

## Prueba de impacto: ensayo Charpy

Y.Ortega

Departamento de Física de Materiales, Facultad de Ciencias Físicas  
Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid, España.

Recibido el 11 de mayo de 2005; aceptado el 27 de junio de 2005

En este trabajo se presentan algunos resultados interesantes de pruebas de impacto Charpy. A través del comportamiento a la fractura de diversos metales y polímeros, han sido analizados, de una forma didáctica, diversos factores, tales como: el incremento de la velocidad de impacto, la presencia de entallas y la transición dúctil-frágil con el decrecimiento de la temperatura.

*Descriptores:* Prueba de impacto Charpy; pruebas mecánicas; efecto de los tratamientos en los materiales.

In this paper some interesting results of Charpy impact tests are presented. The increase in the impact velocity, the present of a sharp notch and the ductile-to-brittle transition with decreasing temperature have been treated in a didactic way, by analyzing the fracture behaviour of several metals and polymers.

*Keywords:* Impact test; mechanical testing; materials treatment effects.

PACS: 81.05.-t; 81.70.B; 81.40

### 1. Introducción

La primera opinión que tenemos al observar el péndulo de Charpy, es que se trata de una máquina de ensayo muy simple desde el punto de vista mecánico (Fig. 1). Sin embargo, a pesar de esa sencillez mecánica, con este instrumento se pueden diseñar varias pruebas de impacto donde se demuestra de forma rápida y didáctica, la influencia que tienen determinados factores en el comportamiento mecánico de los materiales.

El nombre de este ensayo se debe a su creador, el francés Augustin Georges Albert Charpy (1865-1945). A través del mismo se puede conocer el comportamiento que tienen los materiales al impacto, y consiste en golpear mediante una masa una probeta que se sitúa en el soporte S (ver Fig. 1). La masa M, la cual se encuentra acoplada al extremo del péndulo de longitud L, se deja caer desde una altura H, mediante la cual se controla la velocidad de aplicación de la carga en el momento del impacto.

La energía absorbida  $E_a$  por la probeta, para producir su fractura, se determina a través de la diferencia de energía potencial del péndulo antes y después del impacto. Una vez co-

nocido el ángulo inicial de aplicación de la carga ( $\alpha$ ) y el ángulo final ( $\beta$ ) al que se eleva el péndulo después de la rotura completa de la probeta, se puede calcular la energía  $E_a$  mediante la expresión (1):

$$E_a = MgL[\cos(\beta) - \cos(\alpha)], \quad (1)$$

donde g representa la aceleración de la gravedad.

Los modos de fractura que pueden experimentar los materiales se clasifican en dúctil o frágil, dependiendo de la capacidad que tienen los mismos de absorber energía durante este proceso. Actualmente no existe un criterio único para determinar cuantitativamente cuando una fractura es dúctil o frágil, pero todos coinciden en que el comportamiento dúctil está caracterizado por una absorción de energía mayor que la requerida para que un material fracture frágilmente. Por otra parte el comportamiento dúctil tiene asociado altos niveles de deformación plástica en los materiales [1].

De acuerdo con la expresión (1), dos de los factores que determinan la energía máxima que se puede suministrar en el momento del impacto son: el valor de la masa M y la longitud de brazo L. Es por ello que existen diversos diseños de máquinas para pruebas de impacto Charpy, en los que combinando los dos factores anteriormente mencionados se logran construir péndulos que son capaces de brindar una energía de impacto máxima de  $\sim 358$  Julios, como es el caso del modelo *Tinius Olsen* ( $M = 27.2$  kg  $L = 0.9$  m) [2], con el que se realizan ensayos en aceros muy tenaces. Sin embargo, para materiales más frágiles, los cuales tienen una energía de fractura baja, se puede utilizar el diseño *Instron Wolpert* ( $M = 2.02$  kg  $L = 0.390$  m) [2,3], con el que se puede llegar a suministrar una energía máxima de 15 Julios.

