas clase Leander, ver figura 8.

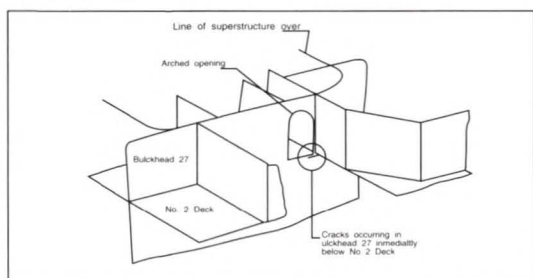


Figura 8: Agrietamiento en superestructura en fragatas Leander.

Fallas en la cubierta de la superestructura 02 de los destructores tipo 21 y 42, ver figuras 9 y 10, respectivamente.

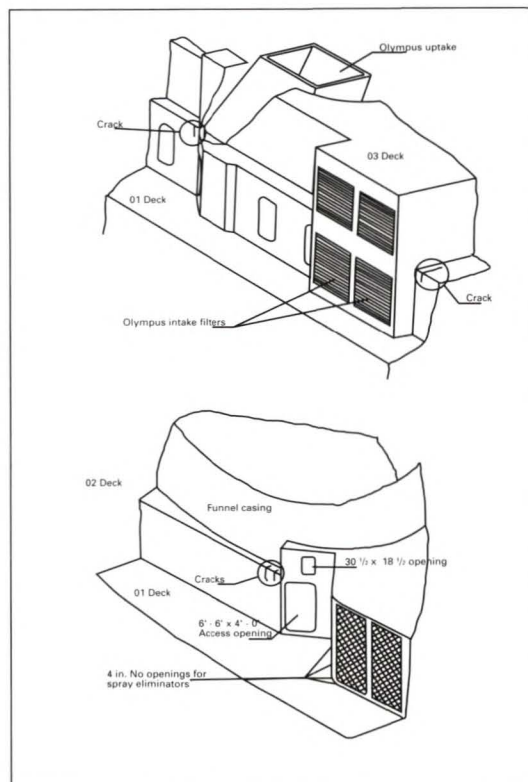


Figura 9 y 10: Agrietamiento en superestructura en destructores tipo 42.

Fallas en los vértices de las aberturas de la cubierta principal de los buques clase Whitby, ver figura 11.

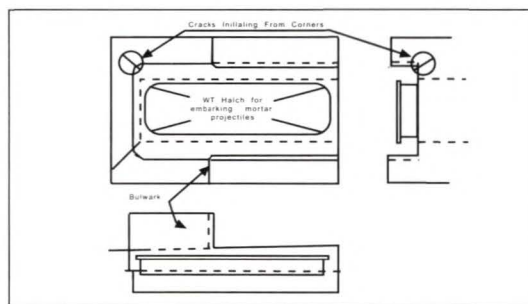


Figura 11: Agrietamiento en aberturas de cubierta en destructores clase Whitby.

Fallas en aberturas en la cubierta principal de los destructores tipo 42, ver figura 12.

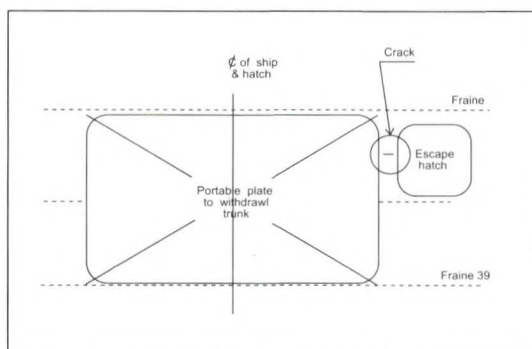


Figura 12: Agrietamiento en aberturas de cubierta en destructores tipo 42.

Fallas en costado superestructura de buques tipo Rothesay, ver figura 13.

Además, de las fallas por fractura en los buques ocurridas en cualquier condición de mar, se pueden citar otros múltiples casos de estructuras soldadas que han sufrido daños irreparables como puentes, aviones, rockets, chimeneas, estanques y recipientes de presión entre otros.

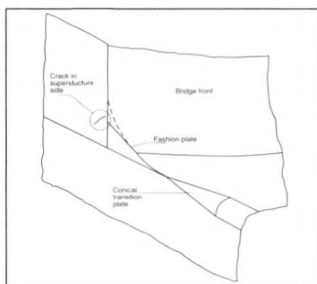


Figura 13: Agrietamiento en superestructura buque clase Rothesay.

