

# El hundimiento del Titanic visto a través de la ciencia y la ingeniería de los materiales

Guillermo Salas,<sup>1</sup> Ma. Eugenia Noguez,<sup>1</sup> José Ramírez,<sup>1</sup>  
Teresita Robert<sup>1</sup> y Manuel Pérez-Figueroa<sup>2</sup>

## Abstract

The materials science and engineering approach, based on the four interrelated traditional metallurgical working aspects: structure, properties, performance and processing, is applied to the results of the metallurgical analysis of Titanic's hull steel, rescued from the bottom of the sea few years ago, in order to illustrate the foundations of this discipline. Other objectives are: to show how a metallurgical or a materials professional faces a classical problem to solve it, to use it as a case study for students on the field of materials and to give an extra element to understand the Titanic's sink.

## Introducción

A las 11:40 de la noche del 14 de abril de 1912, el Titanic chocó con un iceberg; dos horas cuarenta minutos más tarde, a las 2:20 am del día 15, se hundió casi 4 km hasta el fondo del océano Atlántico, arrastrando con él la vida de 1517 personas de más de 20 países. Desde entonces, y más ahora que la película del mismo nombre lo ubicó nuevamente en primer plano, se han discutido largamente las circunstancias que provocaron la catástrofe con una idea en mente: ¿Quién o quienes fueron los culpables del hundimiento del Titanic? No había podido tomarse en cuenta un factor importante: el material usado para construir el casco de la nave, hasta que una de las expediciones submarinas al naufragio, la realizada el 15 de agosto de 1996, rescató acero del casco. La evaluación metalúrgica se realizó en la Universidad de Missouri, en Rolla, los resultados fueron publicados (Felkins, 1998) y retomados aquí.

Así, se pretende examinarlos y discutirlos con la mentalidad, visión y conocimientos de un ingeniero metalúrgico (ahora un especialista en materiales). Primero para mostrar la manera en que este profesional enfrenta un problema clásico; segundo, para usarlo como un caso de estudio típico para estudiantes de materiales y, tercero, para que se aprecien más claramente las causas del hundimiento del Titanic.

Al tiempo y como principal objetivo, se da un magnífico ejemplo de lo que ha constituido el fundamento de la nueva disciplina de la ciencia e ingeniería de los materiales

(Cosmat, 1975). Esto se hace al aplicar los cuatro aspectos básicos del examen metalúrgico usados por más de un siglo: la estructura (que se apoya en la composición y determina las propiedades y el comportamiento); el procesamiento (que involucra la obtención del material); las propiedades (rasgos que hacen interesante o útil a un material) y el comportamiento (o funcionamiento, viene a ser la medida de utilización de un material en condiciones de aplicación) (figura 1). Para mayor comprensión, a lo largo del texto se definirán, de manera concreta, algunos términos.

## Circunstancias del Titanic y su hundimiento

Cuando el Titanic fue botado se le calificó como insumergible. Tenía un doble casco formado por 16 compartimientos a prueba de agua; si cuatro de ellos se llenaban no se afectaba su línea de flotación (Britannic Encyclopaedia, 1997). El Titanic fue el hermano *sandwich* de otros dos: el mayor, el Olympic, botado el 20 de octubre de 1910 y el Britannic, de vida breve, que se terminó de construir cuando ya había comenzado la primera guerra mundial (1915). Cuando el Olympic realizaba su quinto viaje, en 1911, chocó contra el crucero British, su casco resultó dañado y tuvo que ser reparado en los astilleros irlandeses donde nacieron los tres hermanos; en 1934 volvió a chocar, esta vez contra un barco-faro, el Nantucket, al cual partió en dos y hundió. En 1935, después de realizar 500 travesías transatlánticas, fue retirado y en 1937, desmantelado. Se había planeado que el Britannic funcionara como barco de lujo y con la experiencia previa del Titanic, las láminas de metal del doble fondo se

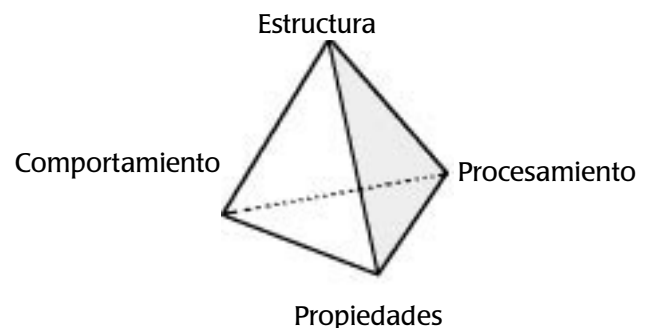


Figura 1. Los cuatro elementos de la ciencia e ingeniería de materiales ubicadas en los vértices de un tetraedro para indicar su íntima interrelación.

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Química UNAM.

<sup>2</sup> Alumno de la carrera de Ingeniería Química Metalúrgica, Facultad de Química, UNAM.

Recibido: 27 de noviembre de 1998; Aceptado: 15 de marzo de 1999.

hicieron más gruesas y los compartimientos a prueba de agua se dividieron para reducir su tamaño y con él, el riesgo de hundimiento. Al comenzar la Primera Guerra Mundial, antes de ser botado, la marina británica lo requisó y modificó como buque-hospital con 2034 camas; sus lujosos camarotes fueron transformados en salas de operaciones y dormitorios. En 1916 chocó con una mina y naufragó, a pesar de las modificaciones en el diseño, porque las escotillas estaban abiertas y se llenó de agua rápidamente; se hundió en una tercera parte del tiempo en que lo hizo el Titanic. Los tres barcos eran los más largos jamás construidos (269.1 m), pero el Titanic fue el más famoso, desde antes de su viaje inaugural, por su primera clase extremadamente lujosa. Eran barcos de vapor que utilizaban carbón como combustible (el Olympic fue el primer transatlántico que se convirtió para usar diesel en vez de carbón). No eran tan veloces como los más rápidos de entonces (el Lusitania y el Mauritania, los competidores que cubrían la misma ruta) pues pesaban, aproximadamente, 40% más (46 mil toneladas en total). Los cascos de los tres barcos estaban formados con placas fabricadas con –lo que se consideraba– el mejor acero de su época, remachadas con hierro forjado, tecnología común en la construcción de barcos al principio del siglo.