Las pruebas de impacto Charpy se realizan según normas internacionales en las cuales se detallan las dimensiones de las probetas empleadas en este tipo de ensayo, así como la forma de reportar los resultados de los mismos. De acuerdo con las normas ISO (*International Organization for Stand-*

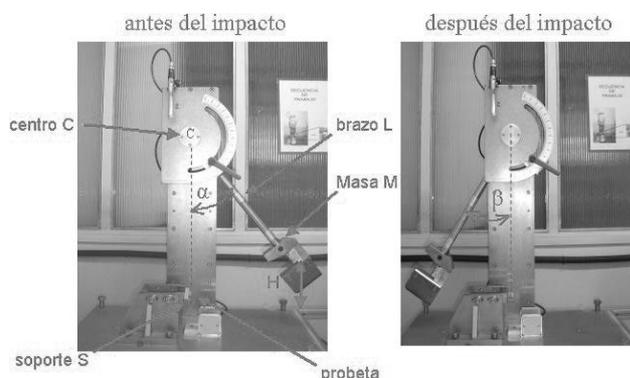


FIGURA 1. Péndulo de Charpy a) antes del impacto y b) después del impacto.

rization), los resultados de los ensayos de impacto, en probetas entalladas, se suelen expresar en ( $\text{kJ/m}^2$ ), para lo cual se divide la energía absorbida para provocar la fractura de la probeta entre la sección transversal de la misma en la zona de la entalla ( $h \times b_N$ ) (ver Fig. 2) [4], mientras que según las normas ASTM (*American Society for Testing Materials*) se reportan los resultados en ( $\text{J/m}$ ) [5], donde se divide esa energía absorbida entre la anchura remanente en la base de la entalla ( $b_N$ ).

Desde el punto de vista de la ingeniería es muy importante, y en ocasiones imprescindible, conocer cuál sería el comportamiento mecánico de los materiales, cuando se encuentran expuestos a condiciones extremas de servicio. Es por ello que muchos de los ensayos de impacto se realizan en condiciones en las cuales se favorece la fractura frágil. Entre los factores que contribuyen a modificar el modo de fractura y que se pueden estudiar mediante el ensayo de impacto Charpy se encuentran:

- La velocidad de aplicación de la carga, la cual se controla variando el ángulo  $\alpha$ .
- La presencia de concentradores de tensiones, lo cual se logra mecanizando una entalla en la probeta del material a estudiar (ver Fig. 2).
- Así como el impacto en materiales expuestos a diferentes temperaturas.

Este último factor es el responsable que determinados materiales experimenten una transición dúctil-frágil con la disminución de la temperatura. Para determinar el intervalo de temperaturas en el que se encuentra esa transición se suelen realizar los ensayos Charpy a distintas temperaturas con la ayuda de un sistema de calentamiento y enfriamiento acoplado al péndulo, lo cual permite controlar *in-situ* la temperatura de la probeta [6]. En su defecto, cuando no se dispone de tal mecanismo y se desea evaluar comportamientos mecánicos extremos, las muestras se pueden sumergir en baños a diferentes temperaturas con el atenuante de que no existe un control exacto de la temperatura a la cual se realiza el ensayo y con el cuidado de realizar la prueba de impacto lo más rápido posible (después de que la probeta haya recibido el tratamiento deseado), para evitar que las muestras experimenten grandes gradientes de temperatura.

Durante la realización de esta práctica, evaluaremos la influencia que tienen los tres factores anteriormente mencionados en el comportamiento mecánico de los materiales.

## 2. Realización de la práctica

La máquina de ensayo de impacto Charpy está acoplada a un ordenador mediante una tarjeta de adquisición de datos, a través de la cual es posible registrar las curvas fuerza-tiempo generadas durante los ensayos, y a su vez nos permite obtener el valor de la energía absorbida por los materiales en el proceso de fractura. Las probetas usadas en nuestros experimentos

tienen forma de paralelepípedos con una sección transversal de  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  y 8 cm de longitud. Las entallas realizadas a las probetas tienen una profundidad de 3 mm y el radio de las mismas es variable (Fig. 2). Las probetas con entalla deben colocarse en el soporte S, de forma tal que el lado de la entalla quede opuesto a la cara de la probeta que estará directamente expuesta al impacto del péndulo.

### 2.1. Influencia de la velocidad del impacto

Para este estudio se usan 3 probetas de Nylon y 3 probetas de PVC a las cuales se les realizan los ensayos bajo diferentes ángulos de carga. El objetivo de este apartado es evaluar la resistencia que ofrecen los materiales cuando se aumenta la velocidad a la cual ocurre el impacto (Tabla I).

TABLA I. Relación entre el ángulo de carga y la velocidad del impacto.