Características de la Fractura Frágil.

La fractura frágil se caracteriza por:

- La grieta se propaga con muy poca deformación plástica en el vértice de ésta.
- Dos factores siempre necesarios para que ocurra la iniciación de la fractura frágil son bajas temperaturas y esfuerzos.
- El inicio de la inestabilidad se inicia con esfuerzos nominales menores a los de fluencia.

El efecto del mayor espesor del planchaje es generalmente peor que en las planchas

delgadas. Porque la temperatura de transición dúctil frágil TTDF se incrementa para planchas trabajadas como por ejemplo: Soldadura, Corte, Doblado o Curvado, Calentamiento.

La fractura frágil en la cubierta o planchaje de buques, 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, tal como lo indica la figura de análisis de esfuerzos en grietas. La falla se caracteriza en la zona fracturada por tener un aspecto brillante y granular con una típica forma de espina de pescado.

La velocidad de propagación de la grieta es de alrededor de 3000 [m/seg].

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 al determinar la cantidad de energía absorbida por una probeta entallada, cuando la energía de la masa W de un martillo de péndulo cae libremente, es transferida a la probeta para romperla, tal como lo muestra la figura 14. Los tipos de ensayos más conocidos son los de Charpy en entalla en V, el ensayo Izod.

Si se analiza el gráfico representativo Charpy, figura 15, que para cada material es característico, se debería utilizar un acero cuya Temperatura de Transición Dúctil Frágil, TTDF, sea lo más baja posible de manera

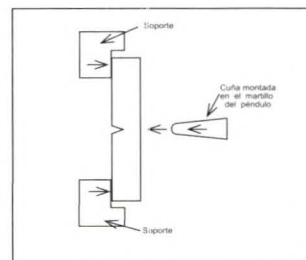


Figura 14: Método de aplicar la carga de impacto a una probeta Charpy.

de garantizar un comportamiento “no frágil” en el rango de temperatura de operación del buque.

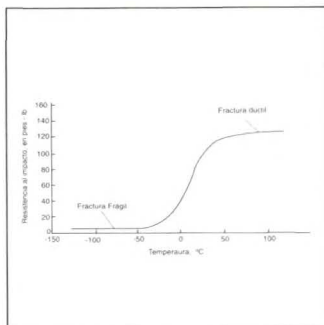


Figura 15: Curva representativa de la transición de la fractura dúctil a la frágil.

La composición química del acero tiene una influencia definida sobre la temperatura de transición. En los aceros comunes, un incremento del contenido de carbono elevará aprecia-

blemente dicha temperatura. El manganeso es el elemento de aleación que más

ayuda a bajar esa temperatura en el acero estructural. Luego, estos aceros tendrán un relativo bajo contenido de carbono con un relativo alto contenido de manganeso.

Conclusiones.

A partir de los trágicos hechos marítimos y al gran incremento tecnológico en el desarrollo de nuevos materiales, especialmente para la industria de la aviación y la aeroespacial, es que el incremento del estudio de la *Mecánica de Fractura* que presentan los materiales sólidos, ha contribuido grandemente 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 fractomecánicas deben ser conocidas.

BIBLIOGRAFIA

- Mechanical Behavior of Materials, N. Dowling, USA, 1992.
- Fracture and Fatigue control in Structures, J. Barsom, S. Rolfe, USA, 1990.
- Principios de Metalurgia Física. R. Reed-Hill, Florida, USA, 1978.
- Guía para Estructuras de Buques. A. D'Arcangelo, USA, 1979.
- Analysis of Welded Structures, K. Masubuchi, MIT, USA, 1980
- Apuntes Ship Technology Vol. 1. Royal Navy, U.K., 1995.
- Apuntes "Comportamiento Mecánico de los Materiales" UTFSM, Valparaíso, 1996.
- A New Perspective on the Influence of thickness and Post-Weld treatment for Large Scale Welded Joints. Hancock, Chubb, Spurrier. Journal of Engineering Materials and Technology, U.K. 1995.
- Diseño en Ingeniería Mecánica, J. Shigley, C. Mischke, USA. 1995

