



CATASTROFES DE INGENIERIA EN EL CAMINO HACIA LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL

Luis A. de Vedia

Instituto de Tecnología Prof. Jorge A. Sábato (UNSAM-CNEA)

Facultad de Ingeniería (UBA)

Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires

Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

e-mail: luisdevedia@gmail.com

"Los sistemas ingenieriles en gran escala son algo más que un conjunto de dispositivos tecnológicos; son en última instancia un reflejo de las sociedades que les dan origen, de las prácticas de gestión y de los procedimientos burocráticos que estas sociedades emplean"

A. Bernstein & M. Kushment

IEEE Spectrum, Abril 1987, p.8.

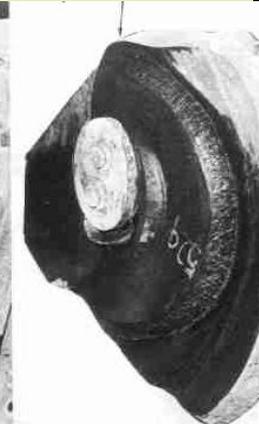
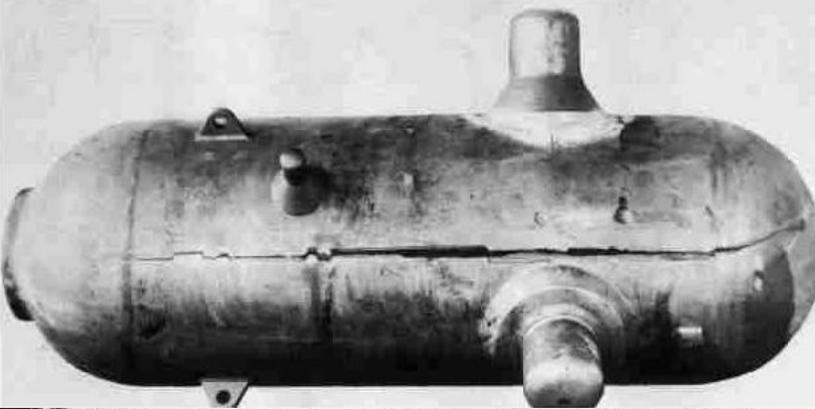
“Si se observa con suficiente cuidado, todo posee una pequeña fisura.....”

Ted Crawford (personaje de ficción interpretado por Anthony Hopkins en el film policial “Fracture”)



Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

La frase anterior expresa de manera clara y simple una de las premisas básicas de toda estrategia moderna de prevención de fallas por fractura rápida, que constituye una de las formas más letales y catastróficas de rotura que puede producirse en una estructura.



Componente estructural: cualquier elemento cuya función primordial sea la transmisión de esfuerzos mecánicos o la retención de presión.

Condición de falla: cualquier circunstancia que impida que el componente estructural continúe cumpliendo su función en las condiciones previstas por el diseño o que conduzca a una reducción de su vida útil prevista en ese diseño

Un componente estructural puede fallar en servicio por la presencia de defectos o errores en el diseño. Los modos que puede tomar esta falla son diversos.

Los mas importantes son:

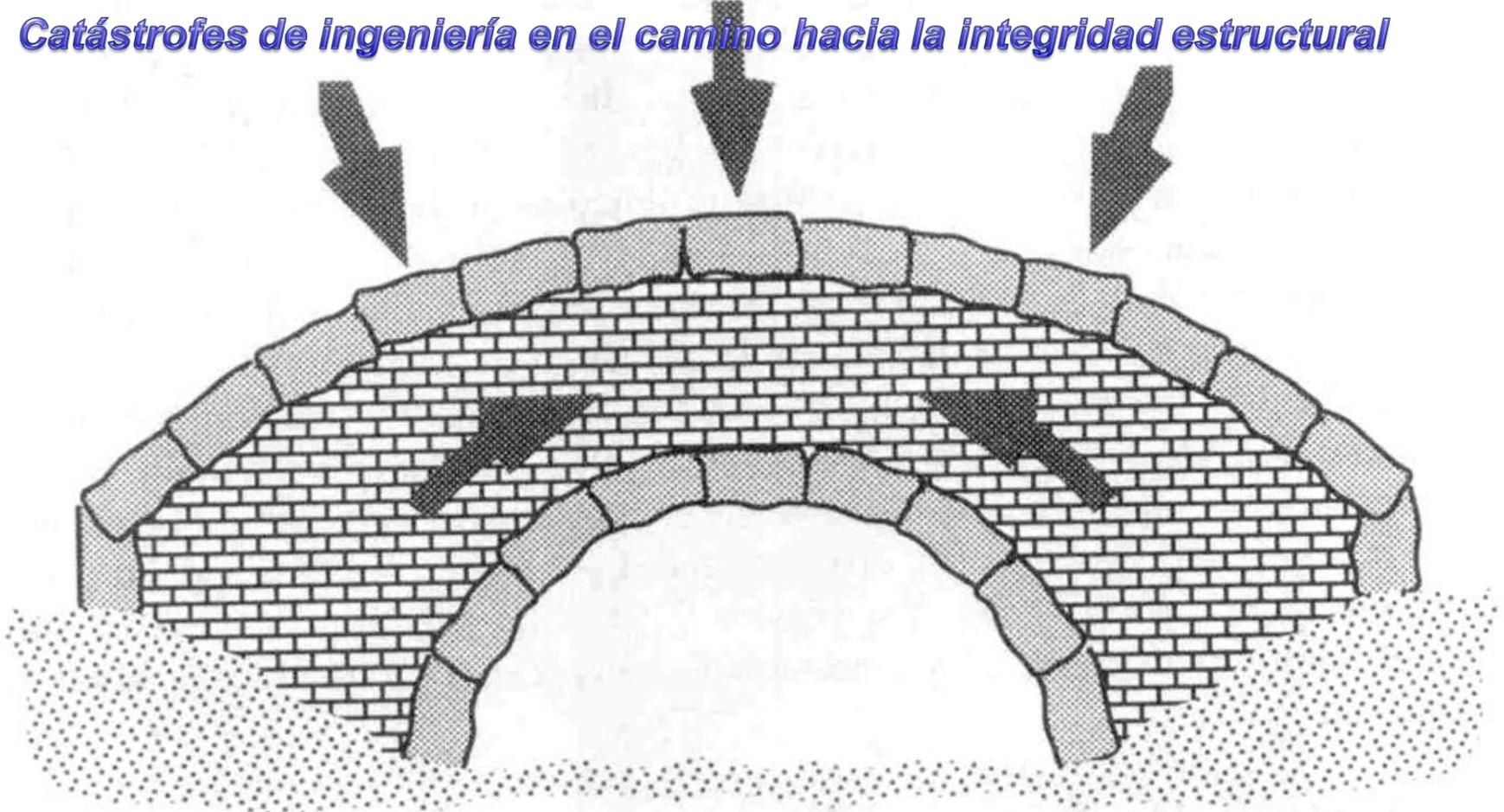
- ***Inestabilidad elástica (pandeo local o generalizado)***
- ***Excesiva deformación elástica (atascamiento)***
- ***Excesiva deformación plástica (fluencia generalizada)***
- ***Inestabilidad plástica (estricción, pandeo plástico)***
- ***Fatiga de alto ciclo y bajo ciclo***
- ***Corrosión, erosión,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

Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

La experiencia diaria nos sugiere que los materiales presentan dos comportamientos bien diferenciados de rotura: la fractura frágil, como ocurre en un vidrio o en un cerámico y la de los metales en general, en los que la rotura es la culminación de un proceso de deformación plástica (fractura dúctil)



Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural



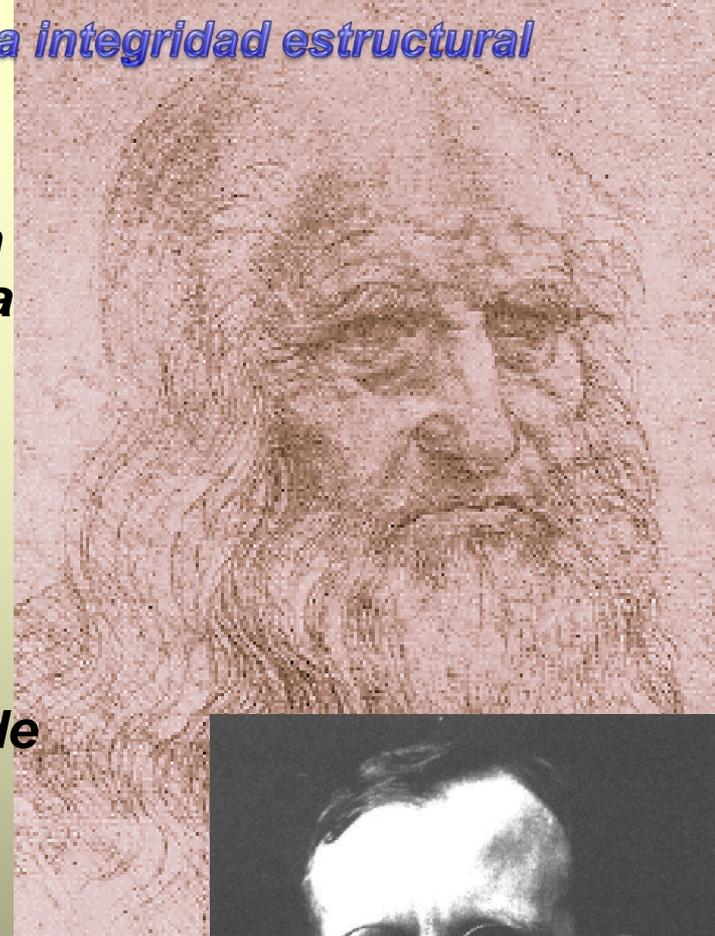
La necesidad de recurrir a diseños aptos para evitar la fractura no es un concepto nuevo. Un recurso utilizado hasta fines del siglo XVIII y XIX fue la utilización de elementos estructurales trabajando en compresión como lo ilustra este diseño de un puente romano. Esta necesidad surgía debido al comportamiento relativamente frágil de los materiales estructurales utilizados hasta la introducción de la producción en masa del acero en la Revolución Industrial.

Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

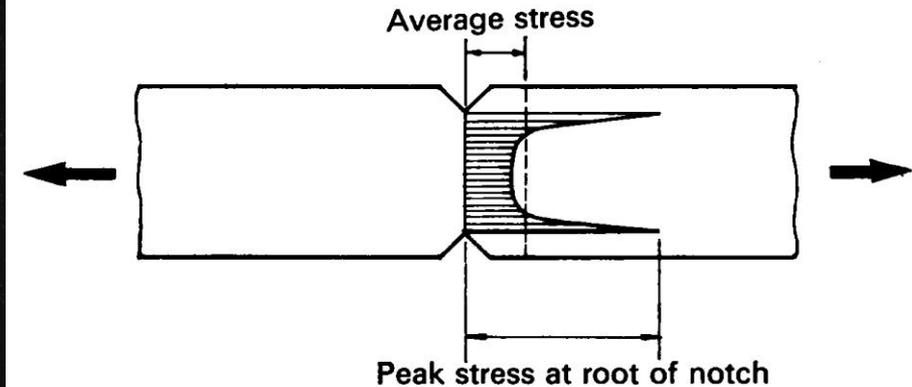
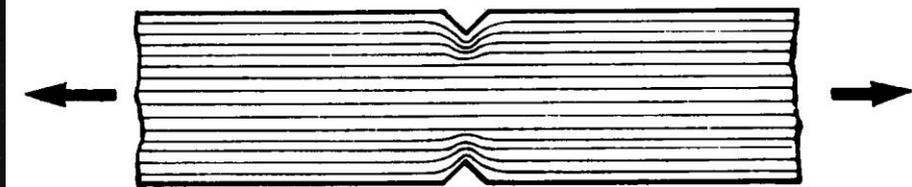
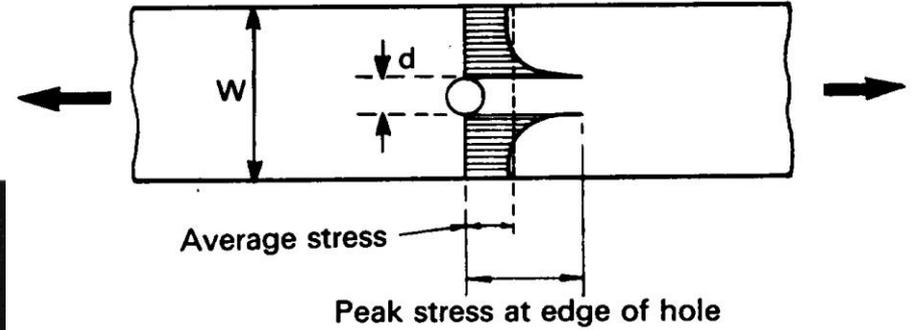
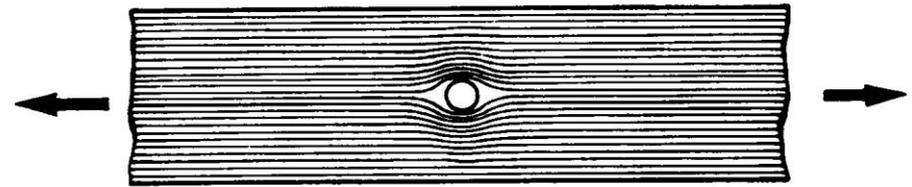
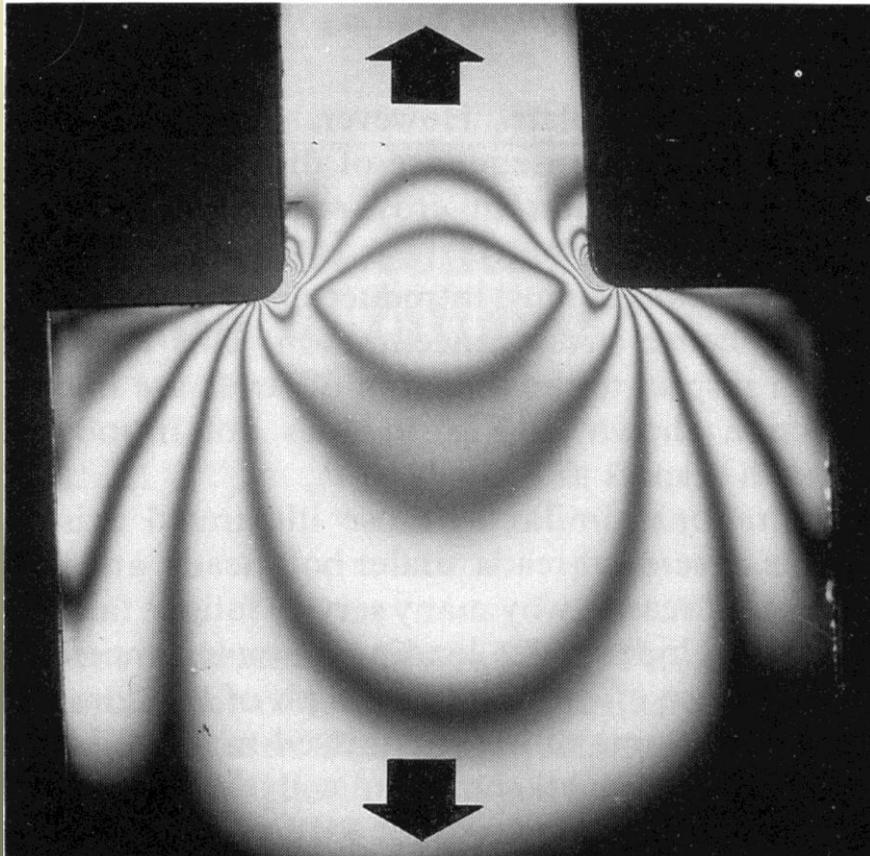
Los primeros estudios de fractura se remontan posiblemente a Leonardo da Vinci, que midió la resistencia a la rotura de alambres de Fe y encontró que su resistencia variaba inversamente con la longitud del alambre ensayado.