Ángulo de carga ( $\alpha$ )	Velocidad del impacto (m/s)
80 °	2.55
100 °	3.03
110 °	3.24
120 °	3.42
139 °	3.71

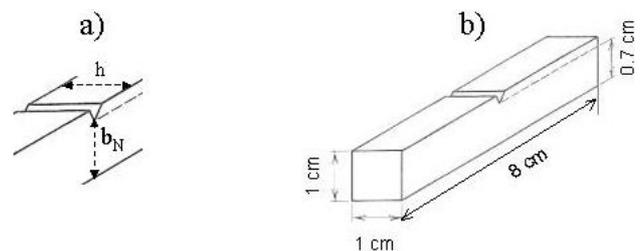


FIGURA 2. Probetas usadas en el ensayo Charpy a) detalle de la entalla b) dimensiones de las probetas empleadas en este trabajo. El radio de la entalla se define como la anchura del radio de curvatura de la entalla.

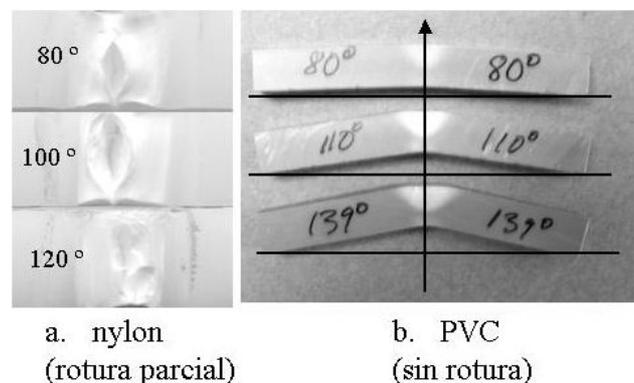
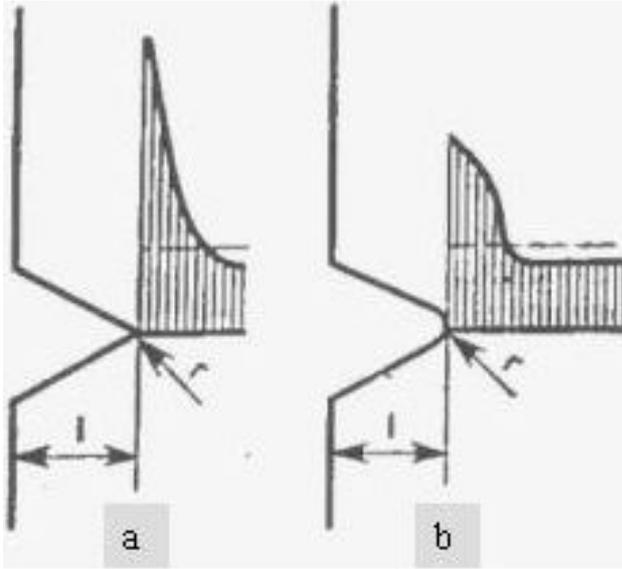


FIGURA 3. Resultado de los ensayos Charpy variando el ángulo de carga a) Nylon b) PVC .



Distribución de esfuerzos

- a. Entalla aguzada
- b. Entalla redondeada

FIGURA 4. Distribución de esfuerzos en el entorno de una entalla dependiendo del radio de la entalla.



FIGURA 5. Entallas realizadas a las probetas de PVC.

Es conocido que cualquier proceso de fractura consta de dos estados: la formación y la propagación de una grieta, para lo cual se requiere una determinada absorción de energía [7]. A su vez, el modo de fractura depende en gran medida del mecanismo de propagación de esa grieta. En el caso de las probetas de nylon se les han realizado entallas de igual radio, con el objetivo de simular la evolución de la rotura parcial del material. En la Fig. 3a se observa que el tamaño de la grieta producida tras el impacto es cada vez mayor a medida que la velocidad de aplicación de la carga aumenta. Esto se puede explicar si tenemos en cuenta que a medida que aumentamos el ángulo desde el cual se realiza el ensayo, la energía transmitida durante el impacto es mayor, por lo cual la probeta

puede absorber mayor energía, la cual se emplea en la propagación de la grieta.