El Titanic zarpó la mañana del 10 de abril de 1912; la noche de la tragedia era la quinta del viaje. No había luna y por lo tanto poca visibilidad; el cielo estaba estrellado y el océano muy quieto y frío ( $-2^{\circ}\text{C}$ ). Desde hacía casi tres días se había estado informando por radio sobre la presencia de un campo de icebergs, que se calculó medía 120 km de largo y 20 km de ancho, en la ruta de los transatlánticos, cosa común para la temporada. Durante el trayecto, el Titanic viró en dos ocasiones hacia el sur tratando de evitarlo. El barco viajaba de este a oeste a 41 km/h, su velocidad máxima, muy rápido para las condiciones de hielo y de visibilidad. El último reporte, que no quiso recibir el radiotelefonista del Titanic por sobrecarga de trabajo superfluo,

indicaba la posición del iceberg contra el que chocó el barco. La masa de hielo estaba exactamente frente al Titanic cuando los vigías lo avistaron; notificaron de inmediato al puente desde donde se ordenó virar a estribor (izquierda) y poner en reversa la marcha de las máquinas. Todo tardó 40 segundos. Se estima que el iceberg viajaba de norte a sur a una velocidad de 4 km/h y que pesaba entre 150 mil y 300 mil toneladas. El Titanic casi no había logrado disminuir su velocidad al momento de la colisión; iba a 40 km/h. El impacto se produjo en el lado derecho, cuatro metros arriba de la quilla (pero debajo de la línea de flotación) y rompió entre 90 y 100 metros longitudinales de casco, como una cuchillada, provocando una abertura total (sumando la superficie de todos los agujeros) entre 1.11 y 1.17 m<sup>2</sup>, lo que inundó seis compartimientos: la bodega de proa, los números 1, 2 y 3 de carga y los cuartos de calderas 5 y 6 (Lord, 1955). Como éstos eran de la proa fue por donde comenzó a hundirse el Titanic. En algún momento, con la entrada de agua, la popa comenzó a levantarse en el aire y los esfuerzos de flexión generados entre el peso del agua en la proa y el de la estructura con el peso de los gigantescos motores en la popa, partieron en dos al barco. El 1 de septiembre de 1985 se localizó al Titanic dividido en dos partes, separadas por 600 metros.

Con la recuperación y análisis de un pedazo de acero del barco, 84 años después del famoso suceso, es posible añadir otra pieza al rompecabezas de la catástrofe del Titanic. Esto se hace al mostrar cómo enfrenta un profesional en materiales el proceso de examen del acero del navío para entender cómo se comportó al impactarse contra el iceberg. Existen cuatro parámetros de análisis que se relacionan íntimamente: 1) la estructura, 2) el procesamiento, 3) las propiedades y 4) el comportamiento (National Research Council, 1989) (figura 1); esto es, de manera breve y simple, el proceso de fabricación determina la estructura y cada estructura presenta diferentes propiedades que hacen que el material se comporte de una forma específica. Esta última idea puede verse desde múltiples ángulos (por eso el tetraedro), *Vgr.* si se necesita un material para que se comporte de una manera dada, se buscan las estructuras que tendrán las propiedades que determinarán el comportamiento buscado y así se fijará el proceso que permitirá obtener esas estructuras.

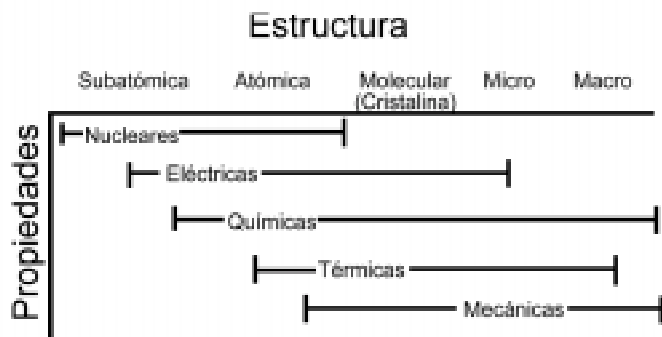
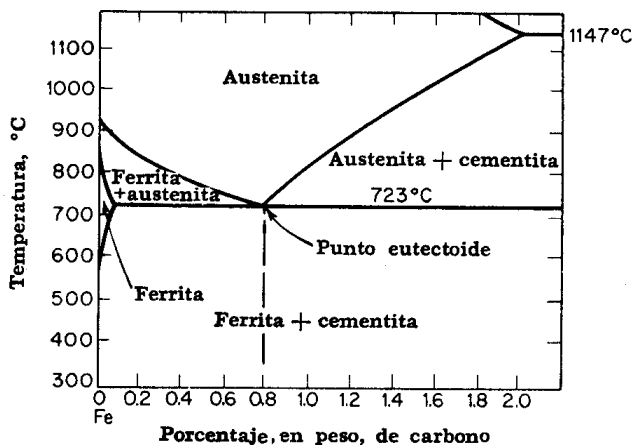


Figura 2. Permite visualizar los diferentes niveles de estructura de un material y relacionarlos con sus propiedades.

### Los cuatro vértices del tetraedro

#### 1. La estructura

Existen distintos niveles de estructura que controlan diferentes clases de propiedades (figura 2), siempre que no existan graves defectos en la macroestructura (como poros y grietas). La microestructura controla principalmente las propiedades mecánicas (las más usadas por el ingeniero metalúrgico); la estructura cristalina influye también, principalmente las dis-

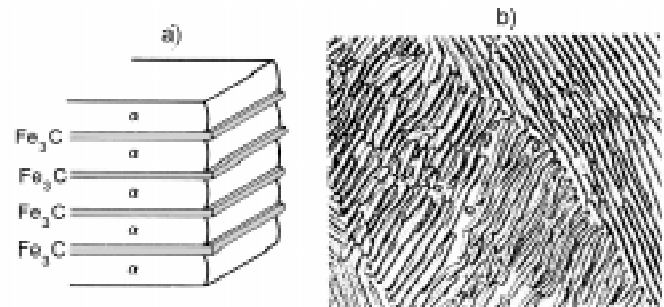


**Figura 3.** Sección para aceros del diagrama de equilibrio Fe-C, para conocer y manejar sus fases y microestructuras.

locaciones (su más importante defecto). Microestructura es la que se define sólo a nivel microscópico. Un ingeniero metalúrgico puede modificar la estructura de un metal o aleación sin modificar su composición química.