Esto puso de manifiesto por primera vez el hecho que la población de defectos en el material controla su resistencia, ya que al ser de mayor longitud, un alambre tiene una mayor probabilidad de contener tales defectos.

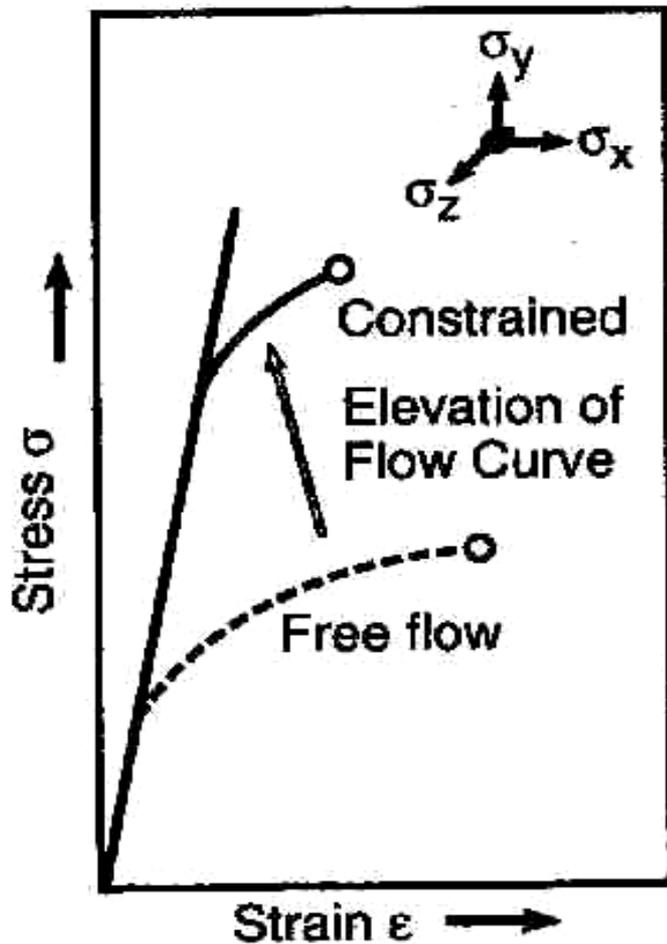
Esta investigación revestía no obstante un carácter aun cualitativo y fue necesario esperar hasta principios del siglo XX, cuando en 1920 Griffith publicó los resultados de sus investigaciones sobre la propagación inestable de fisuras en vidrio.



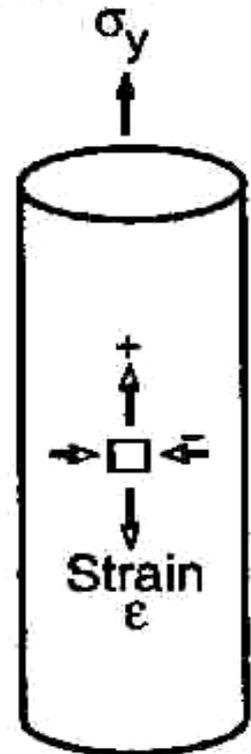
CONCENTRACION DE TENSIONES



Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural
Influencia de la presencia de una entalla sobre la resistencia estática y capacidad de deformación plástica

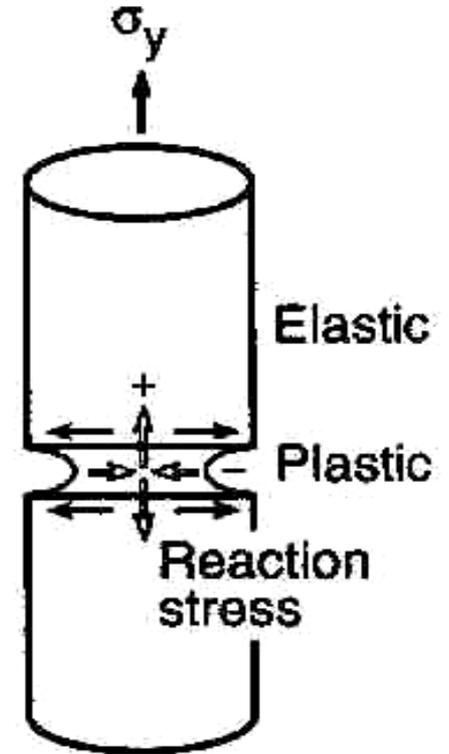


Free Flow



Smooth Bar

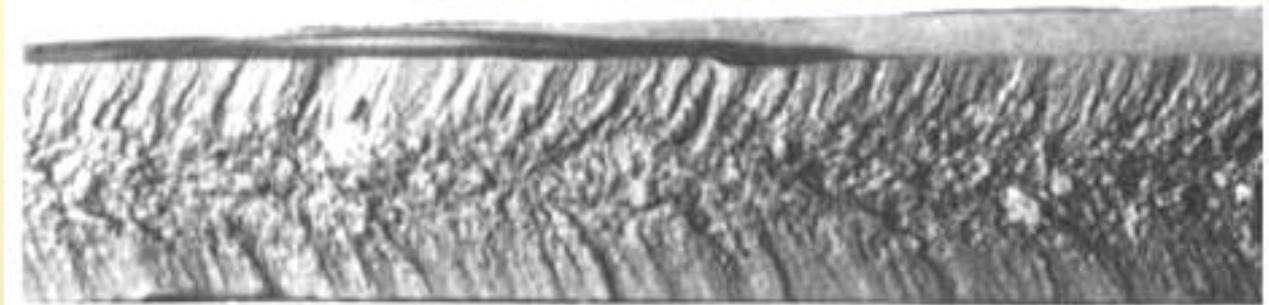
Constrained Flow



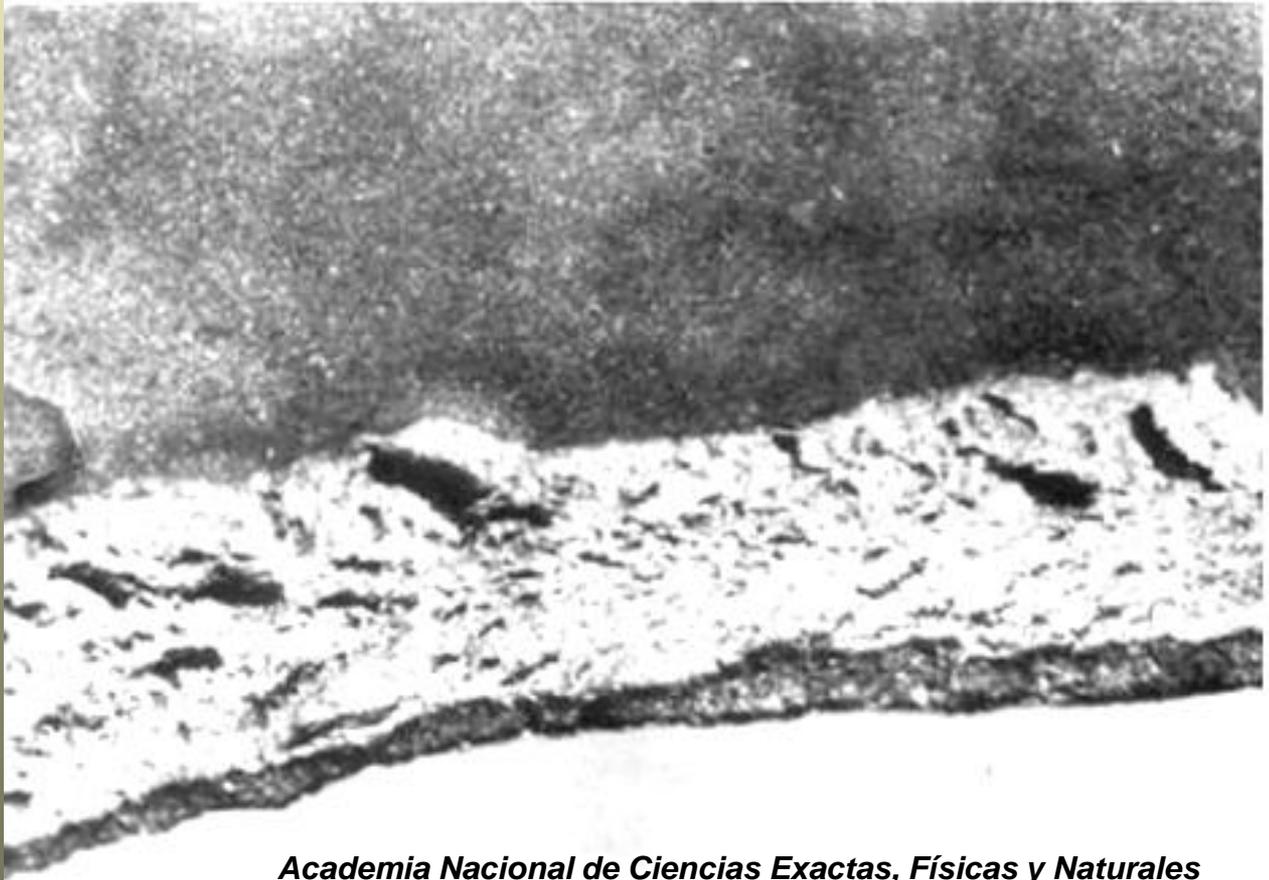
Notched Bar

Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

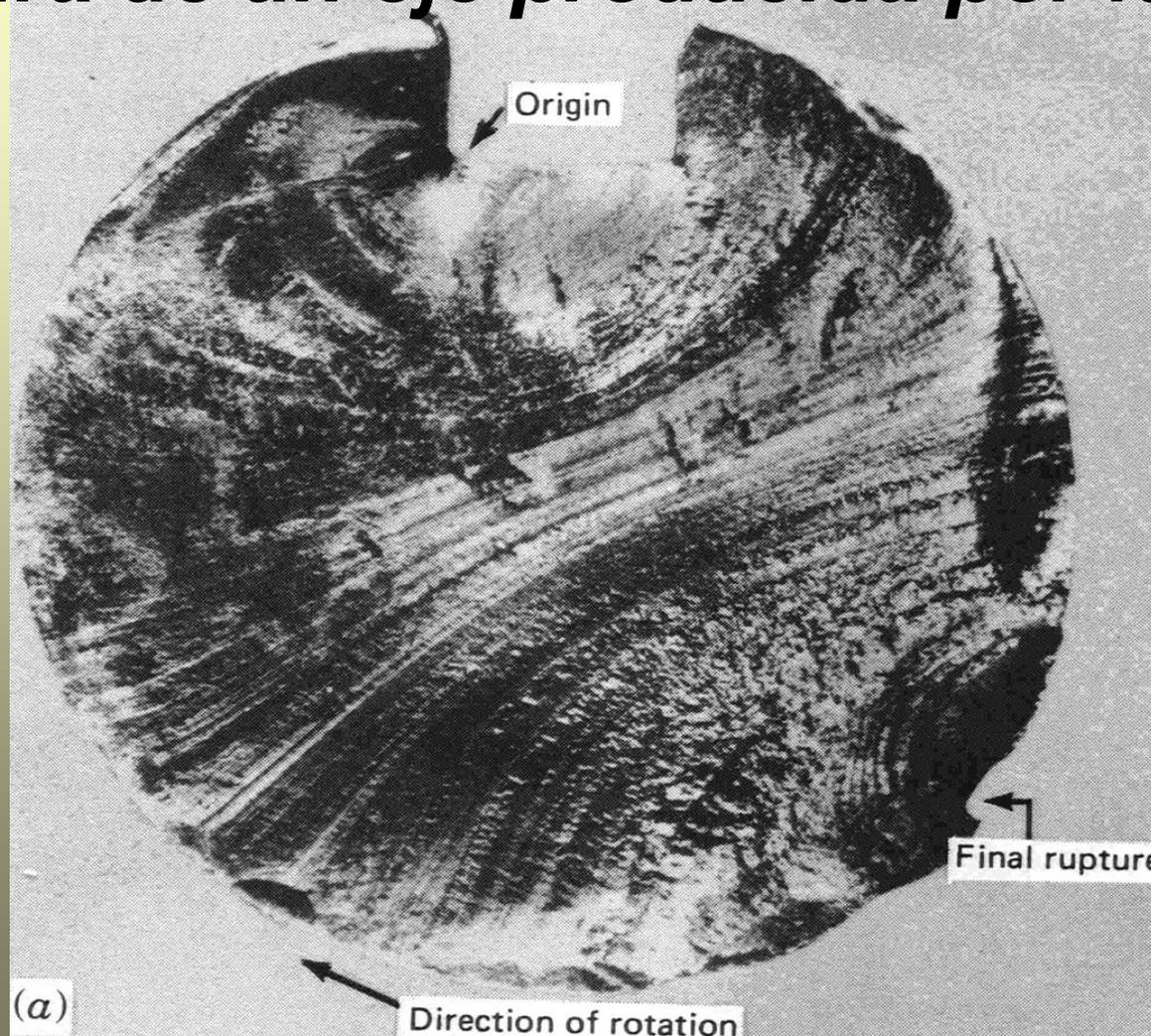
Una fractura frágil se caracteriza por el patrón “Chevron” asociado a una baja deformación plástica en la superficie de fractura, que es esencialmente perpendicular a las superficies de la chapa.