De la Fig. 3b se puede observar que aunque la energía suministrada en los tres casos no es suficiente para producir la fractura de ninguna de las probetas de PVC sin entallas, todas presentan un comportamiento dúctil y se deforman. La mayor deformación se corresponde con el ensayo que ha sido realizado desde el ángulo mayor ( $\alpha = 139^\circ$ ). Como comentamos en el párrafo anterior, al aumentar la energía transmitida en el impacto, la probeta puede absorber mayor energía, lo cual provoca, en este caso, que el grado de deformación del material sea mayor. Este resultado demuestra que independientemente de cuál sea el mecanismo que propicia la deformación de la probeta, el comportamiento dúctil se caracteriza por una absorción de energía que posibilita que el material experimente una deformación plástica.

En la Fig. 3b también se puede apreciar que la zona blanquecina que aparece en las probetas de PVC aumenta de tamaño, con el aumento del ángulo de carga como consecuencia de la mayor tensión recibida en el impacto.

2.2. Influencia del radio de la entalla

Las entallas provocadas por un mecanizado, fabricación o diseño deficientes, ocasionan una concentración de esfuerzos en zonas localizadas de los materiales. Por otra parte, la fractura comienza en los sitios donde la concentración de tensiones es mayor [8]. Es por ello que las entallas o grietas presentes en un material conllevan un aumento en fragilidad.

La intensidad del esfuerzo en el extremo de una grieta depende tanto de las tensiones aplicadas como de la geometría y dimensiones de dicha grieta. En la Fig. 4 apreciamos que la distribución de esfuerzos en el entorno de una entalla aumenta a medida que nos acercamos al extremo de la misma, y por otra parte, la mayor concentración de esfuerzos está localizada en el extremo de las entallas más aguzadas (las que tienen un radio menor, (Fig. 4a) [8]. En este apartado queremos demostrar esa relación, a través de la energía absorbida por las probetas en el proceso de fractura.

El material usado para ello es el PVC y las entallas se realizaron manualmente en el laboratorio, con una segueta, una sierra y una amoladora, lo cual nos garantiza que los radios de las entallas sean de 0.5, 1 y 3 mm, respectivamente (Fig. 5). En cada uno de los casos se tuvo especial cuidado en que la profundidad de las entallas fuesen idénticas e igual a 3 mm.

La fig. 6 muestra las curvas fuerza-tiempo de estos tres ensayos. El área encerrada bajo estas curvas es proporcional a la energía absorbida por las probetas en la fractura. Los resultados de los ensayos revelan que la energía absorbida es de 0.28, 1.06 y 4.91 J, para las probetas cuyas entallas tienen radios de 0.5, 1 y 3 mm, respectivamente. Este resultado evidencia que la fractura total de la probeta que tiene un radio de entalla menor es más favorable desde el punto de vista energético. De la Fig. 6 se puede apreciar que la fuerza máxima requerida para que se produzca la fractura de la pro-

beta con  $r = 0.5$  mm es aproximadamente 1.6 veces menor ( $\sim 450$  N) que la que se requiere para producir la fractura de las probetas con radio de entalla mayor ( $\sim 750$  N). De acuerdo con el esquema de la Fig. 4, vimos que la amplificación del esfuerzo aplicado es mayor para los materiales que poseen entallas con un radio más pequeño, es por ello que en esos casos se requiere una menor fuerza para que ocurra la rotura total, lo cual se traduce en un menor esfuerzo.

El tiempo durante el cual se mantiene en contacto la masa del péndulo con la probeta, se puede determinar a partir de las curvas fuerza-tiempo. Este tiempo coincide con la región