Las láminas del casco del Titanic eran de acero de bajo carbono, material típico para ese uso. El acero es una aleación de hierro con carbono (hasta 2%), que puede presentar otros elementos como aleantes o como impurezas. Un acero puede ser de bajo (hasta 0.3% de C), medio (de 0.3 a 0.6% de C) o alto carbono (mayor de 0.6% de C).

Cuando un metalúrgico recibe el material (en este caso el acero del casco del Titanic) con el objeto de interpretar su estructura procede a prepararlo para observarlo en el microscopio óptico, técnica que tiene sus orígenes en 1864, con Henry C. Sorby; en momentos subsecuentes se apoya en otras técnicas microscópicas: la indispensable es la electrónica de barrido y en casos específicos, la electrónica de transmisión. Como la estructura está ligada, en cierta forma, a la composición química, al tiempo envía al laboratorio químico una muestra para su análisis. La preparación del metal involucra cortar algunas muestras –dos para el caso del Titanic, una longitudinal y otra transversal a la cara de la lámina de acero, ya que pueden presentar diferencias debidas al proceso mecánico de fabricación–, lijarlas, pulirlas secuencialmente hasta dejarlas como un espejo, para finalmente “atacarlas” con diferentes reactivos, que depen-



**Figura 4.** a) Esquema que permite ver el acoplamiento de las láminas de fase ferrita (α) con las de la fase cementita (Fe<sub>3</sub>C) para formar el microconstituyente perlitita; b) Perlitita amplificada 2,000 veces con microscopía óptica.

den del metal o aleación; la diferente susceptibilidad química de cada fase al reactivo es lo que permite evidenciar la microestructura. La interpretación de la microestructura se apoya fundamentalmente en los diagramas de fases metalúrgicos al equilibrio, tanto binarios como ternarios. El diagrama para interpretar un acero sin aleación, como el del Titanic, es el de hierro-carbono (figura 3).

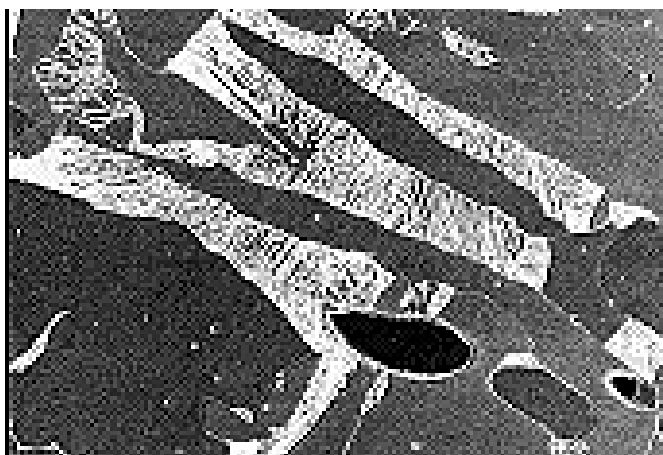
Para interpretarlo se observa qué fases y microestructuras existen al modificar la cantidad de carbono y la temperatura. Los aceros pueden tener dos fases a temperatura ambiente: el hierro, la llamada ferrita en el lenguaje metalúrgico, que es la fase de hierro –muy dúctil– con un porcentaje aproximado de 0.008% de carbono disuelto (una solución sólida) y la llamada cementita –por su alta dureza–, un carburo de hierro (Fe<sub>3</sub>C) que se clasifica como un compuesto intersticial. Estas dos fases son microestructuras *per se* y además, acopladas una junto a la otra en forma de láminas, crean otra microestructura conocida como perlitita (figura 4).

Las microestructuras de un acero de bajo carbono son la ferrita y la perlitita. La cantidad, el tamaño, la forma y la ubicación de las microestructuras presentes determinan las propiedades del material. El ingeniero metalúrgico regula los parámetros microestructurales controlando los métodos de fabricación; el tamaño de grano es uno de los parámetros más importantes a controlar.

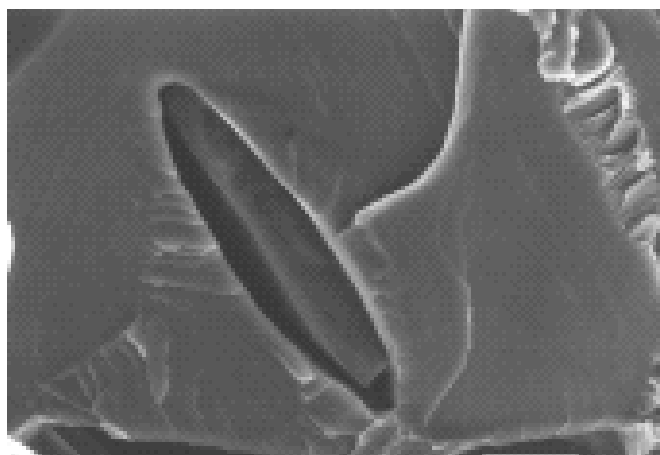
Los resultados del análisis químico se muestran en la tabla 1, en donde se confirma que el acero del Titanic era de bajo carbono; al mismo tiempo y a modo de comparación,

