

DE LA ALEXANDER KIELLAND A LAS TORRES GEMELAS: Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

Luis A. de Vedia

En el atardecer del 22 de Marzo de 1980, en el Mar del Norte, el tiempo se presentaba tormentoso, con una temperatura ambiente entre 4 y 6°C y con una temperatura del agua de unos 6°C. El viento era de unos 20 m/s y las olas alcanzaban de 6 a 8 m de altura. Pocos minutos después de las 18:30 Hs., la *Alexander Kielland*, una plataforma de explotación petrolera costa afuera convertida en plataforma de alojamiento, localizada en el Mar del Norte, comenzó a inclinarse y en 20 minutos se volcó completamente pereciendo 123 de sus 212 tripulantes. La causa del desastre fue luego rastreada hasta un pequeño cordón de soldadura de filete de 6 mm de cateto que unía una brida destinada al montaje de un sonar, con uno de los elementos estructurales principales de la plataforma. Irónicamente, el sonar para cuyo montaje la brida había sido instalada, hubiese sido requerido para tareas de explotación que la *Alexander Kielland* nunca realizó.

Poco más de 20 años después, alrededor de las 09:00 de la mañana, dos jet Boeing 767 cargados con 24.000 galones de combustible, impactaron de lleno con diferencia de minutos en sendas torres gemelas del *World Trade Center* de la ciudad de Nueva York. En alrededor de una hora, los edificios colapsaron llevándose con ellos la vida de 2800 de sus ocupantes.

Si bien este último episodio posee características únicas que hacen imposible hallarle un paralelo en la historia de los desastres estructurales, los acontecimientos sucintamente descritos más arriba constituyen sin duda dos casos que si bien ejemplos trágicos de catástrofes de ingeniería, están lejos de ser únicos en el lento camino que el hombre inició hace unos 5000 años con la construcción de las primeras estructuras.

Pero antes de analizar con mayor detalle, cuales fueron las razones por las cuales estructuras como las mencionadas dejan sorprendentemente de cumplir su función y se convierten en restos retorcidos, comencemos examinando algunos aspectos que tienen que ver con los modos de falla de los componentes estructurales en general.

Definimos como *elemento estructural* a cualquier elemento o componente cuya función esencial sea la transmisión de esfuerzos mecánicos o la retención de fluidos a presión. Esta definición es muy general e incluye por ejemplo desde una biela en un motor de combustión interna hasta una tubería de presión para conducción de fluidos a larga distancia.

Es necesario tener en cuenta que si bien la función primaria de un elemento estructural es la transmisión de esfuerzos o la retención de presión, existirán en general requerimientos adicionales que el elemento deberá satisfacer. Por ejemplo, el elemento puede tener que cumplir su función en un ambiente químicamente agresivo o a alta temperatura, bajo condiciones de desgaste abrasivo o bajo flujo neutrónico, etc. Estos requerimientos limitan en

general el rango de materiales que será posible emplear para cumplir la función estructural primaria.

Definiremos como *falla* de un elemento estructural a cualquier situación que impida que el elemento cumpla su función de transmisión de esfuerzos o de retención de presión como se encuentra previsto en el diseño del elemento. Es decir la falla se produce cuando el elemento se torna incapaz de resistir los esfuerzos previstos en el diseño. Esta definición es muy general e implica por lo tanto situaciones muy diversas. Por ejemplo, la presencia de defectos en una soldadura de una tubería que impide que la misma opere a la presión de diseño, constituye una condición de falla. Un álabe de una turbina falla si el álabe se rompe o se deforma excesivamente.

Es interesante e ilustrativo observar que la estadística mundial de grandes fallas en servicio que se muestra en la **Tabla 1** nos dice que mas del 60% de las mismas corresponden a sistemas de tuberías, tanques y reactores. Obviamente una de las razones de esta elevada proporción es que estos componentes son los más comúnmente empleados en las industrias de

Equipment	% of total number of losses	Average financial loss (US\$ million)
Piping systems	31	41.9
Tanks	17	40.5
Reactors	13	28.9
Process drums	7	25.5
Marine vessels	6	32.0
Pumps/compressors	5	19.2
Heat exchangers	3	24.0
Towers	3	53.8
Heaters/boilers	1	28.6
Miscellaneous	9	34.7
Unknown	5	25.0

Tabla 1 – Estadística mundial de accidentes en plantas de proceso conducentes a grandes pérdidas (Mahoney D., 1993)

proceso, pero una segunda razón la constituye el hecho de que estos elementos comparten el atributo de representar contenedores de presión. Ahora bien, una característica de todo recipiente o contenedor de presión es que el mismo se encuentra sometido a un estado esencialmente uniforme de tensiones. En otras palabras, las tensiones varían poco de un punto a otro del elemento. Esto implica que si en un punto del elemento se inicia una rotura, la misma tenderá a propagarse a lo largo del componente siendo muy baja la probabilidad de que se alcancen las condiciones para una interrupción de esta propagación. A esta circunstancia, se suma el hecho que en general los contenedores de presión son de geometría simple que permite un cálculo preciso de las tensiones actuantes, lo que reduce la incertidumbre en el dimensionamiento de las secciones resistentes. Esto permite emplear mayores tensiones de diseño que en otros elementos estructurales donde el conocimiento de las tensiones actuantes es menos preciso.