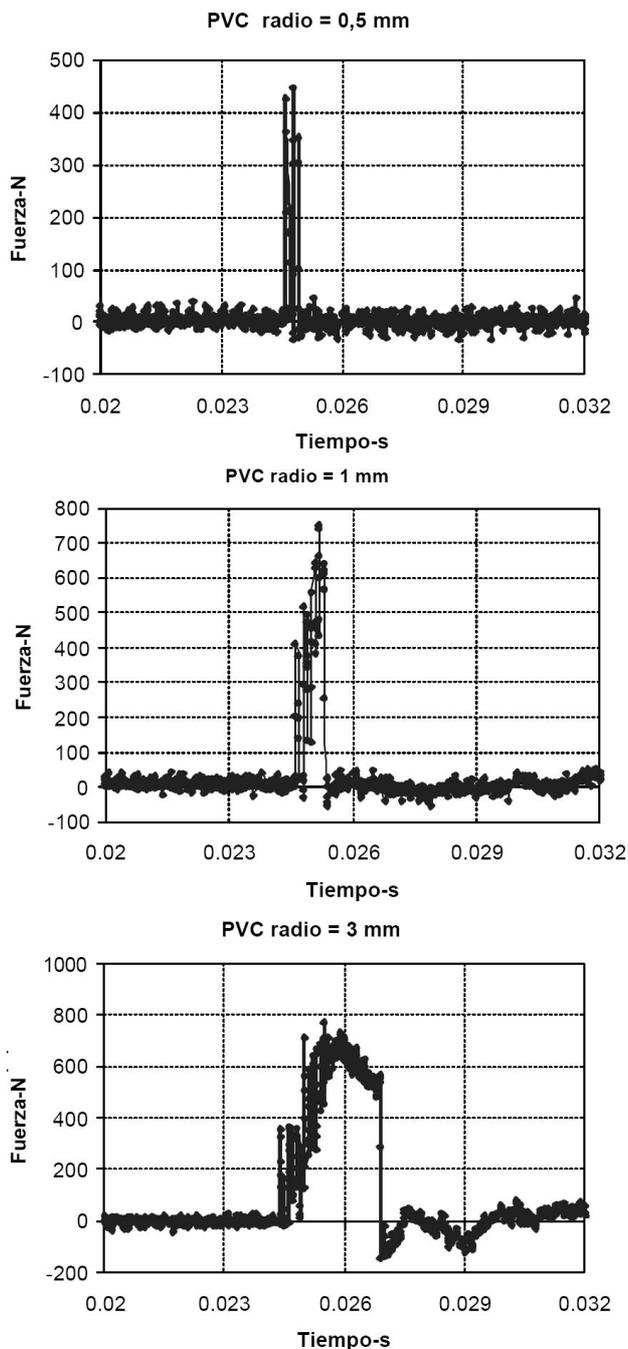


FIGURA 6. Curvas Fuerza-tiempo para probetas de PVC con diferentes radios de entalla (0.5, 1 y 3 mm).

de estas curvas en la cual la fuerza registrada es distinta de cero (sin tener en cuenta las pequeñas oscilaciones que se producen en la fuerza en torno a cero después de la rotura de la probeta). Analizando las curvas de la Fig. 6, se puede determinar que el tiempo requerido para producir la fractura es de 0.5, 0.7 y 25 ms aproximadamente, para las probetas cuyas entallas tienen un radio de 0.5, 1 y 3 mm, respectivamente. A partir de estos resultados podemos intuir que la velocidad de propagación de una grieta es mayor en el extremo de las entallas más aguzadas.

### 2.3. Influencia de la temperatura. Transición dúctil-frágil

A pesar de que todos los factores que condicionan el modo de fractura de los materiales tienen una gran importancia, el efecto de la temperatura es tal vez, entre todos ellos, el más conocido. Esto se debe a que algunas de las catástrofes estructurales más divulgadas, ocurridas en el siglo pasado, están relacionadas con la transición dúctil-frágil que experimentan algunos materiales al disminuir la temperatura.

En los materiales puros, la transición dúctil-frágil debe ocurrir a una temperatura determinada, sin embargo para muchos materiales esa transición ocurre en un rango amplio de temperaturas el cual está dado por la composición específica de cada material.

Como ya hemos visto a lo largo de este estudio, el comportamiento dúctil de un material viene acompañado de una deformación plástica y de una absorción de energía considerable. El mecanismo mediante el cual los materiales son capaces de absorber energía mientras se deforman, depende concretamente de su estructura interna. Es por ello que analizaremos inicialmente los materiales con estructura cristalina (metales) y seguidamente los polímeros.

#### 2.3.1. Metales

En el caso de los metales o aleaciones, el flujo plástico que posibilita que estos materiales se deformen es consecuencia del movimiento de las dislocaciones. Este movimiento a su vez está relacionado con el número de sistemas de deslizamiento que se encuentren activos a una temperatura dada. Es por ello que la combinación temperatura-tipo de estructura cristalina, determina la magnitud en la que se puede manifestar la transición dúctil-frágil. Si el esfuerzo requerido para mover una dislocación es muy alto, el metal fallará debido a la propagación de una grieta y la fractura será frágil.