La fractura dúctil se caracteriza en cambio por su aspecto fibroso, ausencia del patrón “Chevron” y una superficie de fractura oblicua con relación a las superficies de la chapa.



Rotura de un eje producida por fatiga



La fotografía anterior corresponde a la superficie de fractura por fatiga de un eje sometido a flexión rotativa. Puede observarse que la fisura por fatiga se inició en el concentrador de tensiones introducido por el chavetero.

También se ven claramente las llamadas “líneas de playa” que denotan las sucesivas posiciones del frente de fisura hasta que se produce el colapso final de la sección remanente. Puede observarse la baja deformación plástica asociada a la rotura.

Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

De Havilland Comet, primer jet comercial, en vuelo. Este avión, de origen británico fue presentado en los primeros años de la década del '50. Lamentablemente, una serie de catástrofes interrumpió la producción y el servicio de la aeronave. Cuando los problemas fueron resueltos luego de, 5 años de estudios, los EE.UU. ya habían tomado la vanguardia en la aviación comercial de reacción (Boeing).



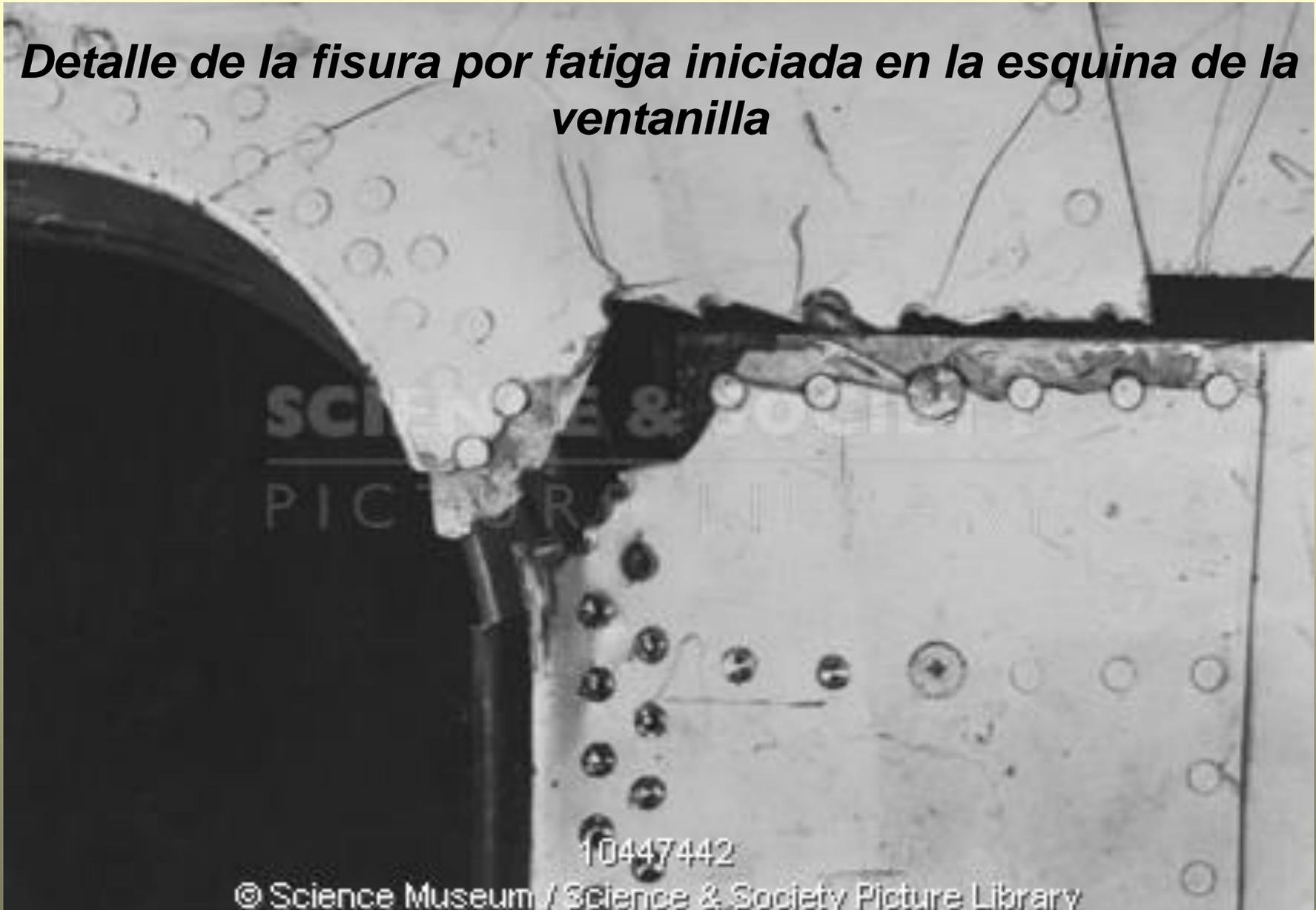
Interior del fuselaje de un De Havilland Comet fallado



10447443

© Science Museum / Science & Society Picture Library

Detalle de la fisura por fatiga iniciada en la esquina de la ventanilla



10447442

© Science Museum / Science & Society Picture Library

Ensayo de fatiga a plena escala de un fuselaje de De Havilland Comet



Luis A. de Vedia

10447445

Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

© Science Museum / Science & Society Picture Library

Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

Un final menos penoso correspondió al vuelo 243 de Aloha Airlines, que luego de sufrir una descompresión explosiva de la cabina, pudo aterrizar en el aeropuerto de Kahului (Maui) el 28 de Abril de 1988, con sólo un miembro de la tripulación fallecido al ser despedido al vacío. La falla se atribuye a una fractura detonada por una fisura originada por fatiga.



***Un caso clásico de fractura rápida (frágil). Tanker T-2
USS Schenectady, acaecida con la nave en puerto,
amarrada y descargada.***



La fotografía anterior ilustra uno de los casos de fractura frágil mas difundidos en la literatura técnica.

Se trata de la rotura catastrófica del tanker T-2 USS Schenectady, acaecida mientras la nave se encontraba amarrada en puerto y descargada.

Este caso ilustra con elocuencia las características con que suele presentarse una fractura rápida, es decir:

- rotura sorpresiva***
- ausencia de sobrecargas***
- diseño “clásico” correcto***

De los aproximadamente 5000 barcos de la serie Liberty, Victory y tankers T-2, que los EE.UU. construyeron en los años 1940-45, unos 800 sufrieron fallas estructurales importantes y unos 200 fracturas mayores.

Dado que estos buques incorporaban el concepto de viga buque soldada, se puso en evidencia alguna relación entre el uso de la soldadura y los problemas de falla por fractura rápida.

Esta circunstancia llevó al inicio de un programa de investigación en el tema que condujo al desarrollo actual de la Mecánica de Fractura.

El Desastre de la Alexander Kielland: un caso tan trágico como aleccionador

400 AIRLIFTED FROM OIL-RIG

More than 400 construction workers were airlifted to Aberdeen from a North Sea accommodation rig in Shell's Fulmar oilfield yesterday after an 11-inch crack was discovered in a weld on one of its leg-braces. The rig, the *Borland Dolphin*, is to be towed to either Norway or Scotland for repairs. Shell said the move was not an evacuation but a 'demanning'; there was no question of any danger because the flaw had been spotted in time.

The fault in the *Borland Dolphin* hired by Shell from a Norwegian company, strongly resembles the kind of structural flaw that led to the *Alexander Kielland* disaster in March 1980 in which 123 British and Norwegian oil workers died.

The Sunday Times,
London, 6th December, 1981

Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Reproducción de un artículo periodístico referido a un evento de falla por fatiga en una plataforma de explotación petrolera "costa afuera" que pudo haber conducido a una falla catastrófica.

Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

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.

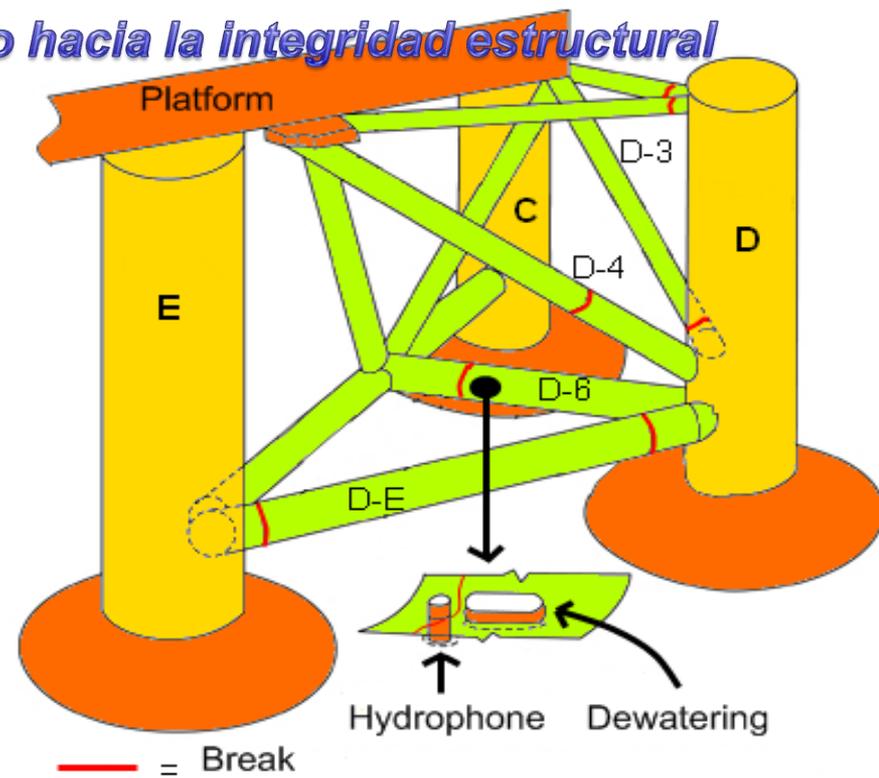
La causa del desastre fue luego rastreada hasta un pequeño cordón de soldadura de filete de 6 mm de cateto que unía una brida destinada al montaje de un sonar, con uno de los elementos estructurales principales de la plataforma.

Irónicamente, el sonar para cuyo montaje la brida había sido instalada, hubiese sido requerido para tareas de explotación que la Alexander Kielland nunca realizó.

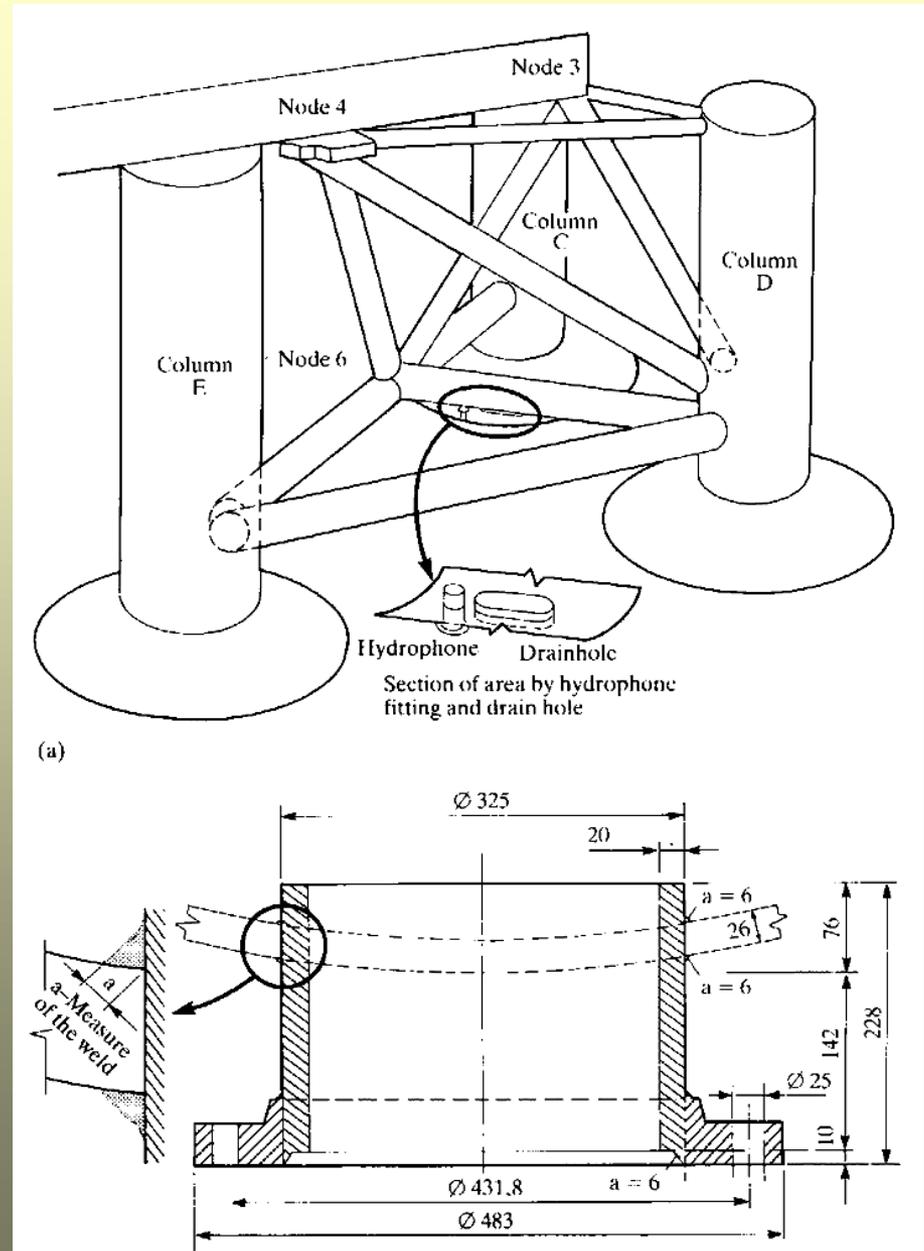
***Foto de la
Alexander
Kielland tomada
pocas semanas
antes del
accidente
ocurrido el
27/03/80***



Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural



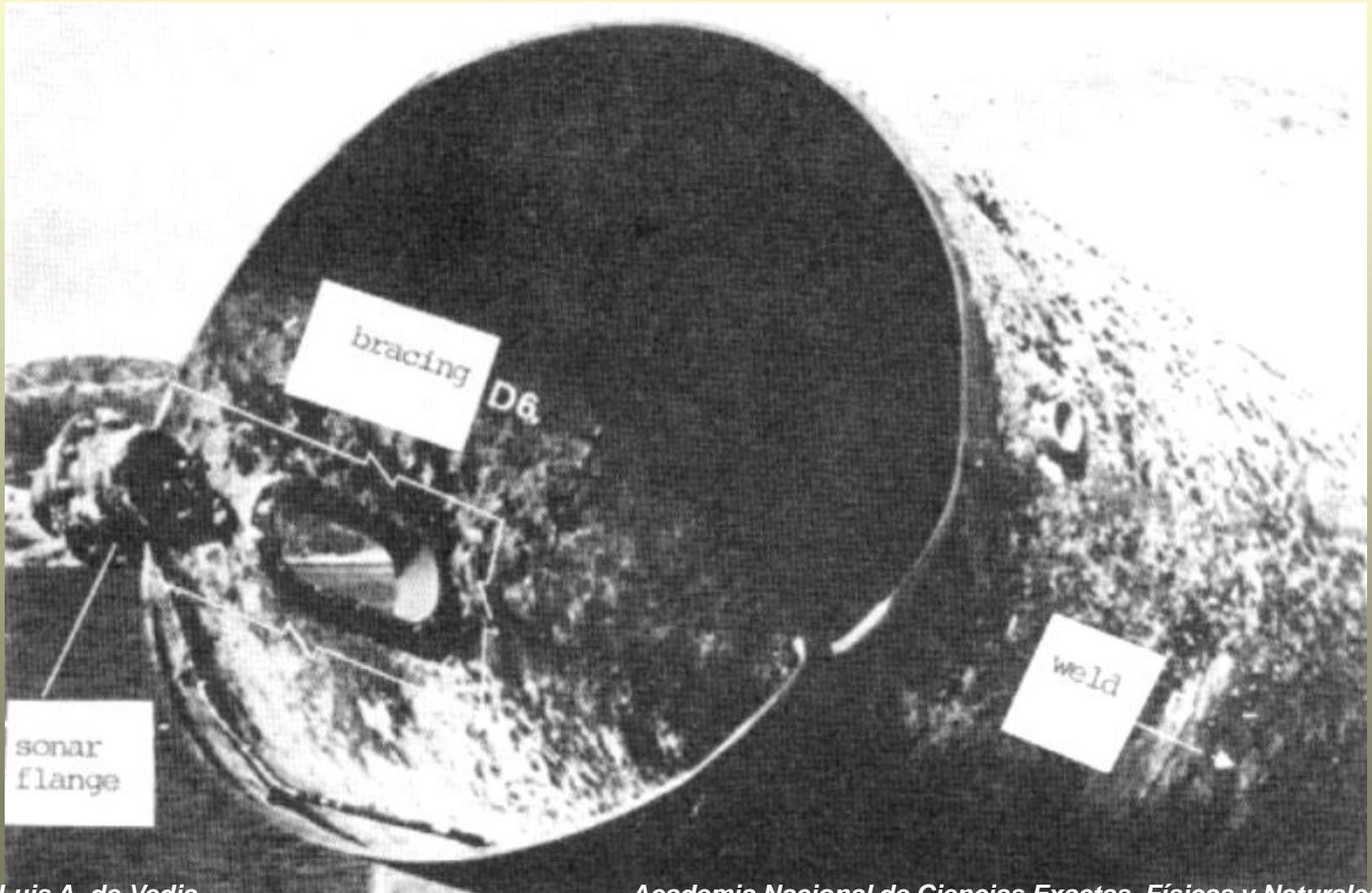
Estructura de soporte de la plataforma semisumergible Alexander Kielland y detalle de la conexión de brida con el miembro tubular "D-6"



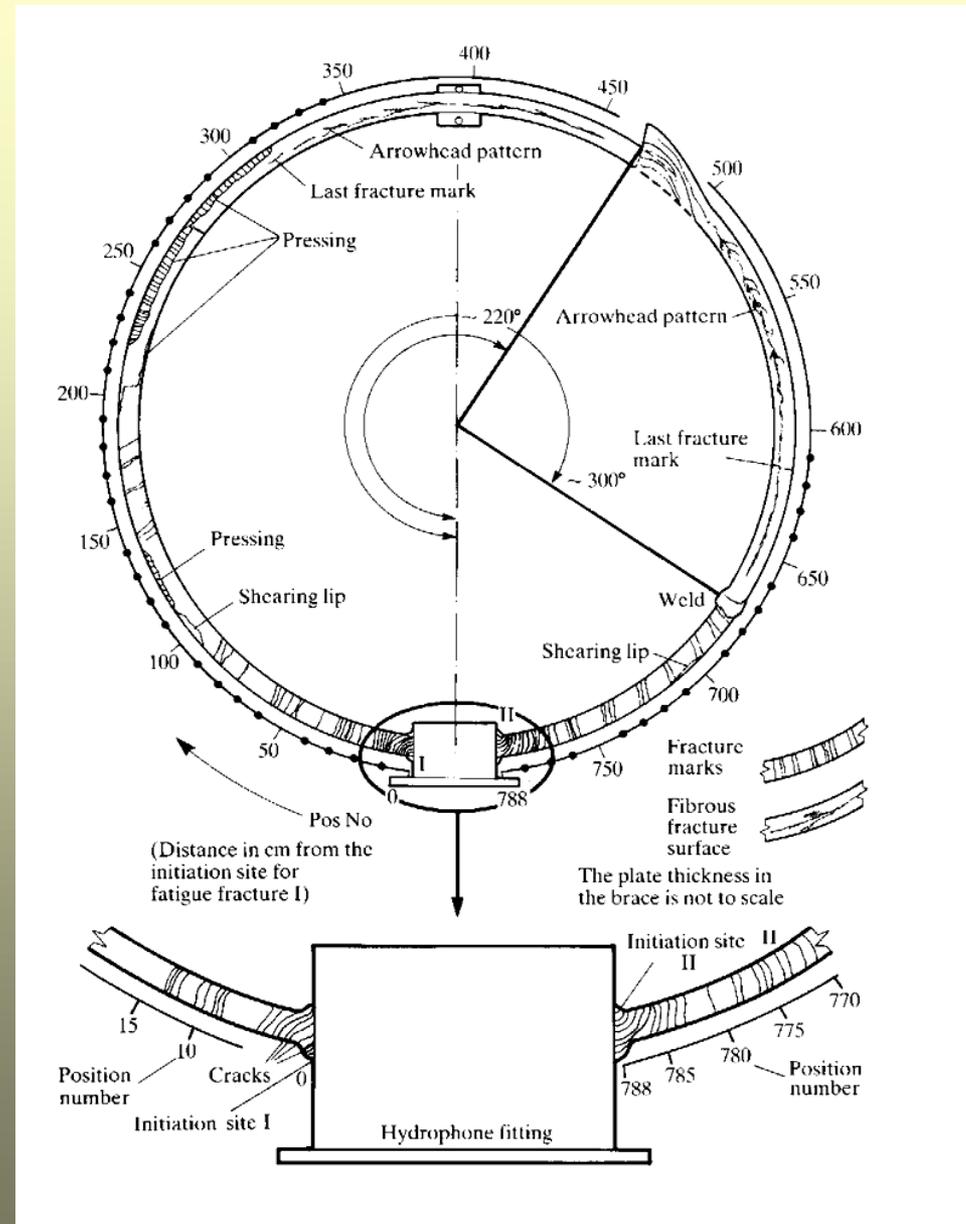
Composición química y características mecánicas y microestructurales de los aceros de la conexión de brida y del miembro tubular principal

<i>Property</i>	<i>Main bracing</i>	<i>Flange plate</i>
Composition (approx.)	0.17wt%C; 0.32 Si; 1.37 Mn; 0.044 Al; 0.029 Nb	Not specified
C_{equiv}	0.41	Not specified
Grain size (normalized)	ASTM 11.5 (ca. 8 μm)	ASTM 10.7 (ca. 7 μm)
Microstructural features	1. Banded, ferritic-pearlitic 2. Slag content low; mainly MnS, finely distributed	1. Banded, ferritic-pearlitic 2. Slag content fairly high; mainly MnS in extreme rolled-out form
σ_y (rolling direction)	345–353 N mm ⁻²	Not specified
σ_t (rolling direction)	506–518 N mm ⁻²	Not specified
σ_t (transverse direction)	419–474 N mm ⁻²	215–437 N mm ⁻²
Area reduction (rolling direction)	30–34%	Not specified
Area reduction (transverse)	6–13%	1–7%
Impact strength (Charpy)		
0 °C	83 J	Not specified
–40 °C	36 J	16 J

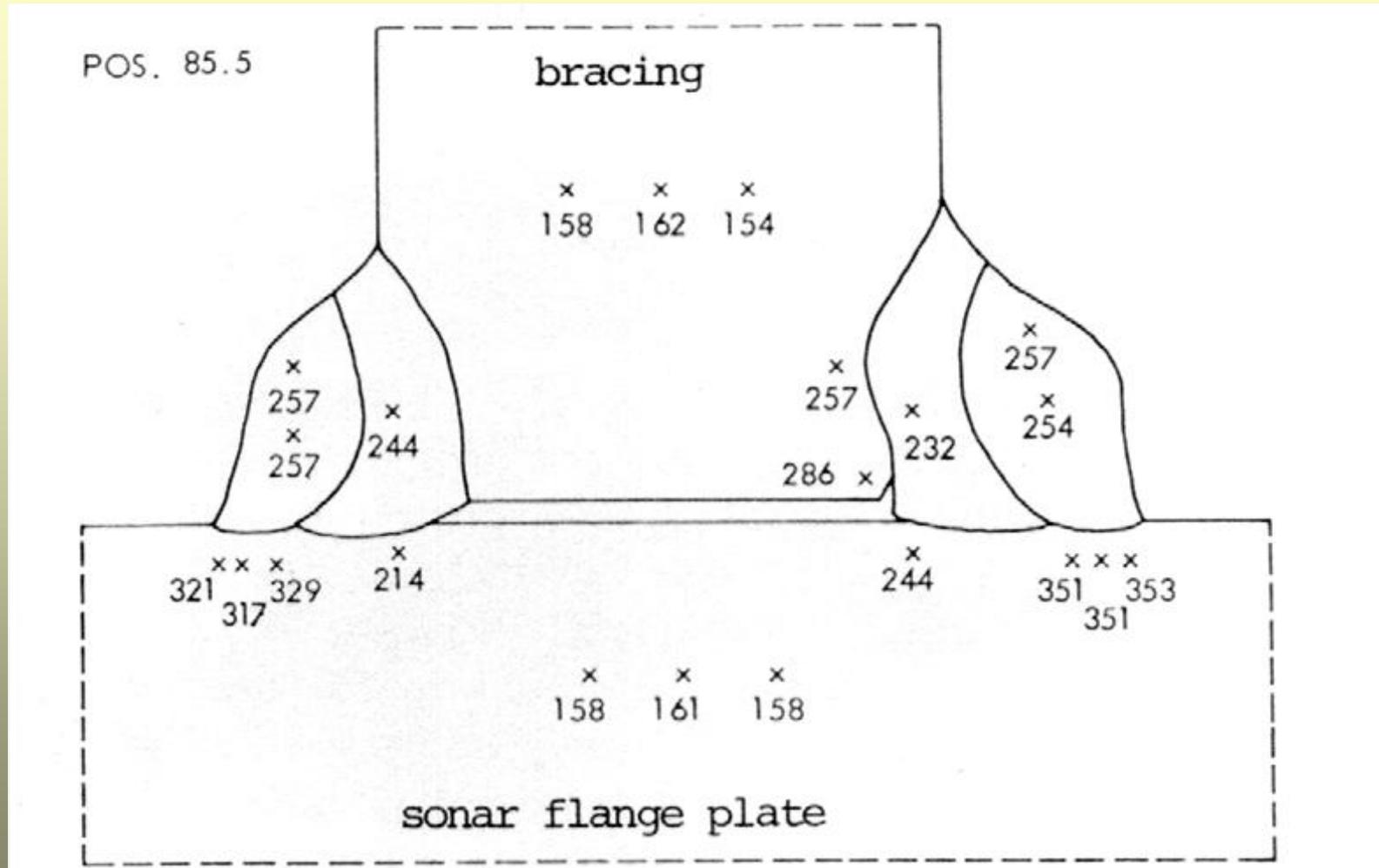
ASPECTO DE LA ROTURA EN EL MIEMBRO TUBULAR D-6



Aspecto de la superficie de fractura originada en las fisuras por fatiga iniciadas en las soldaduras de filete que unian la conexión al miembro tubular "D-6"