Por otra parte, mientras muchos componentes estructurales presentan elementos redundantes que hacen que la falla de uno de ellos no implique necesariamente el colapso del componente, los contenedores de presión constituyen elementos críticos sin redundancia lo que hace que una rotura se convierta con alta probabilidad en una falla catastrófica.

Llamamos *modo de falla* al fenómeno o mecanismo responsable del evento o condición de falla. En este sentido, los modos de falla que en general pueden afectar a un componente estructural, son:

- Inestabilidad elástica (pandeo local o generalizado)
- Excesiva deformación elástica
- Excesiva deformación plástica (fluencia generalizada)
- Inestabilidad plástica (estricción, pandeo plástico)
- Fatiga de alto ciclo y bajo ciclo
- Corrosión, erosión, corrosión-fatiga, corrosión bajo tensiones, etc.
- Creep y creep-fatiga
- Fractura rápida (frágil, dúctil, mixta)

Los cuatro primeros modos de falla pueden ser atribuidos fundamentalmente a falencias en el diseño del elemento estructural (excepto en el caso en que la falla se produzca como consecuencia de una carga superior a las máximas previstas en el diseño). Los cuatro modos mencionados en último término, si bien pueden ser causados por un diseño incorrecto, obedecen muchas veces a factores introducidos durante las etapas de fabricación del elemento. En particular los problemas de fatiga, corrosión y fractura rápida suelen estar estrechamente relacionados con las operaciones de soldadura que se hayan utilizado.

El modo de falla por excesiva deformación elástica se produce por ejemplo cada vez que una pieza que debe mantener sus dimensiones dentro de ciertos límites, sufre una deformación elástica que hace que aquellas excedan el valor admisible, conduciendo a problemas de interferencia tales como atascamiento o a deflexiones excesivas. En el caso de uniones soldadas por ejemplo, la recuperación elástica que sigue a la liberación de una pieza inmovilizada durante la soldadura, puede conducir a cambios dimensionales o

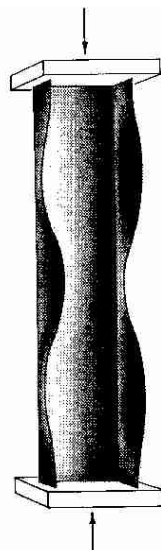


Fig. 1 – Pandeo de un perfil “U”

distorsiones inadmisibles. La forma más común del modo de falla por inestabilidad elástica es la constituida por el fenómeno de pandeo que se ilustra en la **Fig. 1**.

Este se produce cuando un elemento estructural esbelto tal como una columna es sometido a una carga de compresión suficientemente alta según su eje longitudinal. Puede demostrarse que existe una carga que depende del momento de inercia de la sección resistente, del módulo elástico del material, y de la forma de sujeción del elemento, por encima de la cual las deflexiones laterales crecen sin límite conduciendo a la destrucción del componente. El fenómeno de pandeo puede adoptar una forma global, es decir afectar a todo el componente como en el caso de una columna, o ser local afectando sólo una parte de la estructura como ocurriría en el caso de una fabricación con paneles en compresión donde sólo alguno de tales paneles sufre pandeo.

La excesiva deformación plástica constituye sin duda el modo de falla mejor comprendido, y es la base del diseño clásico de componentes estructurales. En efecto, dicho diseño tiene como objetivo fundamental establecer las dimensiones de las secciones resistentes necesarias para asegurar un comportamiento elástico de las mismas. Esto significa en teoría que en ningún punto de una sección resistente se alcance una condición de fluencia, es decir de deformación plástica. Sin embargo, en las estructuras reales, y muy particularmente en las estructuras soldadas, la presencia de concentradores de tensión mas o menos severos es inevitable y por lo tanto también lo es la existencia de zonas plastificadas en el vértice de tales concentradores. De todos modos, en la medida que el tamaño de tales zonas plásticas sea pequeño en relación con las dimensiones características de la sección resistente, puede considerarse que la sección se comportará, al menos desde un punto de vista ingenieril, de manera elástica. En cambio, si por un incremento en las cargas las zonas plásticas se propagan hasta alcanzar una fracción significativa de la sección, nos encontramos ante una falla por excesiva deformación plástica. En el caso extremo, la sección completa puede llegar a plastificarse y en tal caso hablamos de una condición de fluencia generalizada.