Generalmente los sistemas de deslizamiento coinciden con los planos más compactos de los distintos sistemas cristalinos, lo cual no ocurre en los metales que tienen una estructura cúbica centrada en el cuerpo (c.c.c), como el Fe. Estos metales suelen fallar de forma frágil a temperaturas relativamente bajas y tienen un comportamiento dúctil a temperaturas altas.

A partir de las curvas esfuerzo-deformación mostradas en la Fig. 7 [8], obtenidas de ensayos de tracción realizados al

Fe a diferentes temperaturas, se observa que existe un aumento considerable del límite elástico a medida que disminuye la temperatura del ensayo. Este aumento del límite elástico, junto con la disminución de la velocidad de las dislocaciones a medida que disminuye la temperatura, conducen a fragilizar el material. Para demostrar la existencia de estos dos comportamientos mecánicos diferentes que puede tener el Fe, hemos ensayado dos probetas de Fe con entallas idénticas. Un ensayo se realizó a temperatura ambiente y el otro después de haber sumergido una de las probetas en nitrógeno líquido. Estas dos temperaturas garantizan que estemos a ambos lados de la temperatura de transición dúctil-frágil del Fe. Es importante que todos los ensayos que se realizarán en este apartado a temperaturas distintas de la temperatura ambiente, se ejecuten de forma rápida para garantizar que la temperatura de las probetas no varíe mucho después de los tratamientos.

Los resultados de ambos ensayos se muestran en la Fig. 8, donde se observa que el ensayo realizado a temperatura ambiente (a), solamente ha provocado una deformación de la

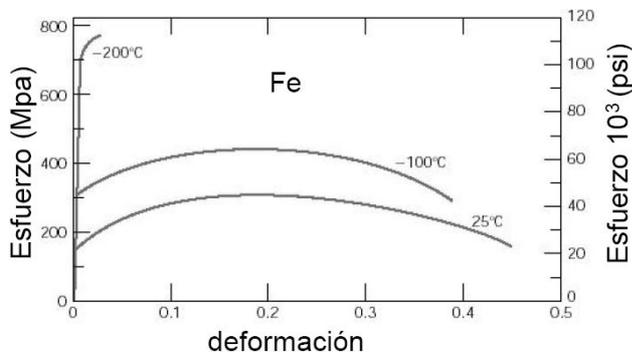


FIGURA 7. Curvas esfuerzo-deformación para el Fe a diferentes temperaturas.

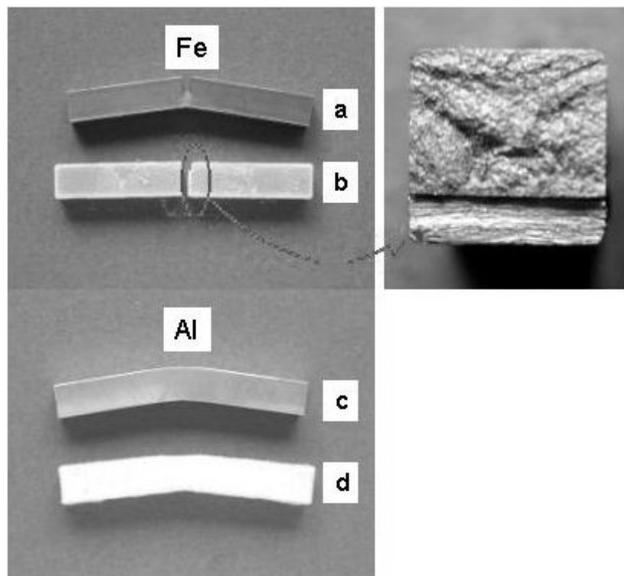


FIGURA 8. Resultado de los ensayos Charpy a diferentes temperaturas para el Fe y el Al a) y c) temperatura ambiente, b) y d) baja temperatura.

probeta (comportamiento dúctil), mientras que la probeta previamente sumergida en nitrógeno líquido (b) ha fracturado completamente (comportamiento frágil).

