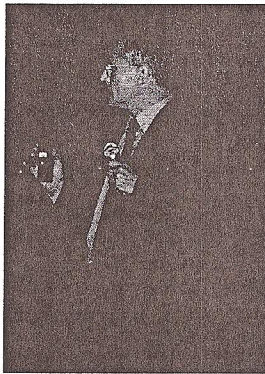


Aspectos estructurales del hundimiento del "Titanic"

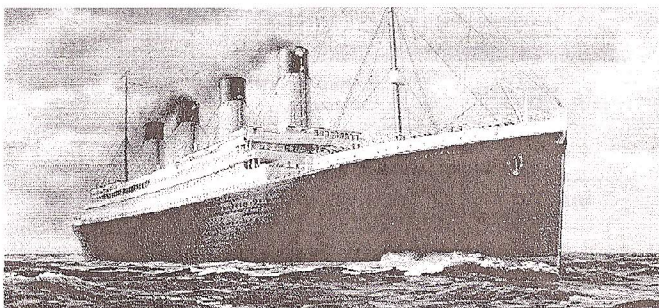


Ignacio Diez de Ulzurrun,
Dr. Ingeniero Naval
Profesor Titular de
Resistencia de Materiales
(Dpto. de Arquitectura y
Construcción Navales)
de la E. T. S. de Ingenieros
Navales, Madrid.

(Continuación del número anterior)

Introducción

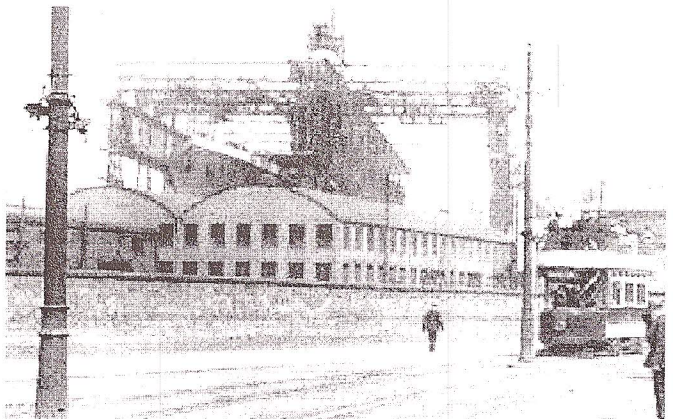
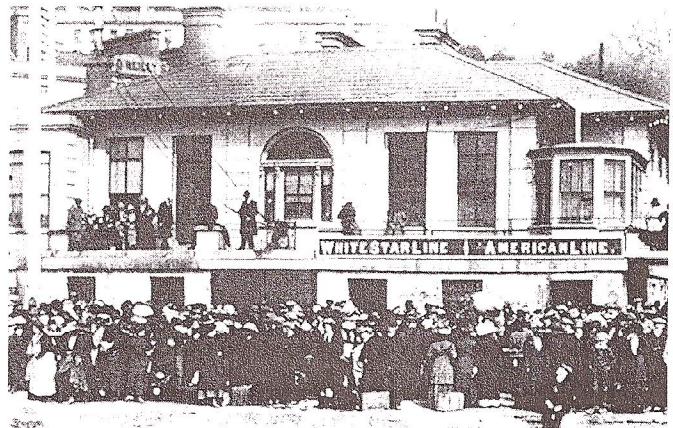
En este artículo se desarrolla el tercer trabajo presentado en la "Sesión Técnica sobre el Titanic", organizada por el Rectorado de la Universidad Politécnica de Madrid - E. T. S. I. NAVALES y celebrada el 24/3/98 en el Salón de Actos de la E. T. S. I. C.



Antecedentes. La construcción del Titanic

La puesta de quilla del Titanic tuvo lugar el 31/3/1909, su botadura se celebró el 31/5/1911 y el armamento duró diez meses, quedando listo para las pruebas de mar el 2/5/1912.