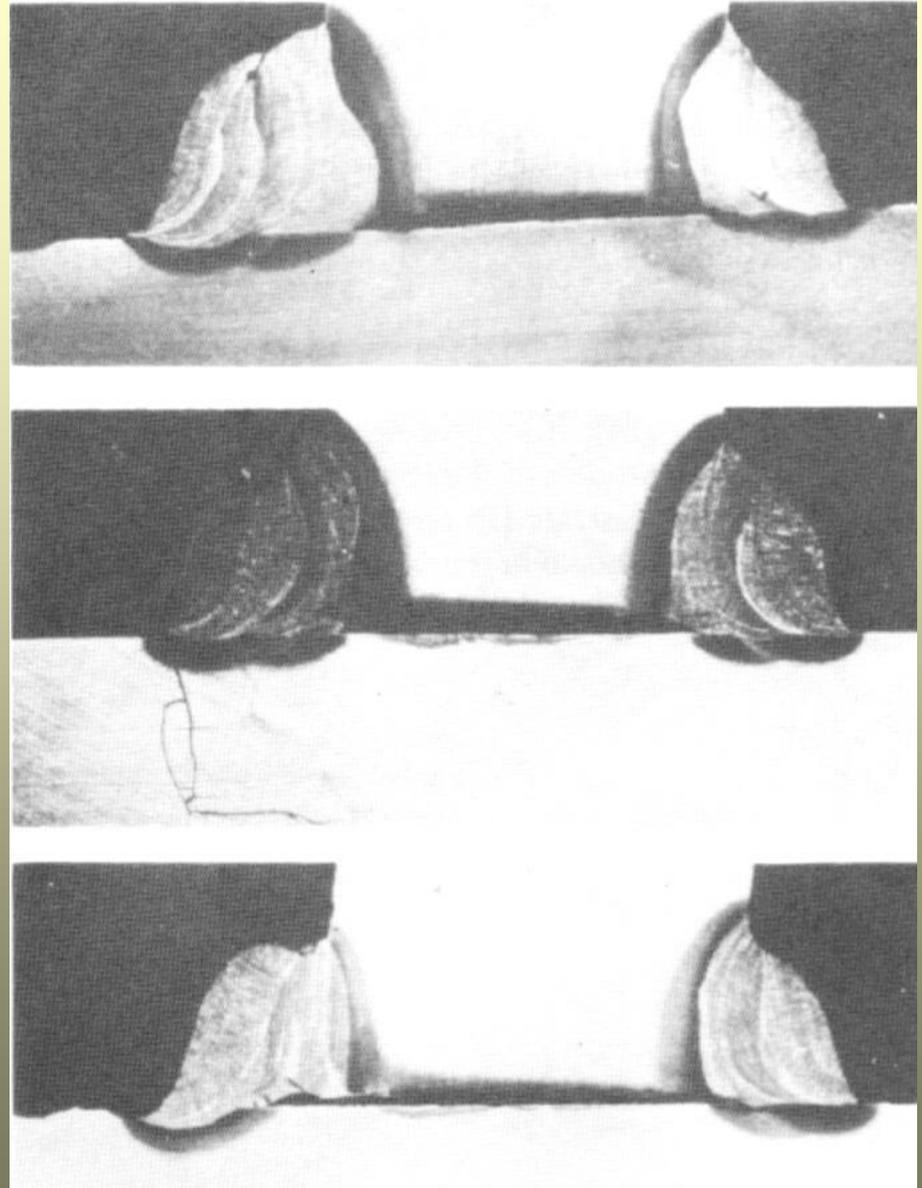
Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural



Durezas (Hv) en las soldaduras de filete de unión de la conexión de la brida con el elemento tubular principal

Aspecto de los filetes de unión entre la conexión de brida (elemento horizontal) y el miembro tubular principal (elemento vertical).

La fotografía, tomada como parte de la investigación posterior al accidente, muestra claramente la presencia de una fisura asociada al talón de la soldadura.

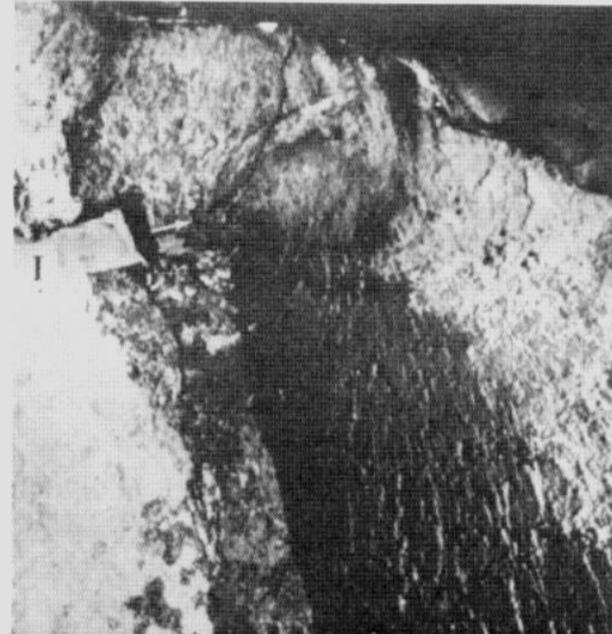
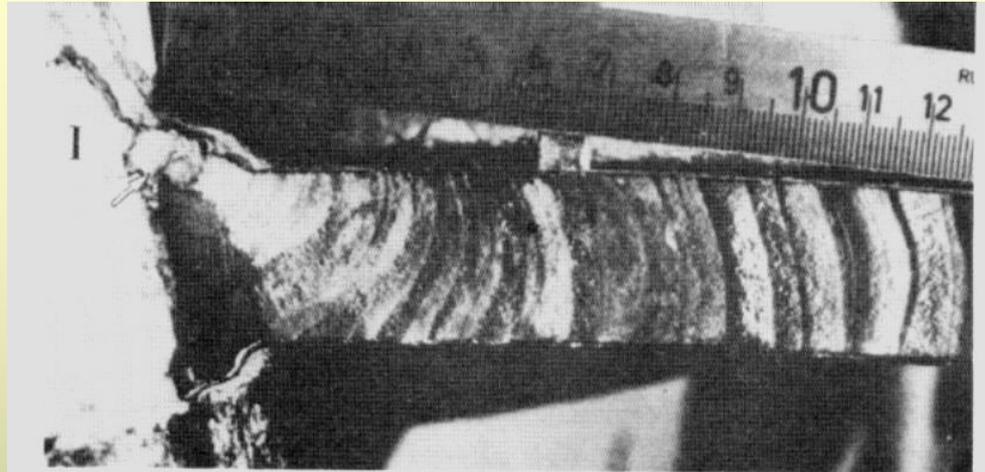


Detalle de la soldadura a tope de la conexión con fisuras por hidrógeno en la raíz y en el talón del cordón y desgarre laminar en el material base



Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

La foto superior muestra sitios de iniciación de fisuras por fatiga en el filete que vinculaba el miembro tubular D-6 (horizontal) y la conexión (vertical). La foto inferior permite ver pequeñas fisuras en la soldadura.



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.

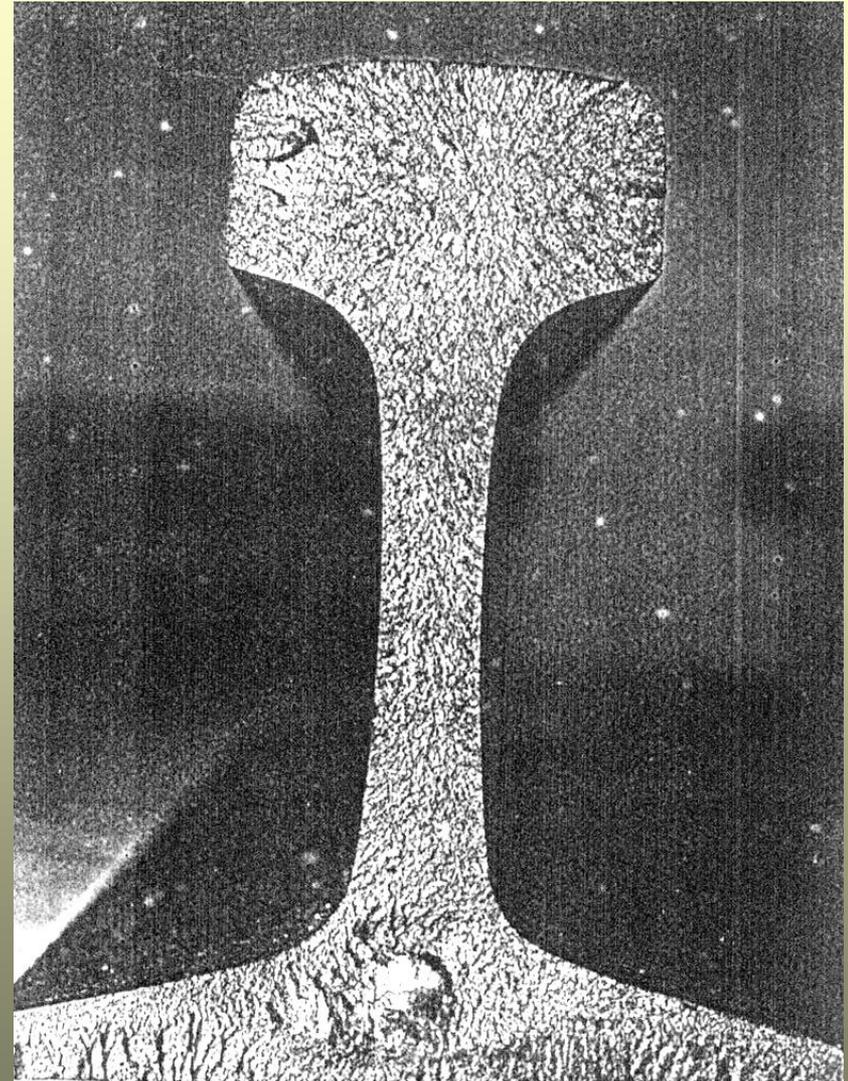
En virtud de esta omisión, el astillero responsable de la construcción obviamente relajó los requerimientos de inspección que había impuesto para las soldaduras consideradas estructurales.

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.

Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

“Antipov había estado asediando los talleres de reparación (ferroviarios) respecto de la calidad de las vías de reemplazo. El acero no era lo suficientemente resistente a la tracción, los rieles no pasaban lo ensayos de deformación, y Antipov pensaba que se fracturarían con el tiempo frío. La gerencia no prestaba atención a sus reclamos. Evidentemente, alguien estaba ganando dinero con los contratos...”

de la novela Doctor Zhivago de Boris Pasternak



Algunos ejemplos en los que la resignación de principios de sana práctica ingenieril fueron subordinados a intereses comerciales o políticos y que han sido tratados en la literatura, son:

- ***El caso del Ford Pinto, en los Estados Unidos***
- ***El accidente de Bophal, en India, ocurrido en Diciembre de 1984.***
- ***El accidente de Three Mile Island, USA, acaecido en Marzo de 1979.***
- ***El accidente de Chernobyl, en Ucrania, Abril de 1986.***
- ***El desastre del Challenger, en Enero de 1986.***
- ***El desastre de la Alexander Kielland en Marzo de 1980.***

Los responsables de estos hechos horrendos no eran asesinos perversos. Ni siquiera individuos particularmente malévolos o incompetentes. Eran ejecutivos guiados por la idea de maximizar las ganancias de la empresa, que hacían análisis de costo-beneficio y que tomaban decisiones que involucraban la vida o la muerte de algunos de sus clientes. Su objetivo no era quebrar la ley, sino maximizar ganancias para su organización: esta exigencia era tan fuerte que ni siquiera se plantearon el problema moral.

El Desastre del Challenger

A photograph of the Space Shuttle Challenger during its ascent, showing a large plume of white smoke and fire trailing behind it against a dark background.

Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

A las 11.38 a.m. de la fría mañana de 36° F (2,5°C) del 28 de enero de 1986, partía de la plataforma de lanzamiento 39-B de Cabo Kennedy, la misión número 25 del programa Shuttle. Exactamente un minuto después, el Challenger explotaba en el aire, matando a los siete astronautas a bordo, incluyendo a la maestra de escuela Christa Mc Auliffe, y desencadenado un crisis organizacional en la NASA de la cual hoy, aún no está totalmente recuperada. La trágica y espectacular explosión del transbordador espacial Challenger fué vista por cientos de millones de personas, y filmada desde más de una docena de ángulos. Sin embargo, la razón del accidente permaneció elusiva durante varios meses.

Un día antes del accidente, una reunión por teleconferencia en la que participó la Agencia (NASA), y Morthon Thiokol (MT), único proveedor de los impulsores de combustible sólido para el trasbordador espacial, tuvo como objeto evaluar la seguridad de la Misión de vuelo 51-L (Challenger) que se llevaría a cabo la mañana siguiente.

Estaban anunciadas temperaturas de 29°F (-1,7°C) para la hora del despegue y la NASA nunca había lanzado un trasbordador debajo de los 53°F (11,7°C). Debido a esto, la gerencia de la Agencia había requerido al Marshal Space Center (MSC) que consultara a los responsables de los impulsores sólidos, para saber si los “O” rings entre los segmentos del cohete funcionarían a tan baja temperatura.

No obstante haber emitido inicialmente una recomendación contraria al lanzamiento, la gerencia de MT, respondiendo a intensas presiones de las autoridades del MSC y pasando por encima de las enérgicas objeciones de sus propios ingenieros, posteriormente se desdijo y le informó a la NASA que podía proceder al lanzamiento.

Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural



Luis A. de Vedia

Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

Hoy se sabe que la explosión siguió a la falla de un "O" ring que estaba destinado a contener el escape de gases de combustión calientes de los impulsores de combustible sólido provistos por Morton Tyokol.

Una Comisión Presidencial revisó las circunstancias del accidente y los sistemas de gestión de la NASA. De la investigación surgió que el control de riesgos y de gestión fue significativamente inferior a los de programas espaciales anteriores.

El programa se encontraba viciado por la aceptación y priorización de objetivos de performance, tiempo y costo totalmente irreales. Si bien se alzaron voces calificadas de alarma respecto del problema que posteriormente desencadenaría la tragedia, estas fueron ignoradas deliberadamente.