Son muchos los factores de los cuales depende el esfuerzo que se requiere para mover una dislocación, entre los que se encuentran el tipo de enlace atómico y el tipo de estructura cristalina, entre otros. En los metales con estructura cristalina fcc (cúbica centrada en caras), el esfuerzo requerido para mover las dislocaciones, no depende fuertemente de la temperatura. Por lo tanto, el movimiento de las dislocaciones permanece alto aun a bajas temperaturas y el material sigue siendo relativamente dúctil. En los ensayos realizados a probetas de aluminio a temperatura ambiente (c) y después de haber sido sumergidas en nitrógeno líquido (d), se observa que en ninguno de los casos se produce la fractura del material, pero sí se observa que ha ocurrido una deformación plástica, la cual es típica de un comportamiento dúctil.

### 2.3.2. Polímeros

Los polímeros son moléculas que están formadas por grupos funcionales (monómeros) que se repiten a lo largo de su estructura, la cual puede ser ramificada o lineal. Esos monómeros se componen básicamente de hidrocarburos ( $C_xH_y$ ) y la forma que tienen estas estructuras de disipar la energía absorbida en un impacto es fundamentalmente mediante rotaciones que se producen en torno a determinados enlaces.

El módulo elástico de los polímeros puede sufrir variaciones considerables con la temperatura, por lo cual los polímeros también pueden experimentar una transición dúctil-frágil al igual que determinados metales y aleaciones. La temperatura vítrea de cada polímero delimita la frontera entre ambos comportamientos y la misma depende de la composición específica de las cadenas poliméricas.

En la Fig. 9, vemos los resultados de los ensayos realizados a tres polímeros: nylon, PVC y metacrilato. Para el caso del nylon y del PVC se observa que ambos tienen un comportamiento dúctil a temperatura ambiente (b y d) y al ser sumergidos en nitrógeno líquido fracturan completamente (a y c). Sin embargo la rotura total del metacrilato ocurre a temperatura ambiente (e) mostrando un comportamiento frágil. Teóricamente para lograr observar un comportamiento dúctil y evitar la fractura de este material es necesario que la temperatura de la probeta esté por encima de los  $50\text{ }^\circ\text{C}$  (f) [7], para lo cual se introdujo previamente en un horno en torno a los  $150\text{ }^\circ\text{C}$ .

## 3. Fallos mecánicos reales relacionados con estos factores

Ejemplos de catástrofes producidas por la combinación de varios factores, entre ellos el efecto de la transición dúctil-frágil, los encontramos tanto en aleaciones como en polímeros:

Los barcos "Liberty" usados al final de la Segunda Guerra Mundial sufrieron catastróficas fallas durante el invierno de

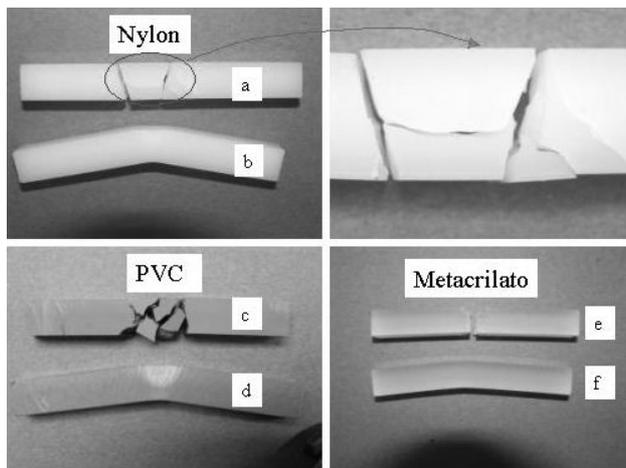


FIGURA 9. Resultado de los ensayos Charpy a diferentes temperaturas para el Nylon, PVC y metacrilato a, c) baja temperatura, b, d, y e) temperatura ambiente y f) alta temperatura.



FIGURA 10. Rampa de lanzamiento del trasbordador Challenger, donde se puede observar la presencia de hielo.

1942, conllevando a que algunos de estos buques se partieran literalmente en dos. Entre las causas de estos fallos se encontraba la presencia de un diseño inadecuado de las uniones soldadas, lo que contribuía a la presencia de altos niveles de concentraciones de esfuerzos en zonas localizadas [9]. Esto unido al comportamiento frágil del acero a bajas temperaturas inducía la propagación de grietas que provocaba la fractura de su estructura.

Otro caso ocurrido previamente fue el hundimiento del Titanic en el año 1912. El acero utilizado en su construcción era el mejor de su época, sin embargo hoy en día no pasaría las pruebas más elementales de calidad, producto del alto contenido de impurezas que contenía [9]. Ese alto con-

tenido de impurezas provoca que la resistencia del acero a la fractura sea baja, y especialmente en condiciones de baja temperatura su ductilidad se ve reducida. Por lo cual todos estos factores influyeron negativamente al ocurrir el impacto del Titanic con el *iceberg* en aguas heladas, lo que conllevó a su posterior hundimiento.