Bajo ciertas condiciones, un material que ha alcanzado la condición plástica puede inestabilizarse y conducir rápidamente a un colapso plástico. Un ejemplo conocido de este fenómeno es la estricción que precede a la rotura en el ensayo de tracción de un material dúctil que se ilustra en la **Fig. 2**.

La inestabilidad plástica puede ser responsable en otros casos de la propagación rápida de una fisura, dando así origen a un fenómeno de fractura dúctil rápida. Hoy se sabe que muchas fallas catastróficas que en el pasado fueron atribuidas a fracturas frágiles, tuvieron su origen como inestabilidades dúctiles. El incremento logrado en las últimas décadas en la resistencia y tenacidad de los materiales, hace que el fenómeno de falla por inestabilidad dúctil sea objeto de especial atención por parte de ingenieros e investigadores.

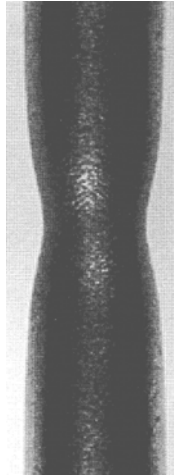


Fig. 2 – Inicio de la inestabilidad plástica de una probeta durante un ensayo de tracción

El fenómeno de fatiga es considerado responsable aproximadamente de más del 90% de las fallas por rotura de uniones soldadas y precede muchas veces a la fractura rápida. Una discontinuidad que actúa como concentrador de tensiones puede iniciar bajo cargas cíclicas una fisura por fatiga que puede propagarse lentamente hasta alcanzar un tamaño crítico a partir del cual crece de manera rápida pudiendo conducir al colapso casi instantáneo de la estructura afectada. En presencia de cargas fluctuantes, en el vértice de discontinuidades geométricas más o menos agudas se produce un fenómeno de deformación elasto-plástica cíclica a partir del cual se produce la iniciación de la fisura por fatiga. La condición superficial y la naturaleza del medio cumplen un rol importante sobre la resistencia a la fatiga, esto es sobre el número de ciclos necesarios para que aparezca la fisura. La influencia que las discontinuidades geométricas tienen sobre la resistencia a la fatiga de las uniones soldadas bajo régimen de cargas variables es un hecho ampliamente reconocido.

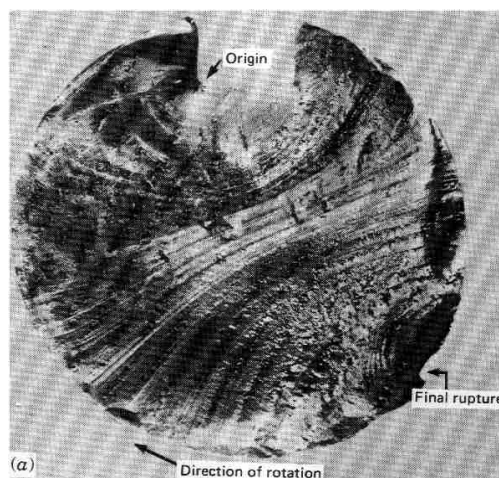


Fig. 3 – Rotura por fatiga de un eje iniciada en el alojamiento de la claveta

La **Fig. 3** muestra la superficie de fractura de un eje en el que se inició una fisura por fatiga a partir del concentrador de tensiones representado por el alojamiento de la chaveta.

Una vez iniciada la fisura, la misma continuó creciendo progresivamente por fatiga bajo los sucesivos ciclos de carga hasta que la sección resultó incapaz de soportar la carga lo que condujo a la rotura final del eje. Las sucesivas posiciones de la fisura durante su crecimiento lento pueden observarse en las marcas denominadas "líneas de playa" que son una característica macroscópica frecuente de las superficies de fractura por fatiga.

Si bien las deformaciones elásticas y plásticas que sufre un material se suelen idealizar asumiendo que las mismas se producen de manera instantánea al aplicarse la fuerza que las origina. La deformación que puede desarrollarse posteriormente en algunas situaciones y que progresa en general con el tiempo, se conoce con el nombre de *creep*.