Tanto por parte de la NASA como por parte del proveedor de los impulsores, se ejercieron presiones sobre quienes se encontraban en la cadena de responsabilidades del lanzamiento a fin de evitar postergaciones.

Una organización matricial con dependencias difusas contribuyó a impedir el acceso de información vital a los niveles mas altos de decisión de la NASA (Por ejemplo, el problema planteado por lo ingenieros de Morton Tyokol respecto del funcionamiento de los "O" ring con bajas temperaturas, no fué informado al representante de los astronautas).

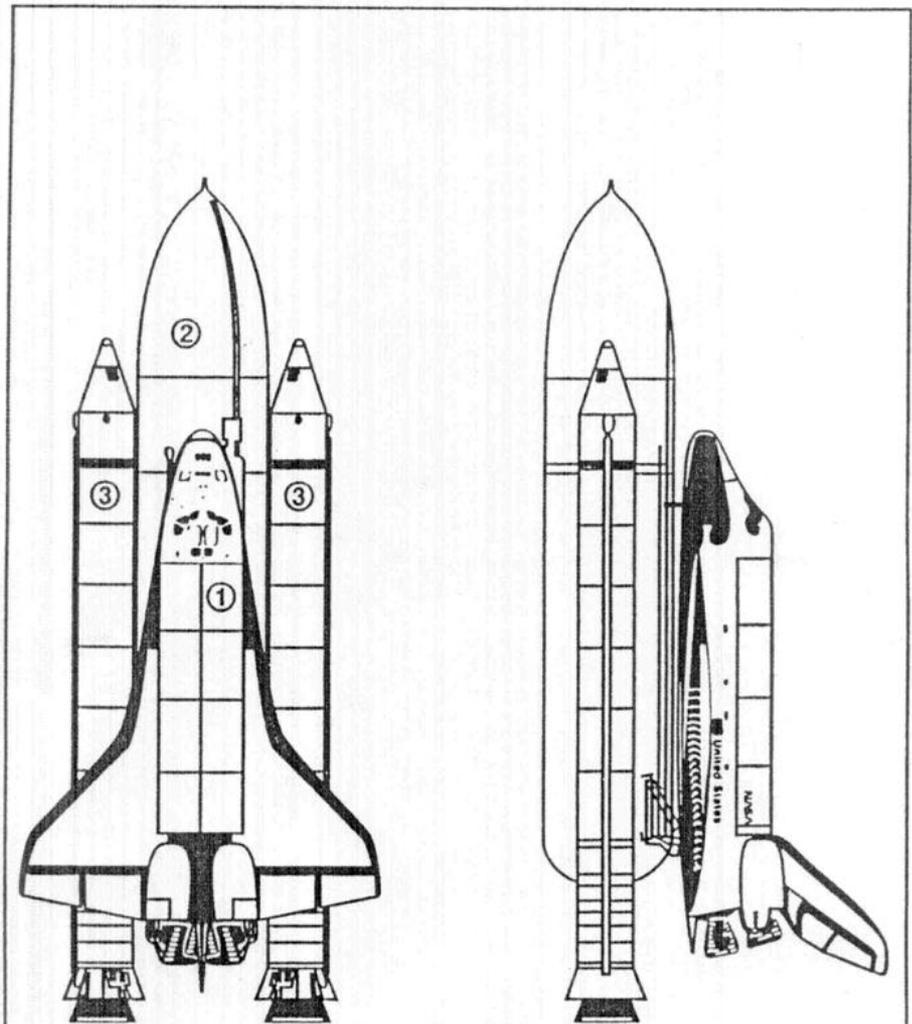
Existía una actitud mental alimentada por los resonantes éxitos de otros programas espaciales como el Proyecto Apolo, en el sentido de que la agencia podía lograr cualquier objetivo que se propusiese.

Transbordador espacial ensamblado para el lanzamiento.

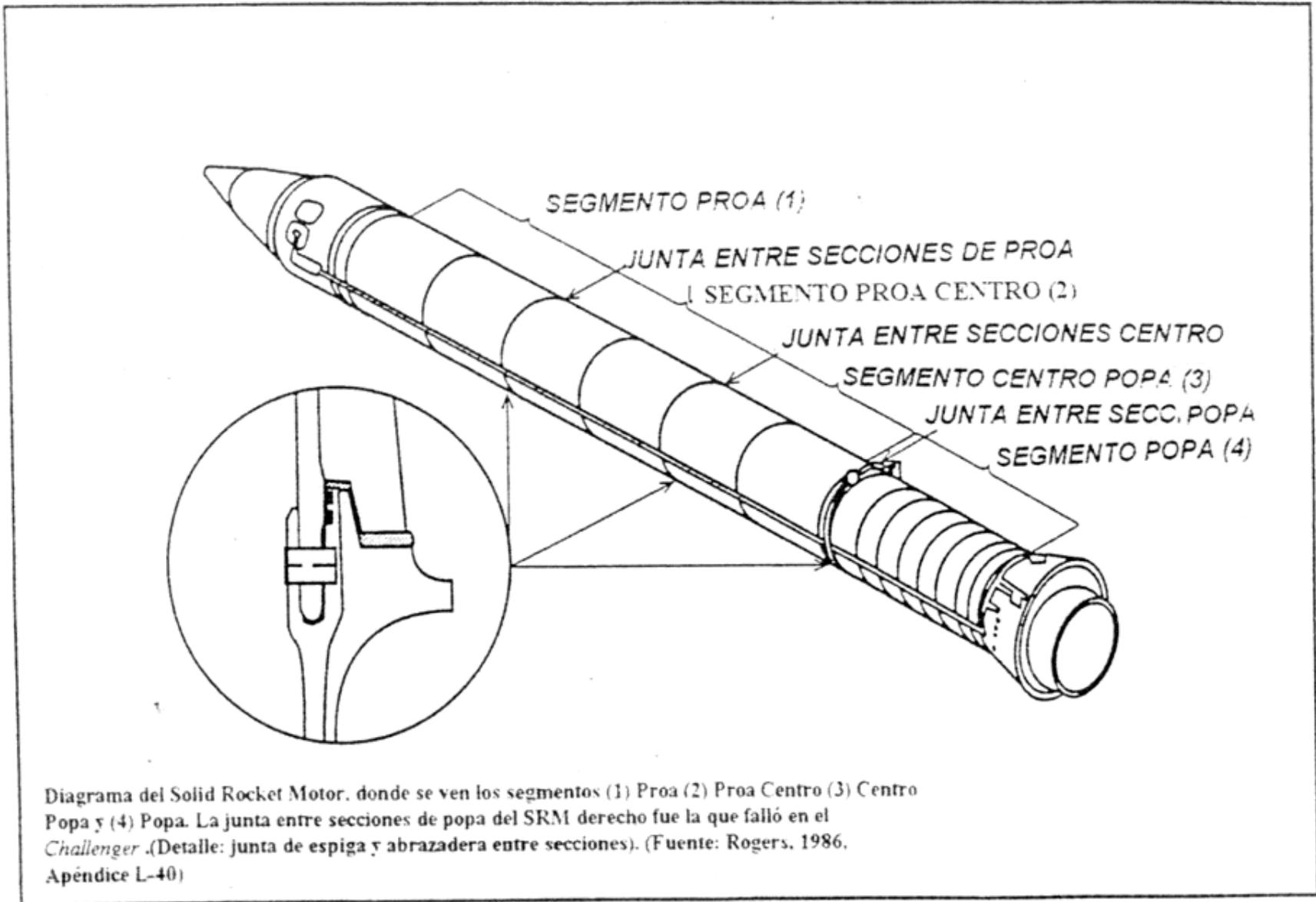
(1) Orbitador

(2) Tanque externo

(3) Boosters



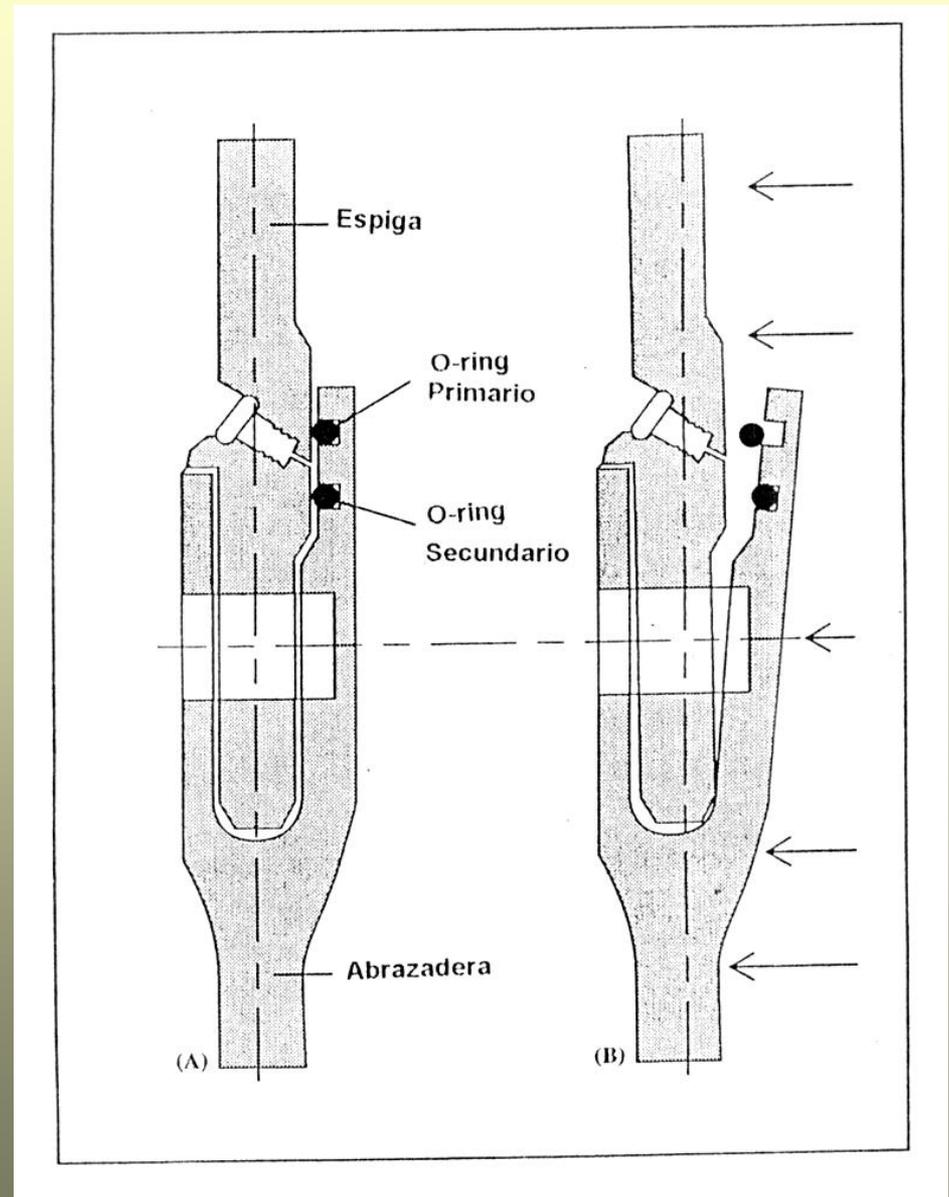
Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural



Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

El esquema de la derecha muestra la deflexión de la abrazadera con respecto a la espiga durante la presurización, creando una brecha en la ubicación de los "O" rings.

El interior de booster se encuentra a la derecha de la pared y la atmósfera a la izquierda.



Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

31 July 1985

MORTON THIOKOL INC.

Wasatch Division



Interoffice Memo

31 July 1985
2870:FY86:073

TO: R. K. Lund
Vice President, Engineering

CC: B. C. Brinton, A. J. McDonald, L. H. Sayer, J. R. Kapp

FROM: R. M. Boisjoly
Applied Mechanics - Ext. 3525

SUBJECT: SRM O-Ring Erosion/Potential Failure Criticality

This letter is written to insure that management is fully aware of the seriousness of the current O-Ring erosion problem in the SRM joints from an engineering standpoint.

The mistakenly accepted position on the joint problem was to fly without fear of failure and to run a series of design evaluations which would ultimately lead to a solution or at least a significant reduction of the erosion problem. This position is now drastically changed as a result of the SRM 16A nozzle joint erosion which eroded a secondary O-Ring with the primary O-Ring never sealing.

If the same scenario should occur in a field joint (and it could), then it is a jump ball as to the success or failure of the joint because the secondary O-Ring cannot respond to the clevis opening rate and may not be capable of pressurization. The result would be a catastrophe of the highest order - loss of human life.

An unofficial team (a memo defining the team and its purpose was never published) with leader was formed on 19 July 1985 and was tasked with solving the problem for both the short and long term. This unofficial team is essentially nonexistent at this time. In my opinion, the team must be officially given the responsibility and the authority to execute the work that needs to be done on a non-interference basis (full time assignment until completed).

COMPANY PRIVATE

Luis A. de Vedia

R. K. Lund

It is my honest and very real fear that if we do not take immediate action to dedicate a team to solve the problem, with the field joint having the number one priority, then we stand in jeopardy of losing a flight along with all the launch pad facilities.

R. M. Boisjoly

R. M. Boisjoly

Concurred by:

J. R. Kapp

J. R. Kapp, Manager
Applied Mechanics



Es mi temor sincero y muy real, que si no tomamos medidas inmediatas para que un equipo se ocupe de resolver este problema, dándole a las juntas de campo prioridad uno, estamos en peligro de perder un vuelo con todo el sistema de lanzamiento.

COMPANY PRIVATE

Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

La noche después del accidente fui a mi casa a sacar todas las pruebas. Yo había advertido en varias oportunidades y de varias formas las fallas de los aviones. De esa manera no se podía volar. Dos días después del accidente acerqué al juzgado una larga serie de archivos y registros técnicos, entre ellos las cartas dirigidas a las autoridades de Lapa, donde les anticipaba que de continuar con esa política, un accidente era inevitable^(*).