**Tabla 1.** Análisis químico de los aceros del Titanic y del ASTM A36.

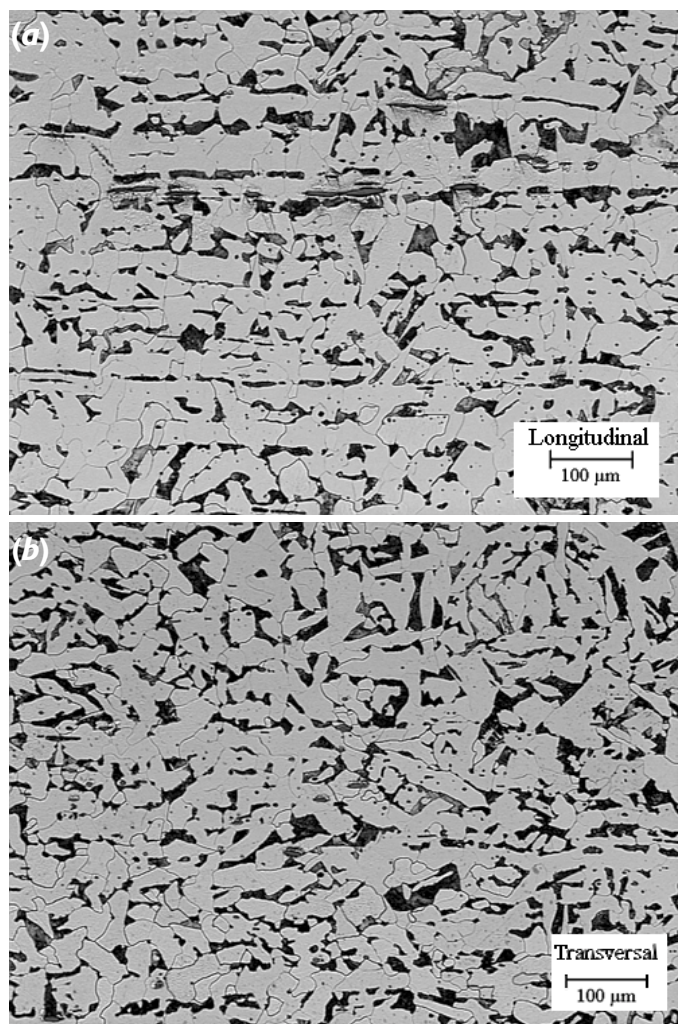
|                    | C    | Mn   | P     | S     | Si    | Cu    | O     | N      | Mn:S   |
|--------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Placas del Titanic | 0.21 | 0.47 | 0.045 | 0.069 | 0.017 | 0.024 | 0.013 | 0.0035 | 6.8:1  |
| ASTM A36           | 0.20 | 0.55 | 0.012 | 0.037 | 0.007 | 0.01  | 0.079 | 0.0032 | 14.9:1 |



Fotomicrografía 1. Microestructura del acero del Titanic.



Fotomicrografía 2. Partícula de MnS vista con SEM.



Fotomicrografía 3. a) Corte longitudinal y b) transversal.

se da la composición de un acero moderno del mismo tipo (ASTM A36), notándose que existe una relativa alta cantidad de fósforo, casi cuatro veces la del A36; una cantidad igual de nitrógeno; cerca de 2.5 veces la cantidad de silicio y una, también relativa, baja cantidad de oxígeno. Además, el contenido de azufre en el acero del Titanic es casi el doble del que contiene el acero moderno y su manganeso es menor en un 15%; así, la relación Mn:S es de 6.8:1 para el acero del Titanic y de 14.9:1 para el acero A36. El azufre y el manganeso producen partículas de MnS, que forman parte de la microestructura como inclusiones no metálicas. La fotomicrografía 1 se obtuvo del acero del Titanic con un microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés); las láminas blancas y negras son la perlita, las áreas grises son la ferrita y las dos estructuras elípticas más oscuras y pequeñas son partículas de MnS.

En la fotomicrografía 2, a mayor aumento, se observa una partícula de MnS en la superficie de una fractura del acero. Las partículas de MnS se identificaron químicamente usando EDS (*Energy Dispersive System*), instrumento acoplado al SEM.

La fotomicrografía 3a es la microestructura de la muestra longitudinal y la 3b, de la transversal. Se puede apreciar un “bando” (las microestructuras agrupadas en bandas debido a la interacción de los elementos presentes durante la solidificación del acero), así como colonias de perlita y partículas de MnS alargadas. La fotomicrografía 4 muestra la microestructura del acero moderno, A36. Nótese la diferencia en el tamaño de los microconstituyentes: los granos del acero del Titanic son 12.5 veces más grandes que los del A36.

Para el conocimiento de los porqués de la estructura se investigan –simulando teórica y experimentalmente– y se resuelven ingenierilmente los desafíos que se plantean en la práctica.

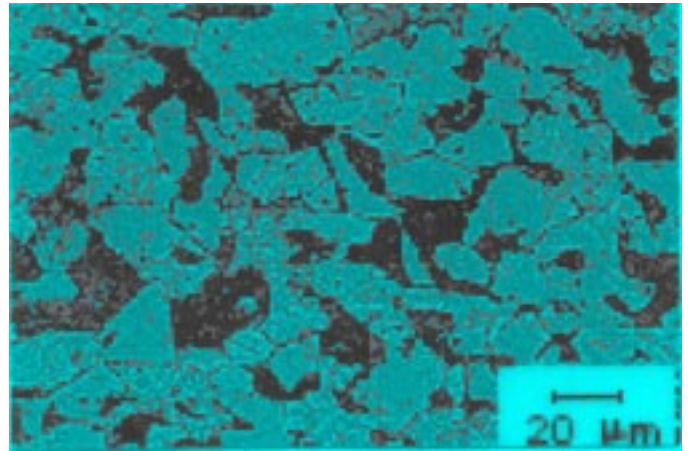


## 2. El procesamiento

Tradicionalmente se ha utilizado la palabra procesamiento como sinónimo de proceso de fabricación, por la adopción de la palabra inglesa *processing*. La clasificación de los procesos metalúrgicos es amplia (DeGarmo, 1979) y controversial, pero no es éste el lugar para discutirla; algunos ejemplos serán suficientes para ilustrar el tipo de procesos: 1) fundir un metal o aleación, ponerle elementos aleantes –o quitarle impurezas– y solidificarlo a diferentes velocidades modifica su estructura; 2) una aleación sólida, un acero, que se calienta hasta una temperatura predeterminada, se le mantiene ahí por un tiempo precalculado y se enfría a diferentes velocidades, permite obtener diferentes estructuras; 3) deformar un metal o aleación ya sea comprimiéndolo (como en el proceso de forja), traccionándolo, estirándolo, (como en el proceso de trefilado) o aplastándolo entre dos rodillos –pudiendo estar el metal frío o caliente– (proceso de laminación), también modifica la estructura. La responsabilidad del metalúrgico es controlar los parámetros del proceso para obtener la microestructura deseada en una aleación de composición constante (o modificando su composición). Otro ejemplo se da con el acero del Titanic, ya que es posible determinar cuáles fueron sus procesos de obtención y de manufactura con el análisis de sus microestructuras, su composición y los conocimientos básicos de los procesos usados a principios de siglo. Como antecedente, es necesario describir de dónde proviene el acero.