Para los materiales metálicos y los cerámicos, la deformación por creep se torna significativa por encima del rango de temperaturas $0.3/0.6 T_f$, donde T_f es la temperatura absoluta de fusión del material. Por el contrario, para los vidrios y polímeros la temperatura a la cual los fenómenos de creep se tornan importantes se encuentra alrededor de la temperatura T_g de transición vítrea del material. De manera que mientras los metales en general no sufrirán efectos de creep a temperatura ambiente, muchos vidrios y polímeros lo harán. Cuando el fenómeno de creep se combina con el de fatiga, se tiene una situación conocida como creep-fatiga.

Algunos metales sometidos a un ensayo de tracción presentarán una estricción en la zona central de la probeta para romper finalmente con valores de reducción de área que pueden llegar en algunos casos al 100%. Este tipo de fractura se denomina dúctil y es característica de materiales del sistema cúbico de caras centradas (fcc) en estado de alta pureza. Por el contrario, muchos sólidos, particularmente metales cúbicos de cuerpo centrado (bcc) y cristales iónicos, presentan fracturas precedidas por cantidades muy pequeñas de deformación plástica, con una fisura propagándose rápidamente a lo largo de planos cristalográficos bien definidos, llamados planos de clivaje, que poseen baja energía superficial. Este tipo de fractura se denomina frágil.

Si bien la diferenciación anterior es de gran importancia conceptual y práctica, desde el punto de vista ingenieril es también importante caracterizar el proceso de fractura según la velocidad con que se desarrolla. Desde este punto de vista la fractura rápida se caracteriza por la propagación inestable de una fisura en una estructura; en otras palabras, una vez que la fisura comienza crecer el sistema de cargas de por sí produce una propagación acelerada de aquella. Las velocidades de propagación pueden ser desde unos centenares a algunos miles de metros por segundo. Este tipo de fractura rápida puede o no estar precedida por una extensión lenta de la fisura. La extensión lenta de una fisura, en cambio, es una propagación estable y que requiere para su mantenimiento un incremento continuo de las cargas aplicadas.

La fractura rápida constituye el modo de falla más catastrófico y letal de todos los mencionados. La misma se produce en general bajo cargas normales de servicio, muchas veces inferiores a las de diseño. Por tal motivo, la fractura rápida no es precedida por deformaciones macroscópicas que permitan tomar medidas para evitarla o para reducir la gravedad de sus consecuencias. Una vez iniciada, pocas veces se detiene antes de producir la rotura completa de componente.

Las características que adopta en general la falla por fractura rápida, y que explican en parte el alto costo en vidas y bienes frecuentemente asociados con este tipo de evento, son las siguientes: en primer lugar, la falla se produce de manera totalmente sorpresiva y progresa a muy alta velocidad, típicamente entre algunos centenares y algunos miles de metros por segundo. Como se ha mencionado, la falla suele ocurrir cuando el componente está sometido a tensiones compatibles con las de diseño, y muchas veces inferiores a la máxima prevista. Finalmente, el origen de la falla se debe muchas veces a factores ajenos al diseño que son introducidos durante fabricación, muy particularmente a través de las operaciones de soldadura, no siendo detectados como factores potenciales de riesgo por los responsables de la construcción e inspección del componente.

El fenómeno de fractura rápida se hizo particularmente dramático en las roturas de los barcos tipo "Liberty", "Victory" y tankers "T-2" de la marina de los EE.UU. acaecidas durante los años 1939-1945, poniendo así de relieve la insuficiencia de los criterios clásicos de diseño usados para estructuras abulonadas o remachadas, cuando se pretendía extenderlos inalterados al cálculo de estructuras soldadas. Estos criterios, basados esencialmente en los valores de resistencia a la tracción y de reducción de área, condujeron posteriormente a fallas similares en recipientes de presión y otros elementos estructurales que fueron motivo de perjuicio técnico-económico de magnitudes tales como para colocar el estudio de la fractura entre los temas de investigación importantes de la actualidad.

No obstante que la fractura rápida es un fenómeno reconocido desde hace muchos años, existe considerable confusión respecto de la manera de diferenciar entre una fractura rápida dúctil de una fractura frágil. Esto obedece fundamentalmente a que en general se tiende a considerar el proceso global de deformación plástica que conduce al proceso de fractura. Ahora bien, un metal puede fallar por clivaje, que es un proceso de fractura frágil, luego de una deformación macroscópica importante; del mismo modo, es posible tener una deformación plástica global despreciable en un metal que falla de manera dúctil. La confusión se reduce si en lugar de considerar el proceso global de deformación que precede a la fractura, se tiene en cuenta la deformación localizada en el material que rodea el vértice de la fisura durante la propagación de la misma. De este modo, una fractura frágil es aquella en la cual la fisura se propaga con muy poca deformación plástica en su vértice, mientras que una fractura dúctil es aquella que progresa como consecuencia de una intensa deformación plástica asociada al extremo de la fisura. Es obvio que en la práctica no es posible establecer un límite preciso entre ambos tipos

de fractura, pero en general es posible diferenciar fácilmente entre uno y otro extremo.