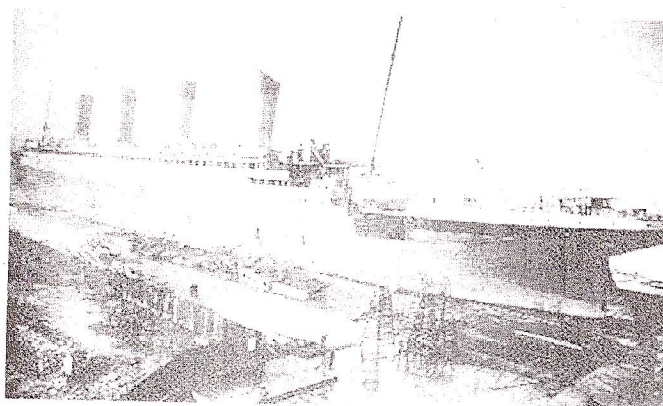
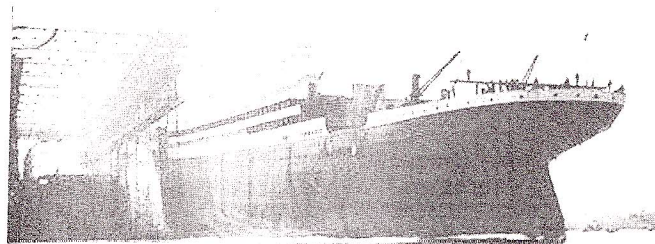
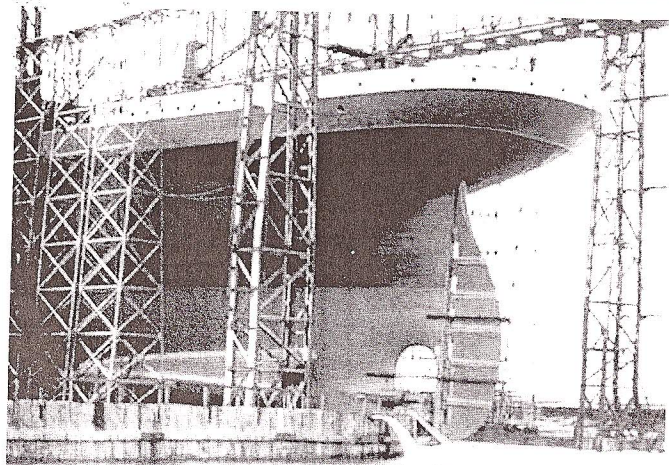
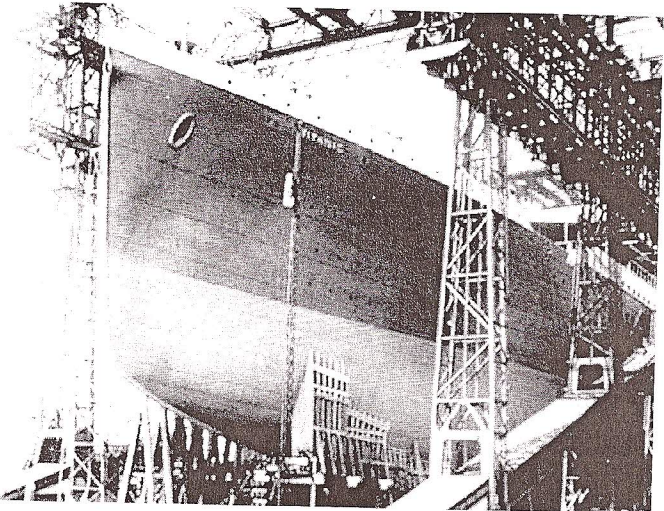
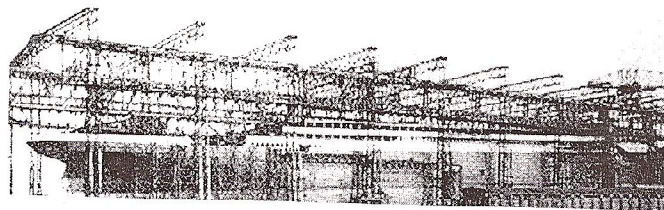
El constructor fue el astillero Harland & Wolff de Belfast-Irlanda, encargado de la construcción de todos los buques de la naviera The White Star Line propiedad de la compañía americana International Mercantile Marine de J. P. Morgan desde 1902 hasta 1916. El Titanic tenía el número de construcción 401 y en ella participaron cerca de catorce mil trabajadores durante casi tres años.



El Titanic fue el segundo de los tres trasatlánticos que en 1907 decidió la White Star Line construir con el fin de cubrir la ruta del Atlántico Norte entre Southampton y Nueva York en competencia con la Cunard's Line y su buque el Lusitania. Los otros dos fueron el Olympic y el Britannic, botados en 1910 y 1914, respectivamente, y casi idénticos al Titanic excepto en ciertos detalles pequeños. Ambos también sufrieron incidentes diversos.

El Olympic tuvo que ser reparado, interrumpiendo la construcción del Titanic, a consecuencia de un abordaje con el crucero británico Hawk, en 1918 fue alcanzado por un torpedo y en 1934 colisionó con el Nanturek, pero continuó en servicio hasta 1935. El Britannic, algo mayor que sus predecesores, fue requisado como hospital durante la guerra mundial y alcanzado por una mina en 1916, que le hundió en apenas una hora en aguas del mar Aegan. El Lusitania también naufragó en 1915 en pocos minutos a causa de un torpedo alemán.

En las figuras adjuntas se ven momentos del proceso constructivo y de armamento del Titanic.



La estructura del Titanic

En el cuadro y figura siguiente pueden verse algunas de sus características generales, ya citadas en otros trabajos presentados, así como su disposición general.

Características principales

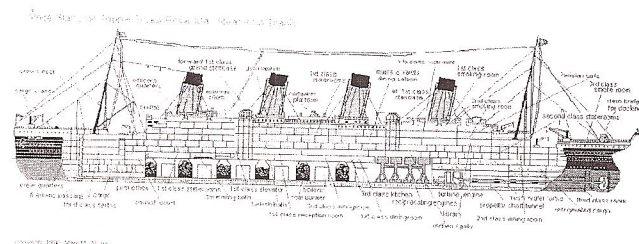
eslora escantillonado: 259 m

manga: 28,3 m

calado medio: 10,4 m

desplazamiento máx.: 47 295 T

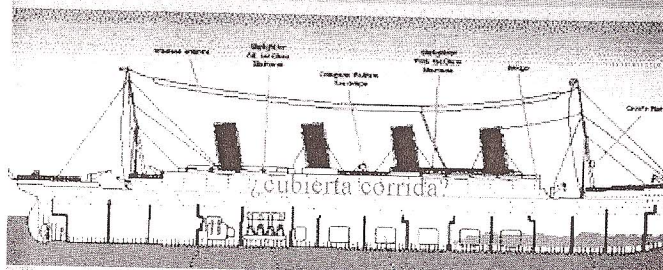
peso de acero: 19 800 T



Con una eslora total de 269 m, disponía de nueve cubiertas y quince mamparos transversales estancos, dando lugar a dieciséis compartimentos con puertas estancas de cierre automático. Tenía un doble fondo de 1,83 m de altura.