(*) Extractado de un reportaje efectuado a Enrique Piñeyro con relación al accidente del Boeing 737 de Lapa, en aeroparque, el 31 de Agosto de 1999. (Revista Debate)

[http://es.wikisource.org/wiki/Informe_de_la_Junta_de_Investigaciones_de_Accidentes_de_Aviaci%C3%B3n_Civil_\(Argentina\)_sobre_el_vuelo_LAPA_3142](http://es.wikisource.org/wiki/Informe_de_la_Junta_de_Investigaciones_de_Accidentes_de_Aviaci%C3%B3n_Civil_(Argentina)_sobre_el_vuelo_LAPA_3142)

FIGURE 6

[Handout]

Challenger Launch **Final Tele-Conference Participants** **January 27, 1986 ***

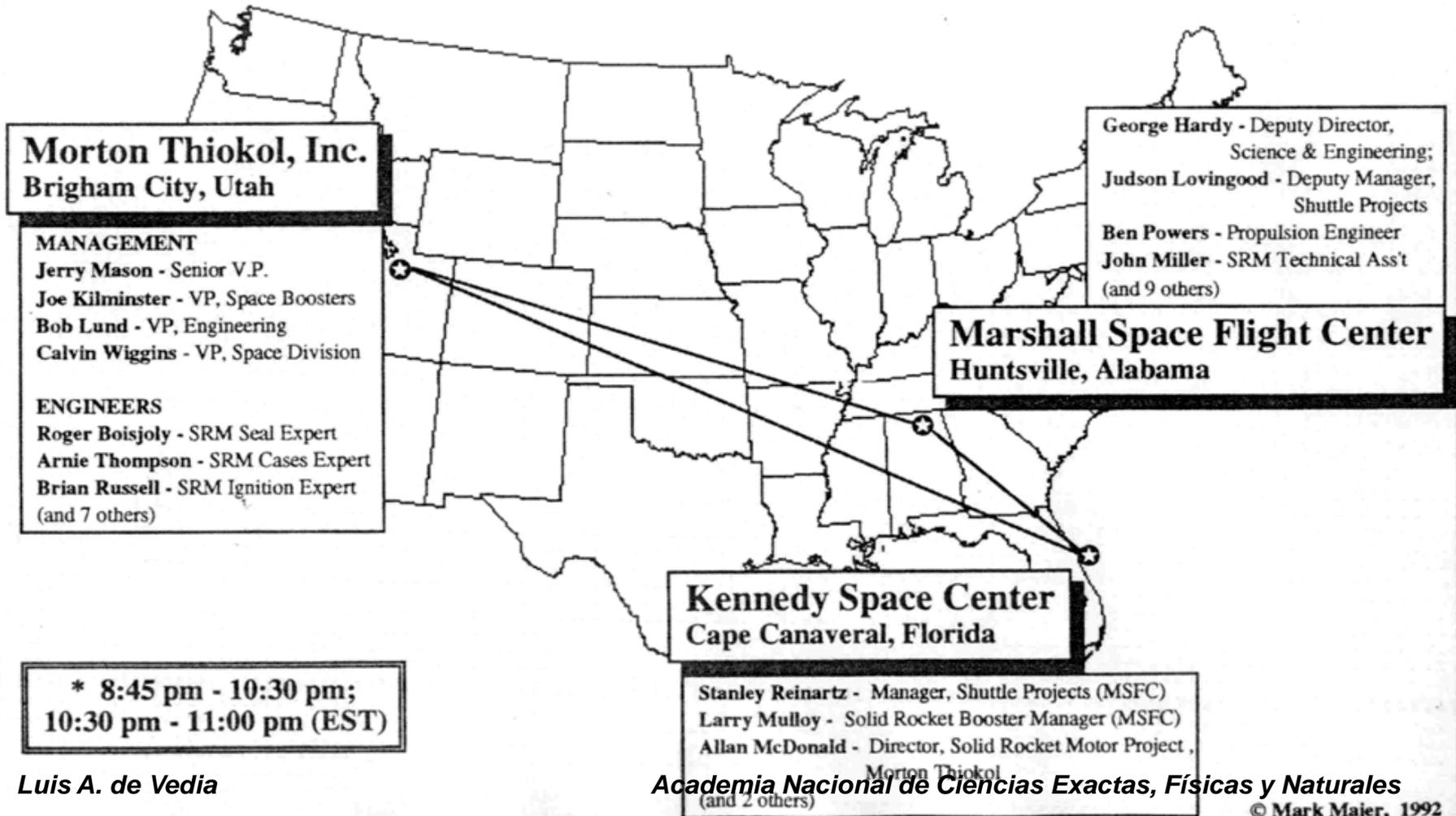
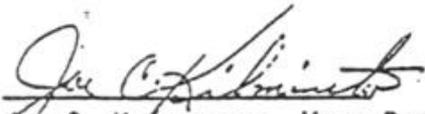


Figure # 12

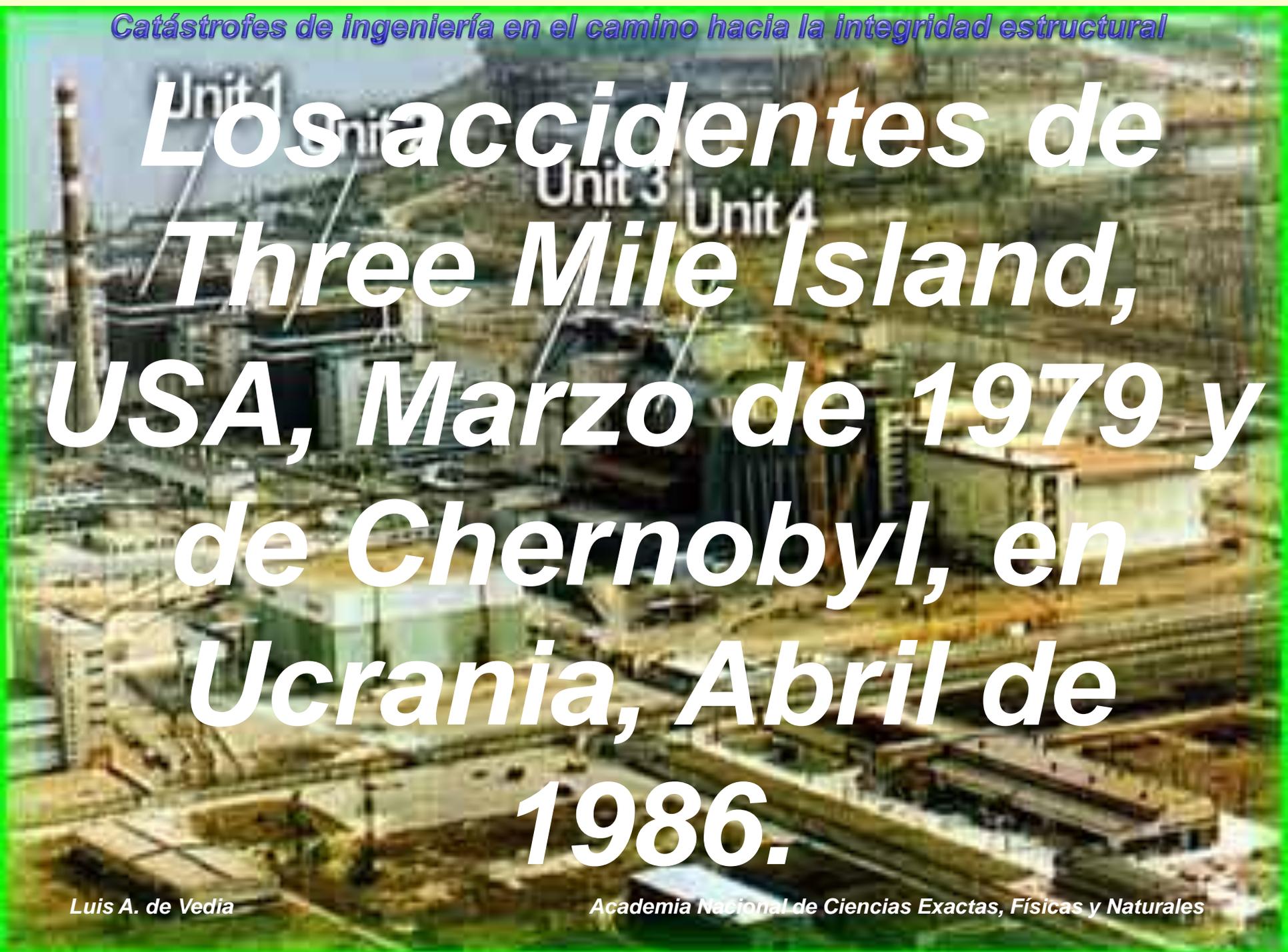
MTI's Final Authorization to Launch Chart (Faxed from Thiokol to MSFC and Kennedy)

MTI ASSESSMENT OF TEMPERATURE CONCERN ON SRM-25 (51L) LAUNCH

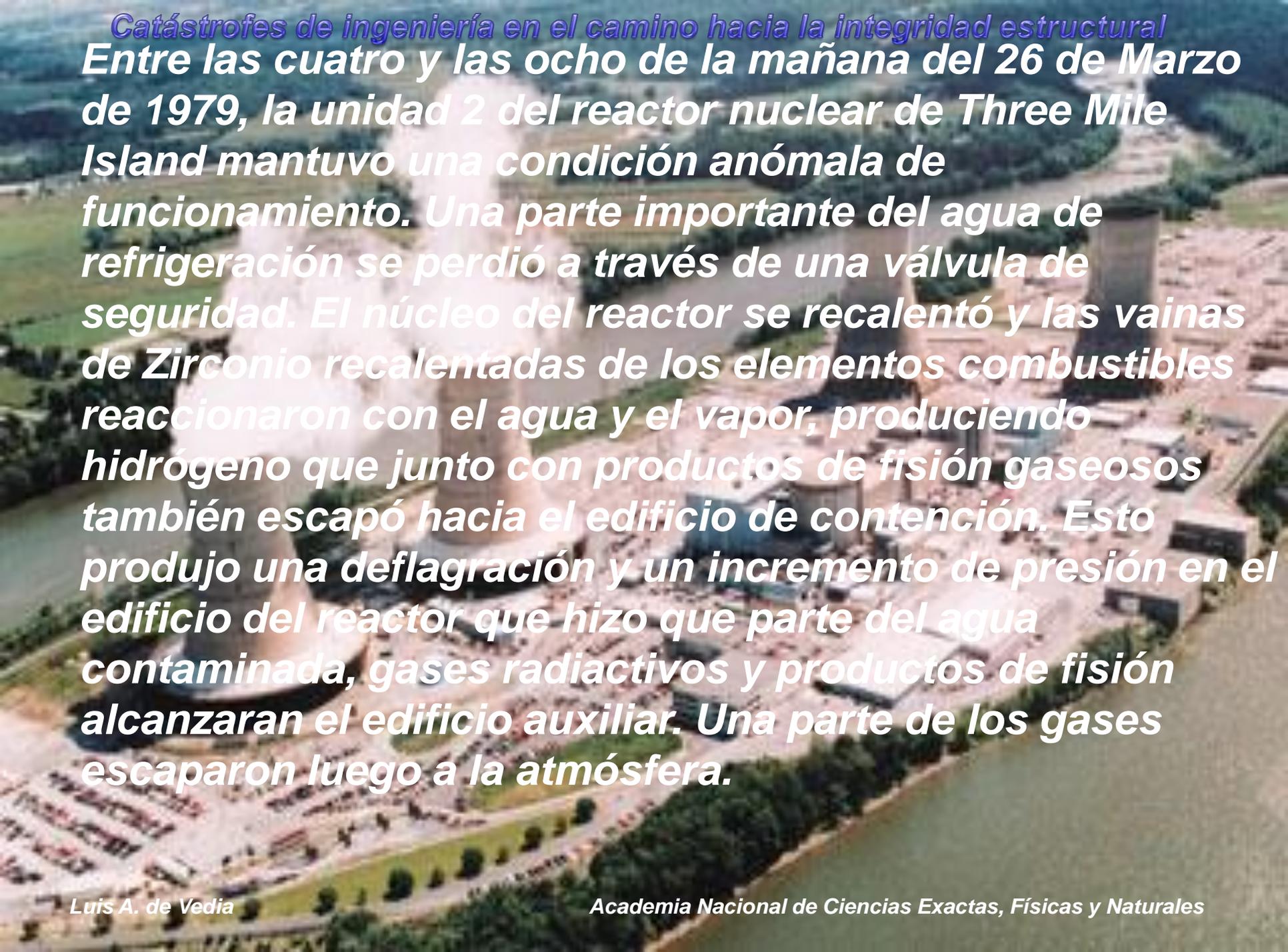
- 0 CALCULATIONS SHOW THAT SRM-25 O-RINGS WILL BE 20° COLDER THAN SRM-15 O-RINGS
- 0 TEMPERATURE DATA NOT CONCLUSIVE ON PREDICTING PRIMARY O-RING BLOW-BY
- 0 ENGINEERING ASSESSMENT IS THAT:
 - 0 COLDER O-RINGS WILL HAVE INCREASED EFFECTIVE DUROMETER ("HARDER")
 - 0 "HARDER" O-RINGS WILL TAKE LONGER TO "SEAT"
 - 0 MORE GAS MAY PASS PRIMARY O-RING BEFORE THE PRIMARY SEAL SEATS (RELATIVE TO SRM-15)
 - 0 DEMONSTRATED SEALING THRESHOLD IS 3 TIMES GREATER THAN 0.038" EROSION EXPERIENCED ON SRM-15
 - 0 IF THE PRIMARY SEAL DOES NOT SEAT, THE SECONDARY SEAL WILL SEAT
 - 0 PRESSURE WILL GET TO SECONDARY SEAL BEFORE THE METAL PARTS ROTATE
 - 0 O-RING PRESSURE LEAK CHECK PLACES SECONDARY SEAL IN OUTBOARD POSITION WHICH MINIMIZES SEALING TIME
- 0 MTI RECOMMENDS STS-51L LAUNCH PROCEED ON 28 JANUARY 1986
 - 0 SRM-25 WILL NOT BE SIGNIFICANTLY DIFFERENT FROM SRM-15


JOE C. KILMINSTER, VICE PRESIDENT
SPACE BOOSTER PROGRAMS

MORTON THIOKOL INC.
Research Division

An aerial photograph of a nuclear power plant facility. The image shows several large industrial buildings and structures. Four units are labeled: Unit 1, Unit 2, Unit 3, and Unit 4. The text is overlaid on the image in a large, white, bold font.