Un hecho más reciente ocurrido en el año 1986, fue la explosión del trasbordador Challenger. En este caso la baja resiliencia (capacidad de absorción de energía en la zona elástica de la curva esfuerzo-deformación) de los anillos (polímeros elastómeros) que cumplían la función de sellar las zonas seccionadas de los cohetes propulsores, produjeron que los gases generados por la combustión salieran al exterior e incidieran en el tanque de combustible principal, lo cual provocó la explosión del Challenger.

Los anillos conocidos como "*O ring*", por su forma, son construidos de materiales elastómeros. Este material se emplea en su fabricación con el objetivo de que sean capaces de deformarse elásticamente, "siguiendo" las dilataciones que se producen dentro de la zona seccionada de los cohetes propulsores. Sin embargo al disminuir la temperatura la poca capacidad de movimiento de sus cadenas poliméricas conllevó a aumentar la rigidez de estos anillos, disminuyendo la rapidez de su "respuesta". Aunque esta causa de forma aislada no fue la única que condujo al desastre, sí jugó un papel fundamental en su desencadenamiento, conclusión a la cual llegó Feynman al observar posteriormente a través de fotos (Fig. 10) [10], las condiciones en las que se encontraba la rampa de lanzamiento momentos antes de ocurrir la tragedia.

#### 4. Conclusión

Los experimentos que se pueden realizar con el péndulo de Charpy pueden ser muchos, tantos como nos permita nuestra imaginación. Es por ello que los que han sido expuestos en este estudio, solamente representan un número muy pequeño, de todos los que se podrían diseñar para establecer una relación entre la estructura interna de los materiales y su comportamiento a la fractura, como podría ser: el tamaño del grano, la composición de la aleación y la presencia de precipitados, entre otros.

A modo de conclusión, más que enumerar algunos de los conocimientos aquí expuestos, deseo expresar que muchas veces los hechos naturales, lamentables en algunos casos, nos ayudan a reflexionar sobre temas en los que de forma espontánea somos incapaces de analizar, a pesar de estar en contacto con ellos cotidianamente: es por eso que la curiosidad en la ciencia es una actitud necesaria. Y finalizo recordando que en la ciencia como en la vida, en la sencillez de las explicaciones radica la belleza: tal vez por el dinamismo que ambas encierran.

#### Agradecimientos

Agradezco a la Prof. N. de Diego por animarme a escribir este artículo. A Carlos Romero y a Esther Garrido por su asistencia técnica y especialmente a Ernesto Montero por su ayuda al realizar las fotos.

- 
1. R.E. Smallman and R.J. Bishop. *Modern Physical Metallurgy & Materials Engineering* (Butterworth Heinemann, 2002).
  2. <http://www.mtm.kuleuven.ac.be/Research/Equipment/Mechanical/PendulumImpact.html>
  3. M.P. Manahan, R.B. Stonesifer, Y. Soong, and J.M. Burger, "Miniaturized Notch Test Specimen and Test Machine Design," *Pendulum Impact Machines: Procedures and Specimens for Verification*, ASTM STP 1248, Thomas A. Siewert and Karl Schmieder, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1995).
  4. Steel - Charpy V-notch pendulum impact test - Instrumented test method, ISO 14556:2000.
  5. Standard Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, E 23, Annual Book of ASTM Standards, v.03.01, ASTM, Philadelphia, 1984.
  6. M.P. Manahan, Sr., "In-situ Heating and Cooling of Charpy Test Specimens," *Pendulum Impact Testing: A Century of Progress, STP 1380*, T.A. Siewert and M.P. Manahan, Sr., Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2000.
  7. A. Cottrell, *An Introduction to Metallurgy* (Anthony Rowe Ltd, Eastbourne 1995).
  8. W.D. Callister, Jr. *Fundamentals of materials Science and Engineering* (John Wiley & Sons, Inc, 2001).
  9. <http://www.disastercity.com/titanic/index.shtml>
  10. <http://www.virtualschool.edu/mon/SocialConstruction/FeynmanChallengerRpt.html>