Es destacable el que no dispusiera de una cubierta de compartimentado, corrida de proa a popa como las cubiertas E, F y G, en donde terminasen todos los mamparos estancos. Circunstancia adversa en el proceso inicial de inundación gradual tras la colisión con el iceberg. En la siguiente sección por crujía puede apreciarse la zona inundada afectada por la colisión, sobre la que se tratará más adelante.

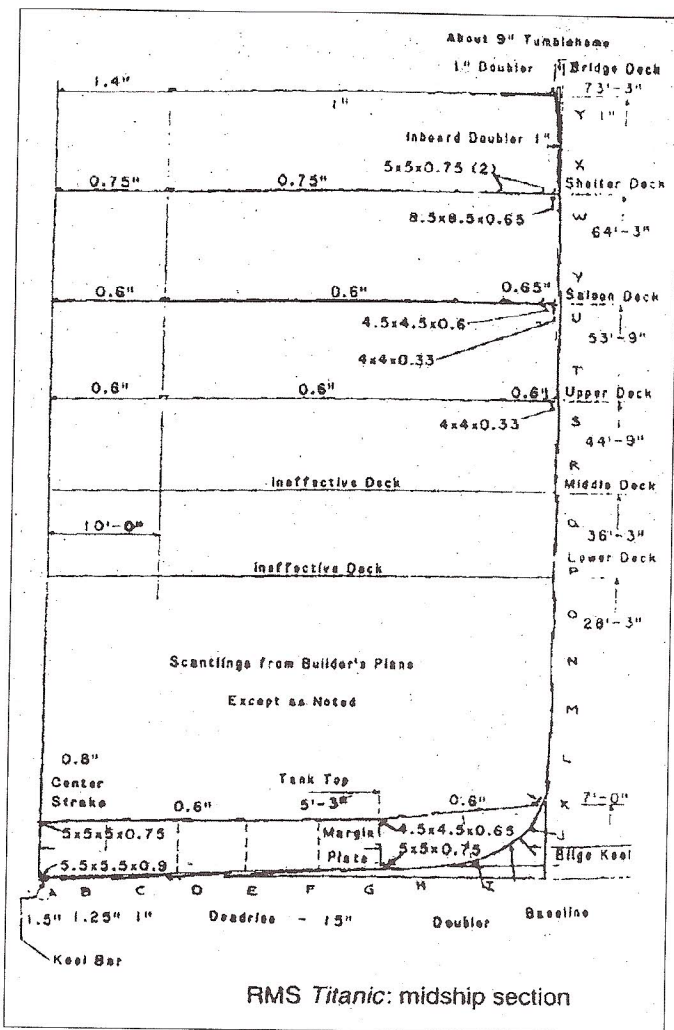
Perfil por crujía.



9 cubiertas - 15 mamparos transversales

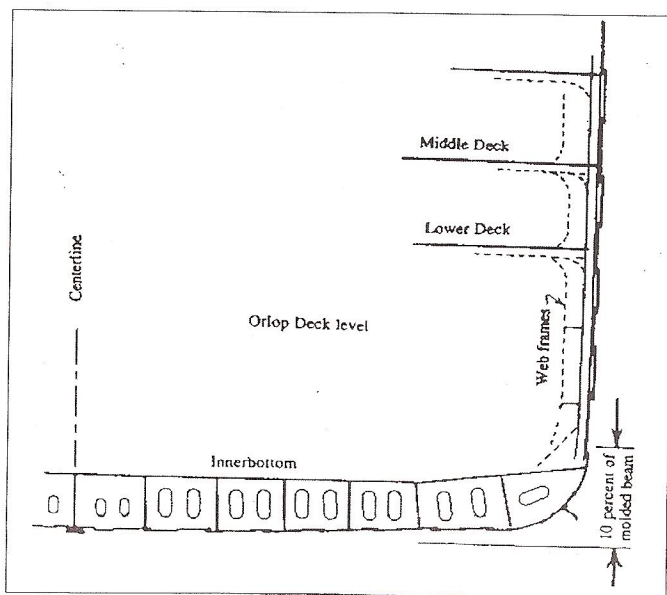
altura doble fondo: 1.83 m

En la cuaderna maestra, publicada por el constructor, puede verse que el espesor del forro exterior era de 25,4 mm, la cubierta tenía una brusa de 7,62 cm y la astilla muerta era de 380 mm.