***Los accidentes de
Three Mile Island,
USA, Marzo de 1979 y
de Chernobyl, en
Ucrania, Abril de
1986.***

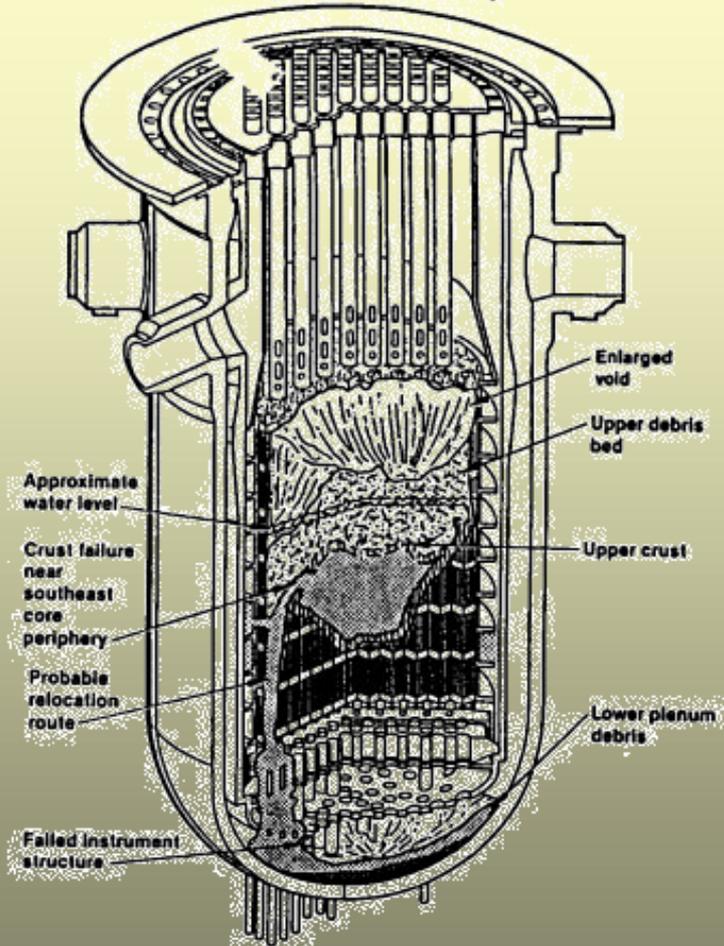
An aerial photograph of the Three Mile Island nuclear power plant. The image shows several large, cylindrical cooling towers in the foreground, each emitting a thick plume of white steam that rises into the air. The plant's complex of buildings and piping is visible in the middle ground, situated on a grassy area. In the background, there are more industrial structures and a road. The overall scene is captured from a high angle, providing a clear view of the facility's layout and the environmental impact of the cooling process.

Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural
Entre las cuatro y las ocho de la mañana del 26 de Marzo de 1979, la unidad 2 del reactor nuclear de Three Mile Island mantuvo una condición anómala de funcionamiento. Una parte importante del agua de refrigeración se perdió a través de una válvula de seguridad. El núcleo del reactor se recalentó y las vainas de Zirconio recalentadas de los elementos combustibles reaccionaron con el agua y el vapor, produciendo hidrógeno que junto con productos de fisión gaseosos también escapó hacia el edificio de contención. Esto produjo una deflagración y un incremento de presión en el edificio del reactor que hizo que parte del agua contaminada, gases radiactivos y productos de fisión alcanzaran el edificio auxiliar. Una parte de los gases escaparon luego a la atmósfera.

Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

El proyecto tuvo su origen en la previsión del incremento de la demanda de carga en el área Pennsylvania-New Jersey, servida por GPU (General Public Utilities) y la subsidiaria Metropolitan Edison. Las unidades, provistas por Babcock & Wilcox, fueron puestas en servicio entre 1974 y 1978. El diseño de los reactores PWR (Pressurized Water Reactor) de B&W era similar a los de Westinghouse y Combustion Engineering, pero se diferenciaba en el tipo de generador de vapor que imponía un control más sensible del agua de alimentación y sistemas más complejos para el control de arranques y paradas.

Hypothesized Core Damage Configuration (226 Minutes)



La Comisión Presidencial que analizó el accidente de Three Mile Island enfatizó la "actitud mental" prevaleciente en el sentido de que no podría ocurrir un accidente importante, a pesar de los reiterados problemas ocurridos especialmente con la Unidad 1.

La NRC (National Regulatory Commission) parece también haber sido víctima de esta actitud mental, ya que no hizo ninguna de las recomendaciones sobre acciones y procedimientos que según se detectó luego del accidente, debería haber hecho.

Se estableció que la creencia que el cumplimiento de regulaciones federales garantizaba la seguridad, fue un factor que contribuyó a tal actitud.

El accidente en la Unidad 4 de Chernobyl, ocurrido no muy lejos de la ciudad de Kiev, liberó 100 millones de Curies de radiactividad y tuvo algunas características muy similares al de Three Mile Island, aunque agravadas significativamente en sus consecuencias por razones que tienen que ver con detalles constructivos de los reactores de tecnología soviética de la época.

En un radio de 30 Km del lugar del accidente, la población debió ser evacuada. Aún hoy, se ignoran las consecuencias de largo plazo que la radiación liberada puede tener en los habitantes de la región vecina a la central nuclear.

Bernstein y Kushment, que analizaron en particular los casos de Chernobyl y del Challenger, detectaron los siguientes paralelismos entre ambos:

- ***Programas exitosos de largo aliento, que se remontaban a los '50 para el caso de Chernobyl, y a los '60 para el Challenger.***
- ***Importante involucramiento militar en el diseño, objetivos, y control de ambos programas.***
- ***Una transición en el tiempo, de un esfuerzo "mission-oriented" a eventos repetitivos.***

- ***La NASA comenzó a llevar el programa Shuttle como si fuera comercialmente operativo, mientras que los soviéticos iniciaron la producción masiva de reactores de 1000 MW.***
- ***A medida que los aspectos técnicos se fueron haciendo rutina, tanto los soviéticos como la NASA politizaron sus respectivos programas con cuestiones referentes a lealtad partidaria o institucional respectivamente, y adherencia a procedimientos burocráticos con prioridad sobre las decisiones técnicas fundamentadas. En particular, en la NASA se compartimentalizó la información con resultados parecidos a los del programa soviético.***



El atentado contra las torres gemelas del World Trade Center en la ciudad de New York

Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

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.

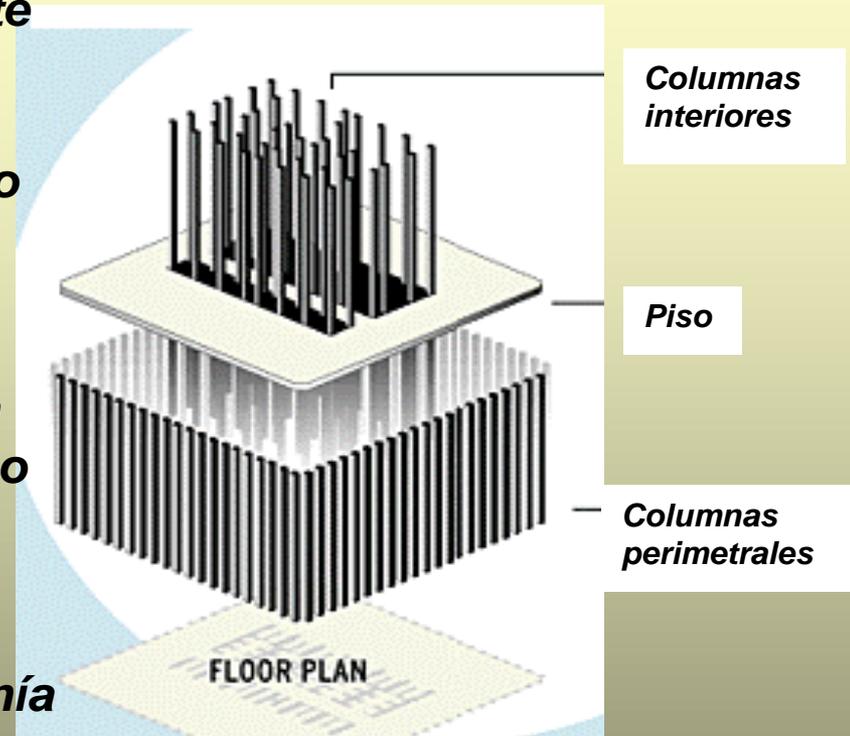
Como en todos los grandes edificios, el criterio estructural básico para las dos torres de aproximadamente 380 m de alto se centraba en dos aspectos: resistencia a las gigantescas cargas gravitatorias propias y a las cargas provocadas por los vientos y terremotos que pudieran causar enormes momentos de vuelco en sus bases.

Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

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. La figura muestra como se encontraban dispuestas las columnas en un perímetro exterior y en un núcleo interior.



Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

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.

Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

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 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.

Tomados todos los casos en conjunto, se manifiesta una serie de características comunes a todos ellos. Con alguna excepción bastante obvia, estos atributos comunes son:

- ***Responsabilidades Difusas: Canales rígidos de comunicación; Grandes distancias organizacionales entre los decisores y planta.***
- ***Actitud Mental: El éxito es rutina; Ignorancia de riesgos severos.***
- ***Cumplimiento de las regulaciones: Creencia de que esto es suficiente para garantizar la seguridad.***
- ***Enfasis del Espíritu de Equipo: El disenso no es admitido aún ante un riesgo evidente.***
- ***Experiencia: Inexistencia de un proceso sistemático para aprender de la experiencia del otro.***
- ***Ignorancia de las Lecciones Aprendidas: Descuido de precauciones adoptadas globalmente en otros lados.***

Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

- ***Análisis de Seguridad: Subordinados a otros objetivos prioritarios de performance operativa.***
- ***Procedimientos de Emergencia: Falta de planes, procedimientos, entrenamientos, y acciones de emergencia ante eventos severos.***
- ***Aspectos de Diseño y Operacionales: No obstante ser reconocidos en otros lugares como peligros potenciales, se permitió que persistieran.***
- ***Gestión de Proyecto y de Análisis de Riesgo: No se emplearon las metodologías disponibles.***
- ***Organización: Responsabilidades y autoridades para el reconocimiento y la integración de aspectos referentes a la seguridad indefinidas.***

A la luz de las consideraciones anteriores, la primera pregunta que surge es: ¿por qué razón buenos managers hacen elecciones éticas incorrectas? Cuando observamos con cuidado, surgen cuatro tipo de racionalizaciones comunes que suelen conducir a inconducta. Estas son:

- (i) La creencia de que lo que se hace se encuentra dentro de límites legales y éticos razonables, es decir que no hay nada ilegal o inmoral en la conducta adoptada.***
- (ii) La creencia que lo que se hace es en el mejor interés de la organización, es decir que se espera de los individuos que actúen de tal manera.***
- (iii) La creencia que la actividad es "segura" porque nunca será detectada o porque nunca saldrá a la luz. En otras palabras, el tema clásico de "crimen y castigo".***
- (iv) La creencia que dado que la actitud se adopta en beneficio de la organización, ésta condonará y protegerá a la persona comprometida.***

Estos terribles ejemplos nos deberían hacer reflexionar sobre el hecho que si bien el mantenimiento de la integridad estructural de un componente en servicio depende de una adecuada conjunción de factores tecnológicos, lo que quizás no resulta tan evidente es que la concurrencia de algunos de esos factores requiere un sustento que no se encuentra en el campo de las ciencias positivas: nos referimos al sustento moral que da origen a una conducta ética.

El análisis de estos casos es suficiente para demostrar que detrás de muchos desenlaces trágicos, se oculta una claudicación ética individual, un comportamiento organizacional vicioso, o quizás como ocurre frecuentemente, una combinación de ambos.

Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

".....Si gente cuidadosa y experimentada detecta conductas incorrectas y simplemente mira hacia otro lado para proteger sus propios intereses sin hacer ningún intento para corregir la situación, ellos mismos se vuelven parte del problema. Esta misma gente se convierte en parte del cancer generalizado que arruina lo que alguna vez fueron organizaciones productivas y las condena a la autodestrucción en el largo plazo. Ningún empleado razonable arruinaría deliberadamente su posición y medio de vida, pero eso es exactamente lo que les ocurre en el largo plazo a los que eligen la obediencia ciega..... La solución a este problema pasa por la adopción de principios que descansan en tres elementos fundamentales: responsabilidad (moral), autoridad, y responsabilidad exigible (accountability)..... Habrá siempre pequeños bolsones de resistencia al cambio en una organización, pero éstos pueden ser generalmente identificados y vencidos por la persuasión.....El simple hecho es que a los empleados les agrada ser tratados como seres humanos y que se confíe en ellos para que contribuyan con sus talentos individuales a la organización, sin que la gerencia se atribuya todo el crédito por los éxitos y culpe en cambio a los empleados por los fracasos.....“

Ing. Roger Boisjoly

Catástrofes de ingeniería en el camino hacia la integridad estructural

Engineering ethics is attracting increasing interest in engineering universities. A National Science Foundation project aims to develop material for introducing ethical issues into required undergraduate engineering courses. The increasing concern for the value dimension of engineering is, at least in part, a result of the attention that the media has given to cases such as the Challenger disaster, the Kansas City Hyatt-Regency Hotel walkways collapse, and the Exxon oil spill. A new discipline, engineering ethics, is emerging. The problem presented by this development is that most engineering professors are not prepared to introduce literature in engineering ethics into their classrooms. They are most comfortable with quantitative concepts and often do not believe they are qualified to lead class discussions on ethics. Many engineering faculty members do not think that they have the time in an already overcrowded syllabus to introduce discussions on professional ethics, or the time in their own schedules to prepare the necessary material.

Texas A&M University, USA

<http://ethics.tamu.edu/ethicscasestudies.htm>