La piedra angular sobre la que descansa la Mecánica de Fractura es el llamado Principio de Griffith. Este dice que para que una fisura se propague en un material, es necesario que la liberación de energía elástica que se produce a medida que la fisura avanza, no sea inferior a la suma de la energía que se requiere para formar las nuevas superficies de fractura que se generan con el avance de la fisura más la energía necesaria para hacer avanzar la zona plástica que acompaña al vértice de la fisura durante la propagación. Si consideramos por simplicidad una chapa de espesor unitario y llamamos trabajo de fractura G a esta suma de energías por unidad de longitud de propagación, es fácil ver que para una propagación de longitud L , el trabajo de fractura total será GL . Por otra parte la energía elástica que se libera durante esa propagación es en cambio proporcional a L^2 . De modo que si representamos en un gráfico como varía el trabajo de fractura y la liberación de energía elástica a medida que la fisura se propaga, la diferencia entre ambas adopta la forma de la curva que se observa en la **Fig. 4**.

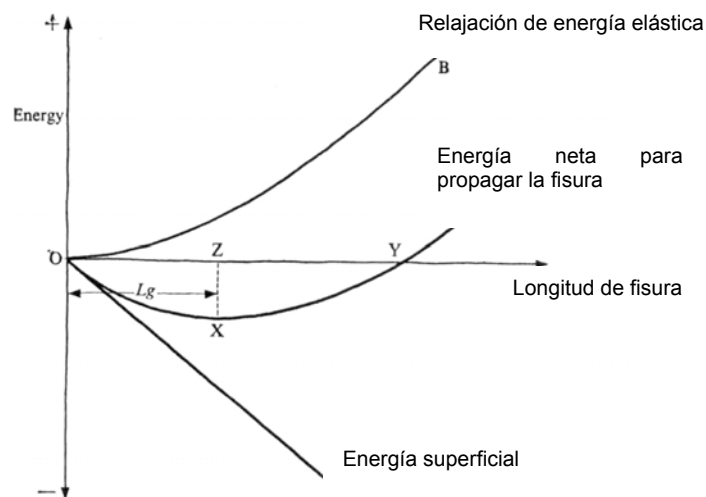


Fig. 4 – Balance de energías en el proceso de fractura

Vemos entonces que mientras la longitud de fisura se mantenga por debajo de un valor crítico a_c (Lg en la Figura), la fisura no podrá propagarse debido a que el requerimiento de energía aumenta a medida que la fisura se hace más larga. Si en cambio, la longitud de la fisura fuese a_c o mayor la misma se propagará ya que un aumento en su longitud se traduce en una disminución de energía, por lo que el proceso se producirá espontáneamente. Es posible demostrar, con un poco de matemática bastante elemental que:

$$a_c = \frac{GE}{\sigma^2 \pi}$$

donde E es el módulo elástico del material y σ la tensión aplicada a la pieza que contiene la fisura.

La expresión anterior es muy importante porque una vez determinado experimentalmente el trabajo de fractura G de un material, nos permite predecir cuál será el tamaño de fisura máximo que podemos tolerar sin riesgo en una estructura construida con dicho material.

Pero volvamos ahora a considerar el accidente acaecido a la plataforma Alexander Kielland en Marzo de 1980. Ya hemos mencionado que la causa del desastre fue rastreado hasta un pequeño filete de soldadura que unía un elemento estructural principal a una conexión de una brida para el montaje de un sonar. La **Fig. 5** muestra esquemáticamente la posición de la brida sobre el elemento estructural principal y el detalle de la conexión con la brida.