RMS Titanic: midship section

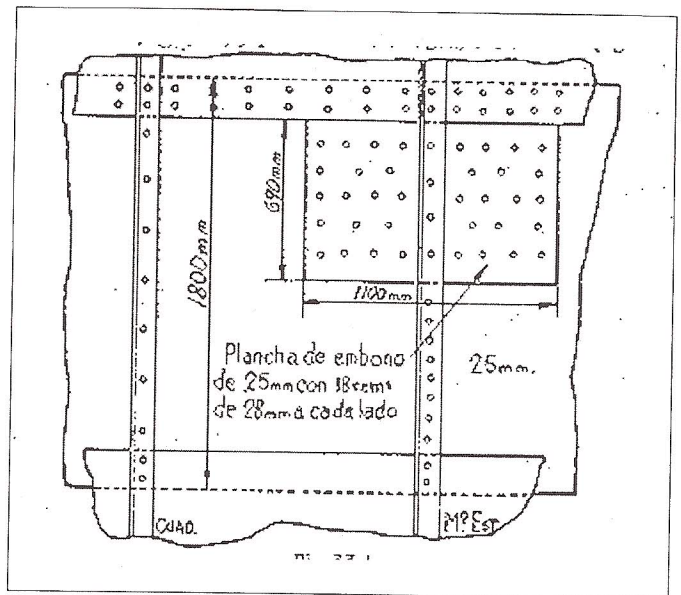
La estructura estaba integrada por el doble fondo: quilla vertical, vagras, varengas aligeradas y las planchas de margen; las bulárcamas en costados y los baos en cubiertas con sus correspondientes puntales. Elementos estructurales correspondientes a un sistema de estructura transversal como en la mayoría de los buques remachados de ese tiempo.



Las planchas dispuestas a solape y demás elementos estructurales del Titanic estaban unidas mediante remaches, con un total de más de tres millones. Los remaches del forro exterior tenían un diámetro aproximado de 28 mm.

La técnica de remachado era mediante punzonado hidráulico en frío, que crea microgrietas e impone tensiones residuales altas en los bordes de los agujeros en planchas. El primer buque totalmente soldado no aparece hasta casi una década después en 1921 en Inglaterra, el "Fullagar".

En la figura adjunta, de un crucero remachado de estructura similar, se muestra el detalle de la zona de unión de las planchas del costado del forro externo con los mamparos transversales, para lo que se añade una plancha de embono con remaches dispuestos a trespelillo. Areas de unión con baja eficiencia estructural al disminuir sensiblemente el área efectiva de la plancha por los agujeros realizados y, por tanto, puntos débiles de las costuras del forro.



La secuencia de los hechos se resume en el cuadro siguiente y se tratan a continuación desde el punto de vista estructural, sin entrar en otros aspectos de la inundación o reglamentarios que se presentan posteriormente en esta Sesión.

Secuencia de hechos

- colisión por estribor con el iceberg
- daños locales del forro exterior
- inundación a proa - trimado
- progresiva/acelera la inundación
- fractura por la maestra
- hundimiento
- impacto con el fondo marino

La colisión con el iceberg tuvo lugar el domingo 14 de abril de 1912 a las 23:40 h, al cuarto día de navegación desde que zarpar de Southampton. Con la mar y el viento en calma, a una velocidad de 21,5 nudos - la velocidad alcanzada en pruebas, y la temperatura del agua de mar era de un grado bajo cero.

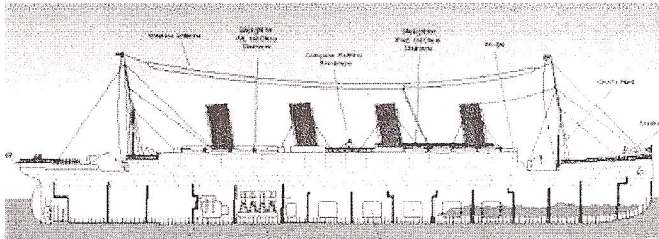
Acerca del tamaño del iceberg hay diferentes versiones, algunos lo sitúan entre 200.000 y 300.000 T y otros hasta en 500.000 T, pero indudablemente era de gran volumen y especialmente en la parte sumergida.

El daño principal se produce en el costado de estribor a proa, por encima y por debajo de la línea de flotación, afectando desde la cubierta G hasta casi el pantoque.

1ª fase
La colisión.
mar en calma
47 295 T a 21,5 nudos
temperatura agua: -1°C
iceberg (más de 200 mil toneladas?)
impacto

La zona del costado de estribor afectada por la colisión y el rozamiento con el iceberg, es de unos 90 m de longitud en total. Parece que la inundación del pique de proa y el compartimento adyacente fue rápida, por lo que se cree sufrieron daños más importantes, aún no confirmados plenamente.

Si hay evidencia de un agujero a estribor por encima de la flotación, a la altura de la bodega de reserva de carbón próxima al cuarto de calderas nº 5, que si bien algunos atribuyen a una explosión previa o al choque con el fondo marino, parece se produjo en la colisión y se acrecentó con el impacto final.



Acerca de los efectos o daños provocados directamente por la colisión con el iceberg, como en otros muchos aspectos del suceso, **hay diferentes teorías.**

Unos defienden que se produjo un gran desgarro longitudinal del forro externo del costado de estribor de longitud próxima a los 90 m, que no se produjo ya que la inundación hubiera sido cuestión de minutos en vez de horas, en concreto unas dos horas y cuarenta minutos.

Otros afirman que existió una explosión, espontánea o intencionada, afectando a babor y a estribor por la zona de la bodega de reserva de carbón aludida y próxima al agujero también mencionado, que parece tampoco se produjo ya que hay estructuras secundarias (escaleras) cercanas intactas.

También existe controversia sobre daños que en realidad se produjeron en el choque final con el fondo marino y se atribuyen a la colisión, o bien son producto de ambos.