Para obtener acero se parte de un mineral de hierro, frecuentemente la variedad hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), el cual es reducido en un alto horno, con carbón mineral (coque), a una temperatura cercana a  $1600^\circ\text{C}$ ; al producto se le llama arrabio, un hierro con gran cantidad de carbono y de elementos residuales que vienen en el mineral (P, S, Si y Mn). El arrabio es sometido a un proceso de aceración que consiste en oxidarlo controladamente para eliminar el exceso de carbono y de algunos de los elementos residuales. Para finalizar el proceso de aceración, se agregan algunos materiales como el ferromanganeso, el ferrosilicio o el aluminio, principalmente para desoxidar, debido a que existe un exceso de oxígeno disuelto en el acero, producto de la operación de oxidación; es en este momento en que se pueden agregar elementos de aleación. Así, dependiendo del nivel de desoxidación, reflejado en la cantidad de oxígeno que queda en el acero y en una estructura más o menos porosa, se pueden obtener tres tipos de lingotes: 1) totalmente desoxidado (*killed*), 2) parcialmente desoxidado (*semikilled*) y sin desoxidar (*rimmed*). Los procesos de aceración existentes, al inicio del siglo, eran básicamente de dos tipos: 1) el convertidor Bessemer (figura 5a), inventado en 1856, y 2) el de hogar abierto (figura 5b), desarrollado en 1868.

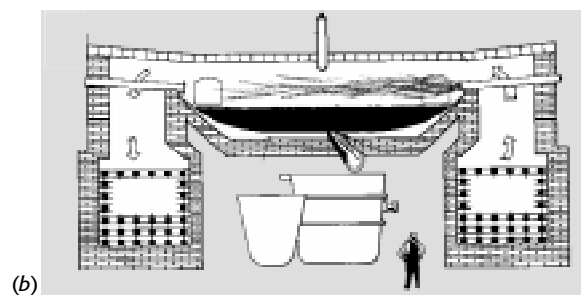
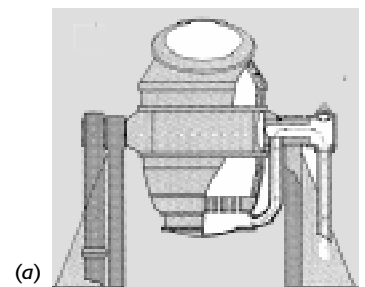
El proceso Bessemer hacía pasar, desde el fondo del



Fotomicrografía 4. Microestructura del acero A36.

horno, una corriente de aire a través del arrabio líquido; no era necesaria una fuente externa de calor para la producción del acero debido al calor generado por las reacciones exotérmicas, producidas entre el oxígeno del aire y el silicio, el manganeso y el carbono; se estima que funcionaba a una temperatura mayor de los  $1600^\circ\text{C}$ . Cabe hacer notar, por un lado, que el refractario usado cuando se desarrolló el proceso, era ácido (de sílice) y que de haberse usado uno básico (de calizas, magnesitas y dolomitas) hubiera reaccionado con el fósforo y el azufre –formando fosfatos, silicatos, etcétera– ayudando a su remoción como parte de la escoria, como se acostumbró a hacer posteriormente; por otro lado, que el hacer pasar una corriente de aire por el metal líquido favorecería que el acero tuviera, relativamente, mucho nitrógeno.

Figura 5. Los dos procesos de aceración principales que funcionaban cuando se construyó el Titanic:  
a) Bessemer y  
b) Hogar abierto.



**Tabla 2. Ensayo de tracción de los aceros del Titanic y del SAE 1020.**

|                           | Titanic  | SAE 1020 |
|---------------------------|----------|----------|
| Resistencia a la fluencia | 193.1MPa | 206.9MPa |
| Resistencia tensil        | 417.1MPa | 379.2MPa |
| Elongación                | 29%      | 26%      |
| Reducción de área         | 57.1%    | 50%      |

En el proceso de hogar abierto el arrabio fundido se calentaba y oxidaba al hacer pasar sobre su superficie una flama producida con una mezcla de combustible y de aire caliente; esto hacía que se alcanzaran altas temperaturas (estimadas entre 1500 y 1600°C) y se pudiera utilizar chatarra de hierro para diluir el acero y así cambiar su composición; el refractario del horno podía ser ácido o básico. Dos terceras partes del acero fabricado en el Reino Unido en esos años era producto de este horno con recubrimiento de refractario ácido (Davies, 1955).

El acero del Titanic tiene P y S en cantidades altas lo que indica que el horno en donde se fabricó estaba recubierto con un refractario ácido. La baja cantidad de nitrógeno es la clave para decir que el proceso usado fue el de hogar abierto. Las cantidades de O y Si indican que los lingotes de acero, de los cuales se laminaron las placas del casco, estaban parcialmente desoxidados (*semikilled*).

Como se mencionó en la sección de la estructura, las microestructuras están alargadas –aún las partículas de MnS– (fotomicrografía 3a) lo que indica que el material fue sometido a un proceso de laminación.

### 3. Las propiedades

Las propiedades están íntimamente ligadas a la estructura (figura 2); por ejemplo, las mecánicas a la microestructura y a la cristalina, sobre todo a sus defectos (principalmente las dislocaciones); los átomos de la mayoría de los metales solidifican formando celdas cristalinas cúbicas o hexagonales. Hay otro tipo de propiedades que dependen de la estructura más íntima, como son las eléctricas, las magnéticas, las ópticas y las térmicas. Existen diferentes ensayos o pruebas normalizadas que permiten determinar las propiedades de un material. Estas pruebas deben representar lo más fielmente posible todo tipo de condiciones que la pieza deberá soportar cuando esté funcionando (a qué temperatura, la dirección de la aplicación de los esfuerzos y la velocidad a la que se aplican, la agresividad del medio ambiente de trabajo, entre otros), para saber cómo se comportará en uso; también indican el funcionamiento del material durante el proceso de fabricación (qué tan fácil será deformarlo a la

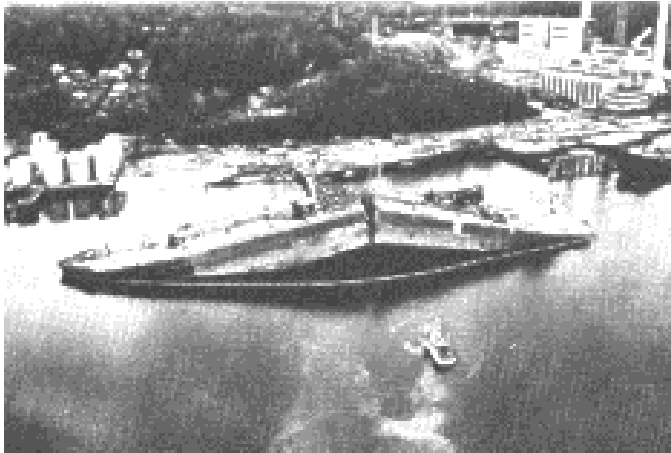
velocidad y a la temperatura que requiere el proceso; la capacidad del material para adquirir la forma que se necesita; la rapidez con la que se desgasta física o químicamente; la posibilidad de transformar su estructura; etcétera). Las pruebas mecánicas más comunes aplicadas a los materiales son: tracción, dureza e impacto.