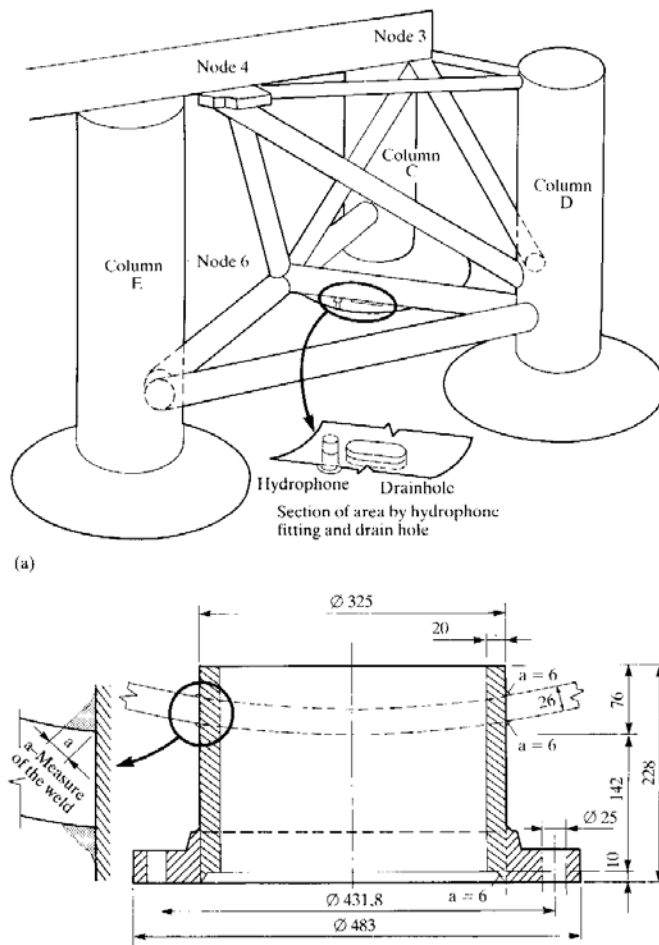


Fig. 5 – Ubicación de la brida en el miembro estructural principal y dimensiones

La fotografía de la **Fig. 6**, tomada como parte de la investigación posterior al accidente, muestra un corte de la soldadura de filete que unía el miembro principal (vertical) con la conexión de la brida (horizontal). Puede verse claramente la presencia de una fisura asociada al talón de la soldadura.

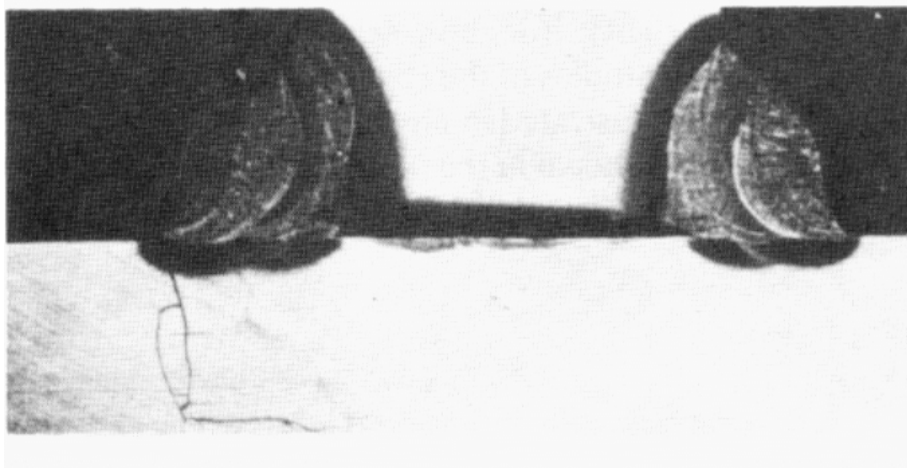


Fig. 6 – Corte de soldaduras de filete donde pueden observarse la presencia de fisuras

Esta u otra fisura análoga comenzó su lenta propagación por fatiga bajo el continuo embate del oleaje hasta que alcanzó su valor crítico a_c a partir del cual la fisura se inestabilizó e inició su propagación a alta velocidad a través de la estructura. Esto resultó en el repentino y total seccionamiento del elemento estructural principal como lo ilustra la siguiente fotografía, lo que condujo al rápido vuelco de la plataforma.

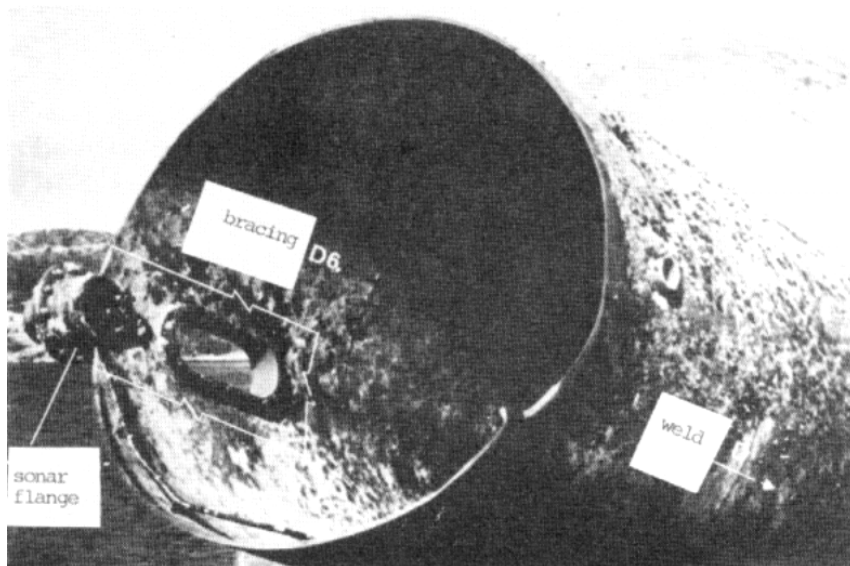


Fig. 7 - Seccionamiento completo del elemento estructural principal como consecuencia de la fractura rápida que siguió a la propagación por fatiga.