Con los datos y conocimientos actuales, puede afirmarse que **los efectos más probables como consecuencia directa de la colisión con el iceberg**, fueron: abolladuras y fisuras locales en las planchas frágiles del costado en contacto, por encima y debajo de la flotación; el fallo de los remaches, dañados en sus cabezas, altamente solicitados por el impacto y también fragilizados por la baja temperatura; así como posiblemente una propagación de grietas iniciadas en las planchas en los contornos de los agujeros de remaches, a causa de las microgrietas y de las altas tensiones residuales inducidas en el proceso de punzonado en frío, como ya se ha comentado.

Daños locales de relativa poca importancia, pero que en definitiva conducen a una lenta y progresiva inundación, en un principio, a proa y a través de costuras, remaches y fisuras del forro exterior.

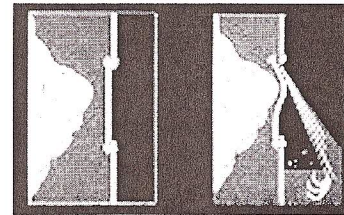
La abertura total que se produce en el casco, de acuerdo a estimaciones basadas en el tiempo de inundación, no era superior a 1,2 m².

Efectos de la colisión.

- abolladuras, fisuras en planchas**
- + fallo de remaches y costuras**
- + propagación grietas**

daños locales

lenta inundación a través de costuras y fisuras



Como en otros aspectos del suceso, vemos que en la colisión con el iceberg se dieron un cúmulo de circunstancias adversas, que explican suficientemente lo ocurrido desde el punto de vista estructural que aquí se desarrolla.

Circunstancias que confluyen.

- Altas solicitaciones**
- presión hidrostática**
- baja temperatura**
- presión del impacto**
- tensiones residuales remachado**

Composición/propiedades del acero

Por un lado, las altas solicitaciones procedentes del tremendo impacto, de la baja temperatura y de la presión hidrostática. Aparte de las tensiones residuales y microgrietas creadas en el proceso de remachado en las planchas.

Y por otro, la propia composición del acero de la estructura, que se trata a continuación. Acero además ya previamente afectado localmente por un fuego de tres días al zarpar de Southampton, en la bodega de carbón de reserva nº 10 próxima a los cuartos de calderas nº 5 y 6, y que afecta al mamparo nº 11. El fuego se extinguió justo el día anterior de la colisión con el iceberg y pudo restarle ductilidad en esa zona, coincidente con la de daños más importantes como se verá más adelante.

El acero de la estructura del Titanic, era procedente de D. Colville & Co., Motherwell Works, el suministrador habitual del astillero Harland & Wolff, y que incluso llegó a adquirir unos años después.

Comparando los datos relativos a la composición del acero del Titanic (hay diferencias muy significativas de acuerdo a las distintas fuentes consultadas) con la de uno actual de alta resistencia y baja aleación tipo AH36 de construcción naval, puede destacarse que tenía un alto contenido de azufre - 0,048%-, así como de fósforo - 0,036%- y bajo de agentes desoxidantes como el aluminio - 0,005%- y el silicio - 0,11%. La relación Mn:S era baja.

Composición que corresponde a la de un acero dulce semi-calmado con oxígeno residual y alta porosidad, propio de la época. Su bajo contenido en nitrógeno - 0,004%- nos indica que no era del tipo Bessemer. Su límite de fluencia era de cerca de 2.000 Kg/cm² y el de rotura se encuentra próximo a los 4.200 Kg/cm² con una elongación del 30%. En un acero AH36 el límite de fluencia mínimo garantizado se sitúa en los 3.350 Kg/cm² y el último entre los 4.800-6.100 Kg/cm² con una elongación del 20%.

	% C	% Si	% Mn	% S	% P	% Al	% N	% Cr	% Mo	% Ni
Titanic	0,15	0,11	0,68	0,048	0,036	< 0,005	0,004	0,008	< 0,01	0,019
AH36	< 0,20	0,1-0,15	0,9-1,6	< 0,04	< 0,04	0,02-0,06	-	< 0,20	< 0,08	< 0,40

(Fuente: Marine Technology, CANMET Laboratories, Ottawa, 1992)

En la micrografía correspondiente al acero de la estructura del Titanic se aprecia la alta direccionalidad de las inclusiones de sulfuro de manganeso presentes, que actúan como vías para la propagación de grietas. También puede apreciarse el contorno poco definido de la estructura de los granos frente a la estructura más fina de un acero actual de alta resistencia y baja aleación que frena la propagación, y con pequeñas inclusiones precipitadas en los granos que refuerzan el material.

Comparación aceros Micrografías.

Titanic



estructura de grano
inclusiones de sulfuro
acero semi-calmado

HSLA

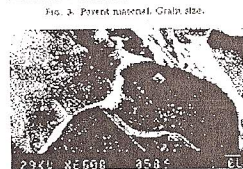
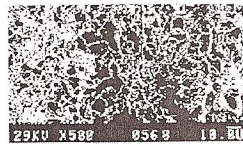


Fig. 4. Fases metalúrgicas. Precipitados.

En conclusión, puede afirmarse que el acero del Titanic era un acero dulce con alta temperatura de transición de dúctil a frágil y por tanto, proclive a la fragilización, especialmente en condiciones de baja temperatura y por impacto, como se dieron.