Al acero del Titanic se le hicieron dos pruebas: una para medir su resistencia a la tracción y otra para evaluar su resistencia al impacto. La prueba de tracción consiste en aplicar un esfuerzo (fuerza/área) uniaxial (en un sólo sentido), estirando la probeta del material hasta que se rompa. Existen normas sobre las dimensiones y la metodología de la prueba; algunos de los datos que se obtienen son: *a*) resistencia a la fluencia: es el esfuerzo donde se inicia la deformación plástica del material; *b*) resistencia tensil: es el máximo esfuerzo que soporta el material antes de fracturarse; *c*) elongación: es la diferencia entre las longitudes inicial y final de la probeta en relación a su longitud inicial, y *d*) reducción de área: al alargarse el material la sección transversal de la probeta se reduce; la cantidad de reducción, en relación a la medida original, nos da la reducción de área.

Con la tabla 2 se pueden comparar los resultados de la prueba de tracción entre el acero del Titanic y otro moderno de bajo carbón, el SAE 1020, similar en composición.

En general, las propiedades son parecidas; sin embargo, el acero del Titanic presenta una más baja resistencia a fluir y una mayor elongación; una posible explicación se fundamenta en que tiene un tamaño de grano mayor; el tamaño de grano no se controlaba a principios de siglo. La resistencia tensil y la reducción de área son mayores en el acero del Titanic. La prueba de la resistencia a la tracción es la más común practicada a los metales (ahora a los demás materiales) y tiene sus orígenes en el siglo XVII; permite entender cómo se comportará el material cuando esté sujeto a un esfuerzo, por lo que la prueba es básica para materiales estructurales, pero no explica cómo se comportará en otras condiciones, por lo que es necesario practicarle otra prueba.

La mayoría de los aceros tienen una temperatura, llamada de transición dúctil-frágil, a la cual dejan de ser dúctiles para volverse frágiles. Cuando un material es dúctil se deforma previamente a fracturarse, pero cuando es frágil la fractura aparece sin deformación aparente. Desde principios de siglo, grandes tanques contenedores, así como puentes de acero, se fracturaron sin previo aviso; a partir de la Segunda Guerra Mundial, numerosos barcos fallaron –sin razón aparente, con gran pérdida de vidas– y se fracturaron en dos; esta fractura fue clasificada como “partiéndose en dos” (figura 6). Para 1943 habían desaparecido ocho barcos Liberty y uno de cada 30 tenía daños en su estructura (Hayes, 1998); entre 1942 y 1952 más de 90 barcos habían sufrido fracturas clasificadas como serias (Hopkins, 1998). Ahora se



**Figura 6.** Barco-tanque fracturado en dos. Debido a que bajó la temperatura del mar y a los esfuerzos multiaxiales inherentes a su uso, el comportamiento del acero del casco fue frágil; no hubo impacto.

sabe que las fracturas podían explicarse mediante el fenómeno de transición dúctil-frágil.

Para determinarla se diseñó una prueba que pudiera conducir a la fractura, con un conjunto de condiciones extremas: una temperatura baja, una alta rapidez de deformación (con un golpe) y una aplicación de esfuerzos multiaxial (varios esfuerzos con diferentes direcciones). La prueba de impacto Charpy conjuga estos aspectos al romper, mediante un golpe, al menos 10 muestras, a diferentes temperaturas, en condiciones estandarizadas que permiten medir la energía gastada en producir y propagar la fractura. Se elabora una gráfica de energía absorbida *vs.* temperatura; la figura 7 es tal gráfica para las dos muestras del Titanic, la longitudinal y la transversal, y para la del acero A36.

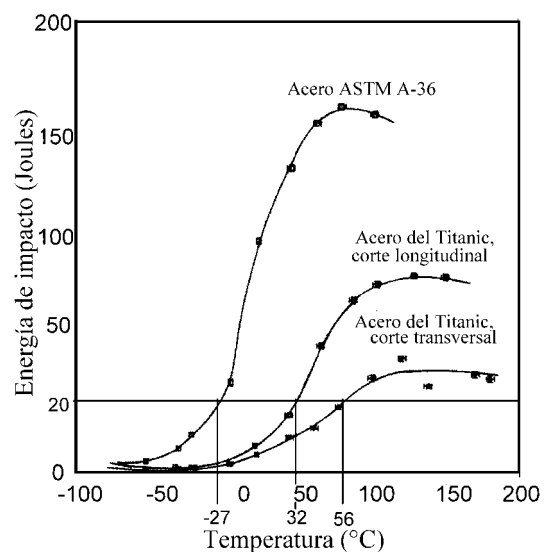
Existen diferentes criterios para analizar este tipo de gráficas pero baste saber que la temperatura de transición, para el acero de los barcos, está estandarizada a la que corresponde a una energía de 20 joules. El tamaño de grano de los aceros, entre otras cosas, afecta la temperatura de transición: a menor tamaño de grano menor temperatura de transición, lo que amplía el rango de temperaturas a las cuáles se puede usar el material confiablemente. No hay que olvidar que el tamaño de grano del acero del Titanic es 12.5 veces mayor que el del A36. Con el criterio fijado se puede analizar la figura 7. El acero moderno A36 es superior al del Titanic para cualquiera de sus muestras, ya que la energía de impacto requerida para romperlo es mayor siempre; de las dos muestras del Titanic, a bajas temperaturas (abajo de cero grados centígrados), la energía de impacto requerida para fracturarlas es prácticamente la misma; a altas temperaturas la muestra longitudinal es la que requiere de mayor energía para fracturarse. Las temperaturas de transición a 20 joules

son:  $-27^{\circ}\text{C}$  para el acero A36;  $32^{\circ}\text{C}$  para la muestra longitudinal del Titanic; y  $56^{\circ}\text{C}$  para la transversal. La diferencia de los valores entre la longitudinal y la transversal se explica por la diferencia que presentan las microestructuras, en orientación, debida a la laminación (fotomicrografías 3a y 3b). Quien investigó las razones del fenómeno de la fractura conocido como “partiéndose en dos” y descubrió la temperatura de transición, sentando las bases del ensayo Charpy, fue la doctora Constance Tipper. Su trabajo se publicó a partir de 1947.