El fatal error cometido por los constructores de la plataforma fue entender que la soldadura que uniría el elemento estructural principal a la conexión de soporte de la brida no estaba destinado a cumplir una función estructural sino meramente de soporte del sonar. Si bien esto era esencialmente correcto, lo que se ignoró fue el hecho que una fisura puede crecer bajo cargas variables con tensiones relativamente bajas y una vez alcanzada la longitud crítica de Griffith, propagarse a alta velocidad a través de la estructura.

En virtud de esta omisión, el astillero responsable de la construcción delegó la ejecución de la soldadura de la brida a un equipo de soldadores no calificados y obviamente relajó los requerimientos de inspección que había impuesto para las soldaduras consideradas estructurales. De no haberlo hecho, sin duda un equipo idóneo hubiera evitado que los defectos de las soldaduras, de producirse, pasasen desapercibidos. Se pagó un altísimo precio por este error de apreciación: 123 vidas humanas y millones de libras esterlinas en pérdidas materiales.

Cuando el gigantesco *World Trade Center* de la ciudad de New York se derrumbó el 11 de setiembre de 2001 luego de un ataque suicida, la humanidad asistió a uno de los eventos más impactante y terribles de todos los tiempos. Aunque las torres gemelas que integraban el *World Trade Center* no eran mucho más altas que su predecesor el *Empire State Building*, aquellas habían sido erigidas durante los últimos años de la década del '60 que caracterizó a una nueva era en la construcción de edificios basados en el uso de estructuras metálicas livianas en lugar de las tradicionales mamposterías de hormigón. Como en todos los grandes edificios, el criterio estructural básico para las dos torres de aproximadamente 380 m de alto se centraba en dos aspectos: resistencia a las gigantescas cargas gravitatorias propias y a las cargas provocadas por los vientos y terremotos que pudieran causar enormes momentos de vuelco en sus bases. El primer aspecto, es decir la resistencia al colapso por su propio peso, depende del diseño de un sistema de columnas para transmitir eficientemente la carga al piso. El segundo aspecto en cambio requiere adicionalmente a consideraciones de resistencia estructural, tener en cuenta aspectos que se relacionan con el confort de los habitantes del edificio, tales como la limitación de los movimientos laterales lo que a su vez depende de la rigidez y del amortiguamiento elástico de la estructura. Las bases de los edificios alcanzaban unos 35 m debajo de la superficie, y con una gran superficie exterior expuesta al viento, se estima que un solo lado del edificio debía soportar esfuerzos de hasta unas 5.000 toneladas de presión aerodinámica mientras que la carga por peso en las bases era de unas 500.000 toneladas. Para manejar estas cargas tremendas se recurrió al uso de columnas cajón de acero cercanas unas a otras y conectadas mediante elementos de arriostramiento del mismo material, configurando una suerte de tubo exterior alrededor del edificio y con otro tubo interior en el centro del mismo. Este tubo central de sección rectangular de unos 30 m de lado, constituía el núcleo de la estructura, soportaba la mayor parte del peso del edificio y contenía los ascensores, las escaleras y áreas de servicios. El tubo o retículo de columnas perimetral tenía en cambio la misión de proveer

resistencia contra las cargas laterales del viento y eventuales efectos sísmicos. El esquema de la **Fig. 8** muestra como se encontraban dispuestas las columnas en un perímetro exterior y en un núcleo interior. Los pisos actuaban como cuadernas o diafragmas de refuerzo de 10 cm de espesor de hormigón y se complementaban con un reticulado de vigas horizontales de acero y elementos viscoelásticos para proveer el necesario amortiguamiento del conjunto.