Sin embargo, no puede decirse que fuera un acero defectuoso. Era entre los mejores disponibles en la época (1909-1911) y similar a uno de rango inferior de los actualmente utilizados. Simplemente no estaba preparado o no era el adecuado para la situación crítica que se produjo, especialmente en cuanto a su fragilidad, aspecto que no se consideraba en el diseño de entonces y dio lugar a múltiples fallos estructurales.

Fracturas frágiles, por otra parte ya conocidas desde finales del siglo anterior, especialmente con relación al acero Bessemer e invariablemente asociadas con la baja temperatura y con frecuencia con grietas radiadas desde los agujeros punzonados. La introducción posterior de la soldadura multiplicó este modo de fallo en buques a consecuencia de las tensiones residuales de origen térmico que impone el proceso.

Composición del acero. Implicaciones

vías para la propagación de grietas
alta temperatura de transición

**PROCLIVE FRAGILIZACIÓN
A BAJA TEMPERATURA**

**BAJA TENACIDAD
RESISTENCIA AL IMPACTO**

Finalmente puede añadirse que los buques gemelos del Titanic en los incidentes relacionados pusieron también de manifiesto este comportamiento frágil y su sensibilidad frente a los impactos.

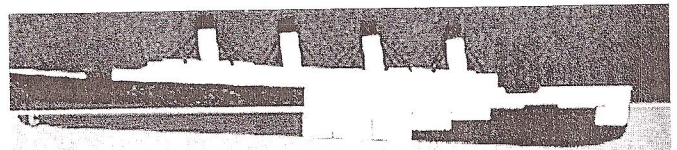
Continuando con la secuencia de los hechos, como efecto directo de la colisión se produce inicialmente una lenta inundación, en una hora aproximadamente el buque comienza a trimar por proa y progresa la inundación gradualmente, rebosando por encima de los mamparos, hasta alcanzar a los seis primeros compartimentos en algo más de dos horas y media. Entonces se inicia el hundimiento de la sección de proa arrastrando a la de popa, creando altas sollicitaciones en la maestra que producen finalmente la fractura del casco del tipo frágil y el hundimiento posterior.

2ª fase

Consecuencias de la colisión.

inundación lenta y gradual
trimado a proa (¿45°?)
progresa la inundación

flexión del buque
altas sollicitaciones
rotura frágil por la maestra

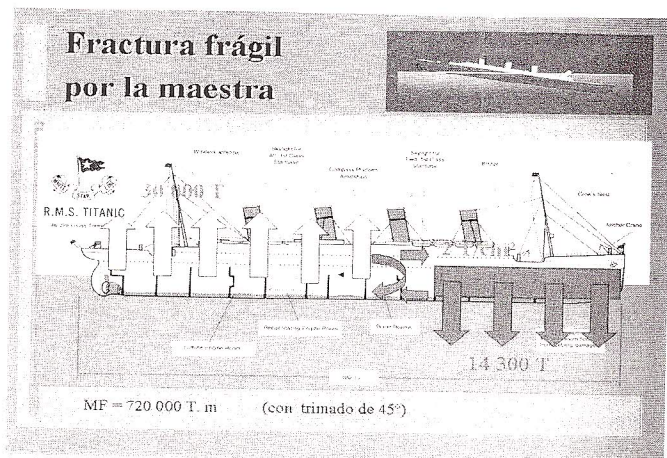


En el siguiente esquema de fuerzas simplificado, puede verse como el empuje positivo de la zona de popa intacta y aún estancia junto con el negativo de la zona de proa inundada, producen la flexión del buque sollicitando con valores superiores al límite de fluencia a la maestra, en fondo y cubierta especialmente. De esta manera, la estructura del doble fondo sometida a compresión y con menor módulo falla por pandeo, provocando que la zona de cubierta rompa frágilmente por las altas tracciones generadas. Los valores de la figura se han determinado con base a un trimado de 45°.

Recientemente se han realizado análisis con la ayuda del ordenador mediante el método de los elementos finitos aplicado a un modelo

tridimensional de la estructura del Titanic, que confirman este comportamiento estructural.

Por otro lado, el gran ruido que se produjo al partirse, de acuerdo a los testimonios, refuerzan el que la fractura frágil fuera el modo de fallo de la estructura, que ocurre rápidamente sin deformación plástica previa.



Así pues, el buque se fractura cerca de la maestra, la sección de proa ya separada se hunde y a continuación, tras un último saludo, le sigue la de popa, colapsando a diferentes profundidades en los compartimentos aún llenos de aire por el súbito desequilibrio de presiones con la externa del agua.

Progresas la inundación. Colapso total.

Elevadas tensiones en la maestra
fondo a compresión - PANDEO doble fondo
cubiertas muy traccionadas

ROTURA FRÁGIL POR LA MAESTRA

HUNDIMIENTO proa-popa

Finalmente, después del hundimiento ocurre el choque con el fondo marino que origina nuevos daños estructurales o acrecienta los ya sufridos durante el impacto y hundimiento.