Los científicos e ingenieros de materiales no pierden de vista que las propiedades dependen de la estructura y del procesamiento y que definen el comportamiento. También es posible decir que las propiedades y la estructura definen el procesamiento.

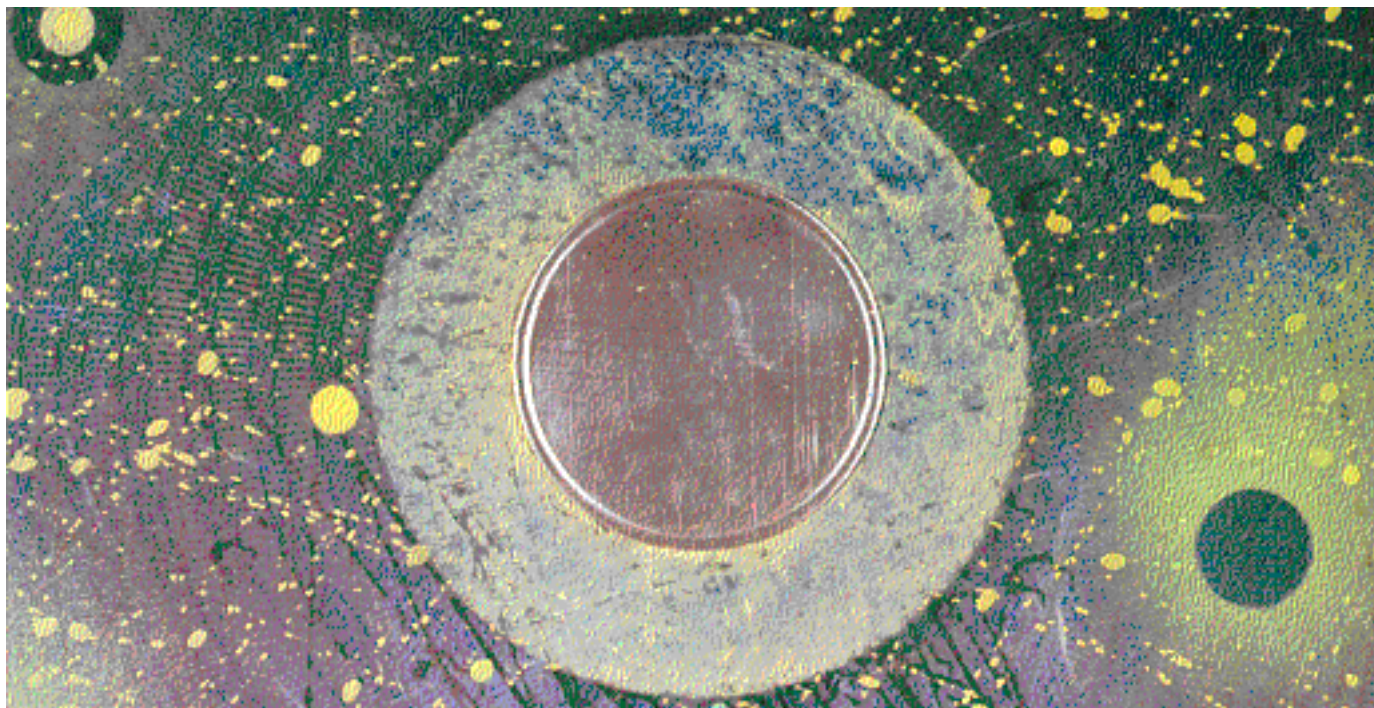
#### 4. Comportamiento

Se define a partir de las propiedades, principalmente, pero la estructura y las impurezas dan elementos colaterales de análisis, ya que afectan a las propiedades y son, además, producto del procesamiento; así, debemos retomar datos y elementos de los tres puntos anteriores para definir el comportamiento del acero del Titanic. Primero, al comparar las muestras longitudinal y transversal, a través de las fotomicrografías 3a y 3b, se llega a apreciar que las microestructuras presentan un arreglo diferente, como si fueran materiales distintos, por ello las propiedades y el comportamiento del material, para cada muestra, serán diferentes, cosa que se confirma en el ensayo Charpy. Si se hubieran realizado pruebas de tracción en las muestras longitudinal y transver-



**Figura 7.** Energía de impacto Charpy *vs.* temperatura para las muestras longitudinal y transversal del Titanic y para la del acero ASTM A36.





sal, habrían dado resultados diferentes; la respuesta del material ante un esfuerzo dependerá de la orientación de la estructura, de su tamaño, de la temperatura y de la aplicación del esfuerzo. Como segundo punto, los resultados de la prueba de tracción indican que la resistencia a la fluencia—el intervalo en donde el material funciona elásticamente— es un poco más bajo para el acero del Titanic que para el 1020. Los aceros que se utilizan para fabricar estructuras, como éstos, entre mayor esfuerzo sean capaces de soportar, sin deformarse plásticamente, mejor valorados serán, porque no fallarán durante su uso; de ahí la relativa inferioridad del acero del Titanic, en este aspecto. La elongación y la reducción de área son un indicativo de qué tan dúctil es un material: entre mayores son la elongación y la reducción de área, mayor la ductilidad; la ductilidad muestra que el material se comportará bien si se le quiere laminar o trefilar, es decir, si se desea fabricar con él láminas, varillas o alambres. La resistencia tensil, o a la tracción, explica la cantidad máxima de esfuerzo que el material soportará una vez que comenzó a deformarse plásticamente (que empezó a fluir); los valores de elongación, de reducción de área y de resistencia tensil indican la superioridad del acero del Titanic porque puede resistir más esfuerzo durante la deformación plástica; así se deformará más antes de romperse—si no se aplica el esfuerzo súbitamente, como en la prueba Charpy.