Todo esto hacía de las torres gemelas probablemente unos de los edificios más resistentes del mundo. De hecho, los impactos de los aviones y las explosiones que siguieron fueron calculadas como equivalentes a la explosión que destruyó hace algunos años el edificio federal Alfred P. Murrah en la ciudad de Oklahoma (unas 400 toneladas de TNT), y no obstante ello las torres se mantuvieron en pie. Se había argumentado que las torres gemelas eran capaces de soportar el impacto de un Boeing 707. Los sucesos del 11 de setiembre demostraron que esto era cierto. Pero los edificios no fueron diseñados para soportar ni las masivas explosiones ni el intenso calor del fuego producido por el combustible de los jets que los impactaron, lo que constituyó, según el Ing. Eduardo Kausel, profesor de ingeniería civil del MIT, una fatal omisión en las consideraciones de diseño. La torre norte colapsó 105 minutos después del impacto, mientras que la torre sur lo hizo en sólo 47 minutos. A unos 400°C el acero comienza a perder resistencia mecánica, y a unos 800 °C la ha perdido casi totalmente lo que condujo al pandeo de las columnas y al colapso plástico masivo de los elementos estructurales metálicos de los que dependía la integridad de los edificios.

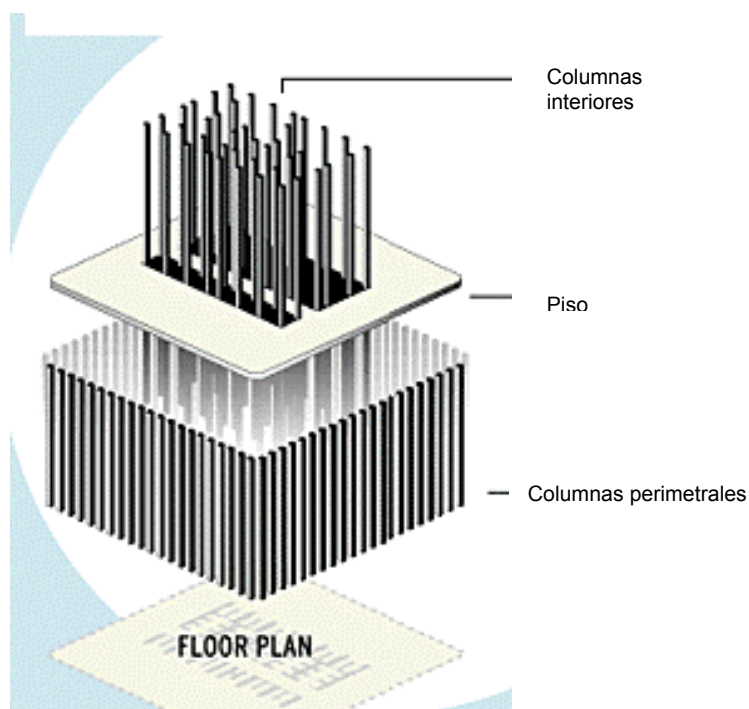


Fig. 8 – Esquema de la distribución de las columnas en las torres del World Trade Center

Es hasta cierto punto paradójico que el edificio que actualmente ostenta el record de altura en el mundo, las torres Petronas en Kuala Lumpur, de 452 m, diseñadas por el arquitecto argentino Cesar Pelli, estén construidas en hormigón y no en acero por lo que se especula que podrían haber resistido mejor el impacto con un jet comercial perdurando unas dos horas más que las torres gemelas permitiendo la evacuación de una mayor cantidad de gente. Sin embargo, la razón de la elección del hormigón en reemplazo del acero tiene en este caso probablemente más que ver con el costo de este material en Asia que con razones de integridad estructural.

Las dos catástrofes analizadas dejan enseñanzas importantes: la primera de ellas es que no es posible construir una estructura totalmente a prueba de fallas. La segunda es que errores de juicio u omisiones en el diseño pueden tener fatales consecuencias. Lamentablemente, los ejemplos analizados no son únicos en la historia de la ingeniería estructural, pero es un tributo a la inteligencia y habilidad de los diseñadores que tales sucesos sean poco frecuentes. Hemos revisado rápidamente los mecanismos de falla más comunes que pueden afectar a una estructura y hemos visto algunos de estos mecanismos en acción a través de los casos a que hemos hecho referencia. La necesidad de aumentar la confiabilidad estructural de un elemento del que dependen vidas y bienes ha sido desde siempre un tema prioritario para los ingenieros. Vemos que el problema es complejo y presenta múltiples aspectos constituyendo uno de los capítulos más apasionantes de los intentos del hombre por controlar a la naturaleza.

Referencias

1. J.Lancaster "Engineering catastrophes: causes and effects of major accidents" Abington Publishing, Cambridge, England, 1996.
2. D.Mahoney "Large property damage losses in the Hydrocarbon –Chemical Industries" Marsh and McLennan, Chicago, 15th Ed. 1993.
3. J.E.Gordon "Structures or why things don't fall down" Da Capo, London, 1978.
4. K.Easterling "Introduction to the physical metallurgy of welding" Butterworths, England, 1983.
5. S.Ashley "When the twin towers fell" Scientific American.com, Octubre 9, 2001.