3ª fase CAÍDA AL FONDO MARINO

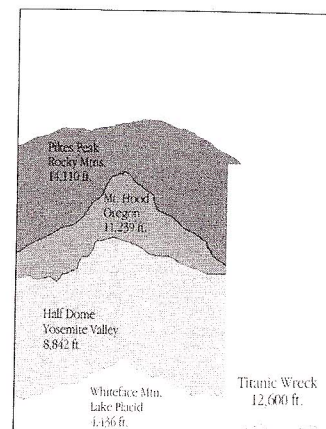
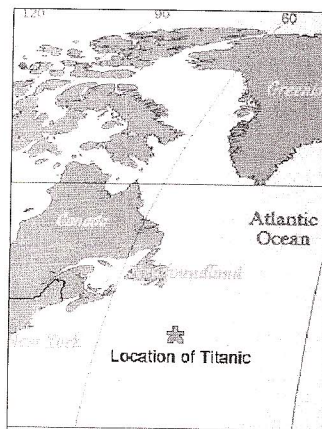
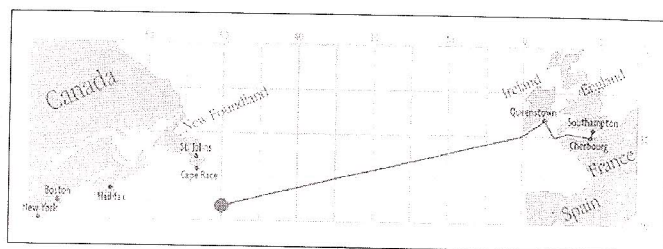
profundidad de agua: 3 840 m
inclinado - blando - de sedimentos

proa separada de popa: 550 - 600 m
nuevos daños estructurales

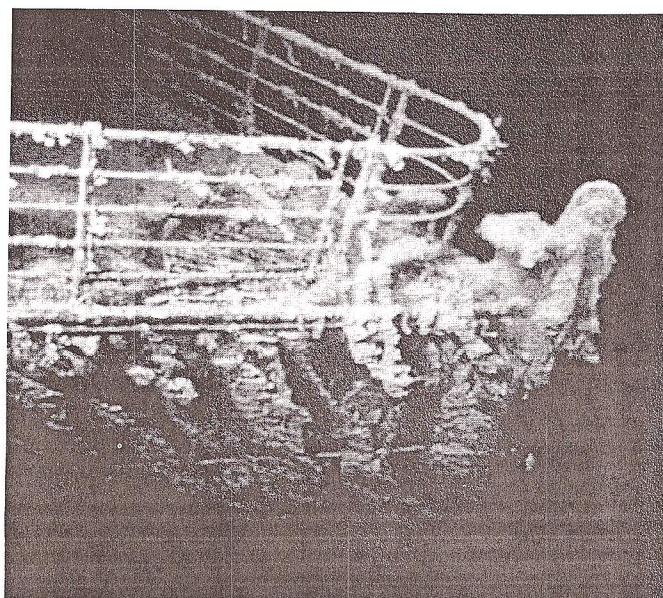
La velocidad del impacto con el lecho oceánico, inclinado y blando de sedimentos, se estima entre los 15 y 20 nudos.

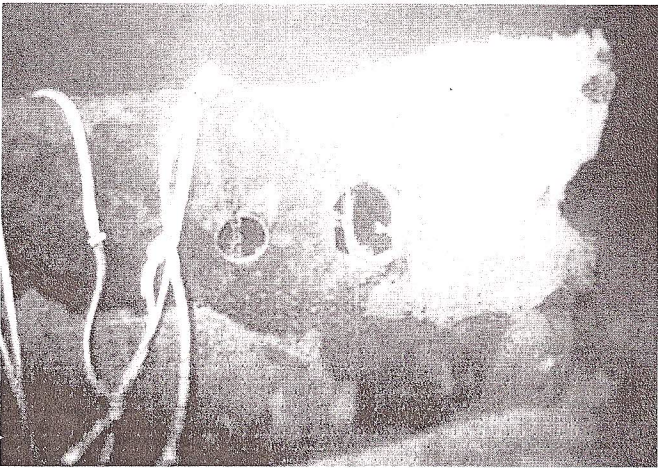
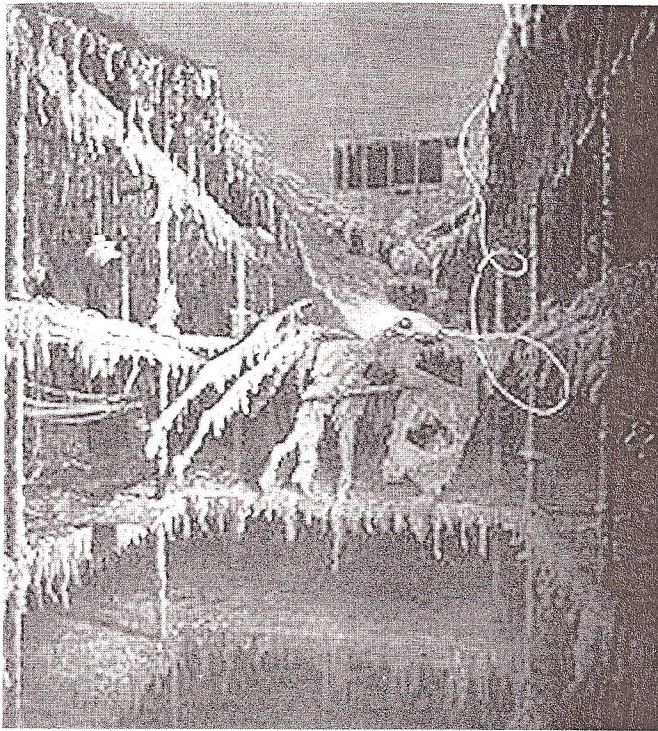
Desde el descubrimiento el 1/9/1985 de los restos del naufragio del Titanic después de 73 años, por la expedición franco-americana liderada por el Dr. R. Ballard del W. H. Oceanographic Institute de Massachusetts a bordo del buque de exploración Knorr y con la ayuda del artefacto Argo, en el Atlántico Norte (latitud 41° 43' N - longitud 49° 56' O) a una profundidad de agua de 3.840 m, se han realizado diferentes expediciones con la ayuda de sumergibles y artefactos de control remoto equipados con sónar, magnetómetro y cámaras fotográficas y de vídeo de alta resolución; así como reconstrucciones con base en ellas, que se presentan a continuación.