Los contenidos de Mn y S se analizan con la relación Mn:S, que para el acero del Titanic es baja (6.8:1), según los estándares modernos que indican un valor de 14:1 como

mínimo necesario; una baja relación de Mn:S—entendida como una presencia alta de azufre—provoca una tendencia a fragilizar el material a bajas temperaturas; cantidades relativamente altas de P y O provocan lo mismo; en el acero del Titanic el O no es un problema pero el P sí. Una baja relación de Mn:S y un alto contenido de P explican los resultados del ensayo Charpy que muestran la menor energía requerida para fracturar las muestras del acero del Titanic en comparación con el A36; las temperaturas de transición, a las cuales las muestras del acero del Titanic dejan de ser dúctiles para volverse frágiles, son 32°C y 56°C. A -2°C, temperatura a la que estaba el agua del Atlántico la noche del accidente, el acero del casco del Titanic se comportaba como un acero frágil, mientras que el acero A36 se hubiera comportado como dúctil, aún si la temperatura del agua hubiese llegado a -27°C. Adicional a lo mencionado anteriormente, la relativa alta temperatura de transición de las muestras del acero del Titanic se ve influida por el mayor tamaño del grano y por el consecuente tamaño grande de las partículas de MnS; la fotomicrografía 2 prueba la presencia de partículas de MnS en la fractura, como posible causante de ella.

Como área, el comportamiento significa para los ingenieros conjuntar el estudio, desarrollo y aplicación de: diseños del objeto (material, forma y dimensiones, requerimientos de trabajo), su deterioro en uso, esto es, el análisis de las posibles fallas desde varios puntos de vista: el químico (corrosión), el de la estructura y el mecánico (análisis de fallas), de diseño (que involucra la selección de materiales)



y la prevención del deterioro, mientras que para los científicos significa el establecimiento de los principios que rigen cada tipo de comportamiento.

### Conclusiones

1. a) La evaluación del acero del Titanic, como material para soportar esfuerzos no instantáneos en base a la prueba de tracción, indica que es adecuado para usarse como material estructural, aún en nuestra época.
1. b) Al probarlo en condiciones de baja temperatura, alta rapidez de deformación y esfuerzos multiaxiales, se concluye que no es un material recomendable para ser usado en cascos de barcos que realicen travesías por aguas frías, concepto desconocido al principio del siglo. Si el casco hubiera sido construido con un acero dúctil a esa temperatura, el daño hubiera sido menor.
2. La metodología que involucra los cuatro aspectos básicos de la ciencia e ingeniería de materiales permitió analizar exitosamente el problema del material que se usó para construir el casco del Titanic; con ello se muestra la interconexión de las cuatro herramientas de análisis y la necesidad de utilizarlas con criterio. Si este análisis hubiera sido realizado por cualquier profesionalista de un campo diferente al de la metalurgia o al de los materiales, las conclusiones habrían resultado incompletas; algunas disciplinas consideran parcialmente los cuatro aspectos básicos mencionados y otras no toman en cuenta alguno de ellos. Muchos profesionistas, de hecho, trabajan en el campo de los materiales, pero no podrán considerarse como expertos en el área de la ciencia y la ingeniería de materiales, mientras no tengan una formación integral.

### Reflexiones sobre el hundimiento del Titanic

Que el Titanic fuera golpeado por una masa cuatro veces mayor que la suya, a la velocidad que viajaba, permite esperar un daño estructural que podría haber sido menor si su acero hubiese tenido una temperatura de transición más baja. Ir a velocidad máxima con avisos de campo de hielo y en una noche de poca visibilidad, fue irresponsable. La decisión de virar fue inadecuada, pues un choque de frente hubiera dañado solamente los dos compartimientos de proa; ordenar poner la marcha en reversa impidió una rápida respuesta al viraje.

Se comentó que la longitud del barco era excesiva, lo que posiblemente favoreció que, durante el hundimiento, se partiera en dos. Los errores de los radiotelegrafistas se entienden porque las comunicaciones inalámbricas eran relativamente nuevas; el Titanic fue el primero en enviar la, más tarde, famosa llamada de SOS.

El desastre del Titanic sólo se puede entender como una conjugación de coincidencias desafortunadas, pues el Olímpic, su hermano gemelo, cubrió 500 veces la misma travesía sin mayores complicaciones.

### Consideraciones sobre la disciplina de Materiales

Considerar a la ciencia e ingeniería de materiales como una disciplina diferente comenzó en los años 50 (Cosmat, 1975); esto fue posible al llevar las bases del análisis de las disciplinas de la metalurgia y de la ingeniería metalúrgica a otros materiales (los cuatro vértices del tetraedro), usadas por más de 100 años y al enriquecerlas con algunas aportaciones de otras disciplinas (*vgr.* la física, la química, las matemáticas e ingenierías como la civil, la química y la mecánica) y técnicas (*vgr.* difracción de rayos X o de electrones, magnéticas, fluorescentes, ultrasónicas y radiográficas). Al futuro, la esperanza de prosperidad económica y de defensa de los países industrializados está cifrada en el desarrollo de nuevos polímeros, cerámicos, aleaciones metálicas y sus compósitos –todos de aplicación principal en sistemas inteligentes y estructuras– que tengan diferentes propiedades (mecánicas, magnéticas, eléctricas, ópticas, térmicas, etcétera) y novedosos comportamientos (de memoria de forma, de respuesta a corrientes eléctricas y campos magnéticos, ópticos, electro y magnetoreológicos, con relaciones menores de densidad-resistencia, etcétera), fabricados con nuevos procesos (solidificación rápida, autoensamblado, micromaquinado, manufactura personalizada, robótica, etcétera) que permitan obtener nuevas estructuras (amorfas, nanocristalinas, termoelásticas, etcétera). Esto sólo se puede hacer en la matriz de la ciencia y la ingeniería de materiales. ▀

### Referencias

- Britannic Encyclopaedia* CD, Titanic, 1997.
- Cosmat. Materials, its evolution practice and prospects. Supplementary report, 1975. Massachusetts Institute of Technology. Ca, Massachusetts, EUA.
- Davies, R. *Historical Metallurgy*, 29, 34 (1955).
- DeGarmo, Paul, *Materials and Processes in Manufacturing*, Fifth edition, Macmillan Publishing Co., Inc., 1979.
- Felkins, K.; Leighly H.P. y Jankovic A., The Royal Mail Ship *Titanic*. *JOM*. 50 [1], 12-18(1998)..
- Hayes, Evelyn, *Advanced Materials & Processes*, 153 [6] 100-101 (1998).
- Hopkins, Stephen, Standardization Improves Structural Integrity. *Standardization News. ASTM*, 26 [10] 38-41.
- Lord, Walter, *A Night to Remember*. Ed. Henry Holt N.Y., 1955.
- National Research Council, *Materials Science and Engineering for the 1990's*. National Academic Press, Washington, DC, 1989.