Entre las siete expediciones hasta ahora realizadas pueden citarse otra del Dr. Ballard en 1986 a bordo del Atlantis II con el sumergible Alvin, la del sumergible ruso MIR en 1991 y la del Nautilo de IFREMER en el 96.



La proa y la popa se encuentran separadas entre 550 y 600 m, y entre ambas hay diferentes trozos del casco y múltiples objetos. La proa apunta hacia Nueva York.

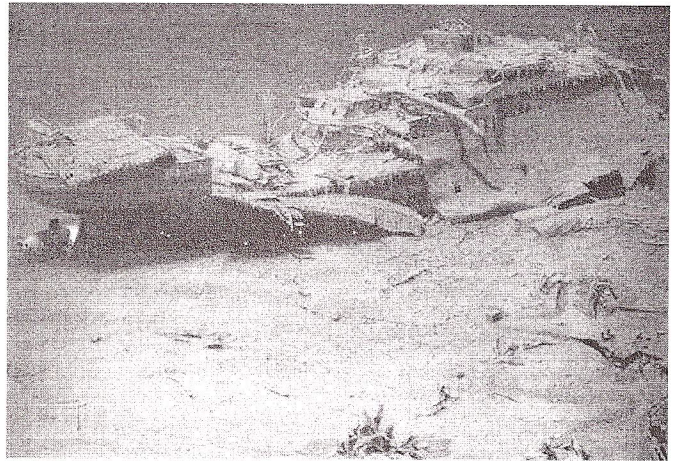
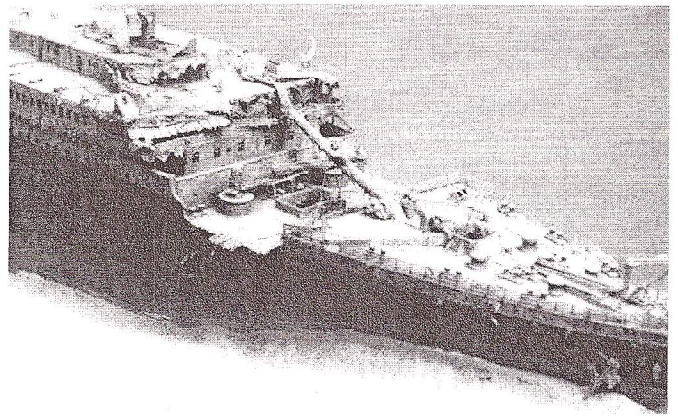
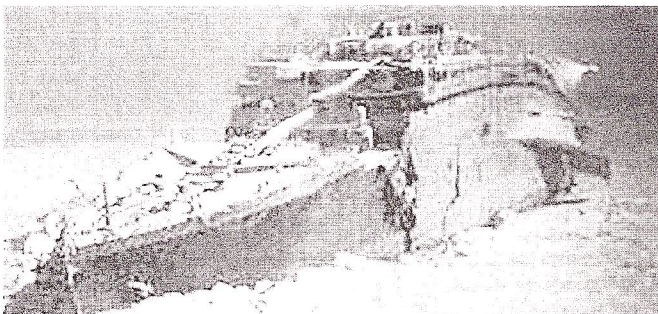




La sección de proa al descubierto está relativamente en buen estado, con nuevos daños en la roda y a babor que se producen en el choque con el lecho marino. Aparte del ya citado agujero de estribor, pueden verse el pandeo de las planchas del costado y la flexión sufridas en las cubiertas altas. Los daños se concentran en la zona en que la inercia de la sección sufre un cambio brusco.

Por el contrario, la sección de popa se encuentra en un estado absolutamente caótico, torsionada y colapsada, y con una parte central completamente desintegrada.

La zona de proa a estribor por debajo de la flotación, supuestamente más afectada por la colisión, se encuentra enterrada en el fondo,



si bien últimamente se están realizando nuevas investigaciones con sónar que parece determinan unos daños o fisuras longitudinales locales y discontinuas de relativa poca importancia, tal como se ha expuesto.

La mayor fisura de las seis localizadas no supera los once metros y se localiza entre los cuartos de calderas nº 5 y nº 6 cruzando el mamparo estanco correspondiente. El resto no supera los tres metros de longitud. Todas son muy estrechas.

Fuentes

- Marine Technology, 1993, 1996.
- Red Internet.
- "Cálculo de estructura de buques", R. Martín Domínguez, E.T.S.I.N., 1969.
- "Brittle behaviour of engineering structures", Earl R. Packer, J. Wiley & Sons, 1957.
- Laboratorio de Soldadura, U. P. M. - E.T.S.I. Navales.
- Videoteca. Filmoteca.

