

DESCUBRIENDO LOS POLIMEROS A TRAVES DE EXPERIENCIAS VISUALES

N. Candau^{1,2}, T. Abt^{1,2},

¹eb-POLICOM - e-PLASCOM, Departament de Ciència i Enginyeria de Materials, Barcelona-Tech, Campus Diagonal Besòs-EEBE, Universitat Politècnica de Catalunya - Barcelona, 08019, Spain,

nicolas.candau@upc.edu

²Center for Research in Multiscale Science and Engineering of Barcelona, Barcelona-Tech, Campus Diagonal Besòs-EEBE, Universitat Politècnica de Catalunya - Barcelona, 08019, Spain,

Resumen: Los polímeros están presentes en numerosos objetos cotidianos, pero sus propiedades fundamentales son poco conocidas por el público general. Para acercar estos conceptos de forma accesible, proponemos una serie de actividades experimentales dirigidas a estudiantes de secundaria, realizadas durante visitas a la universidad. A través de demostraciones visuales y participativas, se exploran fenómenos clave del comportamiento polimérico. Se ilustra la transición vítrea (T_g) mediante el enfriamiento de un guante de nitrilo en nitrógeno líquido, volviéndolo frágil como vidrio, y con pruebas de impacto en plásticos por encima y por debajo de su T_g . Se introduce el concepto de elasticidad entrópica estirando una muestra de caucho, observando cómo su fuerza aumenta al calentarla. Finalmente, se demuestra el efecto elastocalórico: al estirar manualmente una muestra, se percibe un calentamiento; al soltarla, un enfriamiento acercándola a los labios. Estos cambios se visualizan también con cámara térmica portátil. Las experiencias permiten descubrir de manera tangible las propiedades de los polímeros, haciendo la experiencia memorable.

Palabras clave: polímeros, divulgación científica, transición vítrea, elasticidad entrópica, efecto elastocalórico, experiencias visuales.

1. INTRODUCCIÓN.

Los materiales poliméricos están presentes en casi todos los aspectos de nuestra vida moderna: envases, textiles, electrodomésticos, automóviles, componentes electrónicos, prótesis médicas, entre muchos otros. Sin embargo, la ciencia que subyace a su comportamiento mecánico y térmico es compleja, y no suele estar al alcance del público general ni de los estudiantes de niveles preuniversitarios.

En el marco del grupo de investigación e-PLASCOM de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), hemos diseñado una serie de experiencias divulgativas orientadas a estudiantes de bachillerato, con el objetivo de introducir conceptos fundamentales de la física de polímeros mediante actividades visuales y participativas. Estas experiencias se han llevado a cabo durante jornadas de puertas abiertas en el campus, la Semana de la Ciencia y el programa Escolab.

El enfoque multisensorial permite que el aprendizaje se realice a través de la vista, el tacto, el oído e incluso el olfato, transformando fenómenos complejos como la transición vítrea o la termodinámica de los elastómeros en vivencias concretas y memorables. A continuación, se presentan tres de estas experiencias ilustrativas.

2. EXPERIENCIA I: TRANSICIÓN VÍTREA EN LOS POLÍMEROS.

La transición vítrea es el fenómeno por el cual un polímero amorfo o semi-cristalino cambia de un estado rígido y frágil (vítreo) a uno más blando y flexible (gomoso) al aumentar la temperatura [1]. Esta transformación ocurre alrededor de una temperatura

denominada temperatura de transición vítrea, T_g (g por *glass transition* en inglés). Esta propiedad térmica es esencial para entender los mecanismos de relajación molecular (movimiento de los átomos alrededor de posiciones de equilibrio, como se ilustra en la figura 1) que tienen un impacto directo en el comportamiento mecánico de los plásticos en distintas condiciones. Las esferas pueden representar átomos o grupos de átomos (moléculas) que tienen enlaces fuertes entre ellos (enlaces covalentes representados por las líneas). El polímero está constituido por varias cadenas de estos átomos o grupos de átomos. Por debajo de la temperatura de transición vítrea el polímero está en estado vítreo y tiene poco movimiento molecular, por encima está en estado gomoso y tiene alto movimiento molecular. Por tanto, un polímero puede encontrarse a temperatura ambiente en estado vítreo (una parte de los plásticos) o en estado gomoso (la mayoría de los elastómeros).

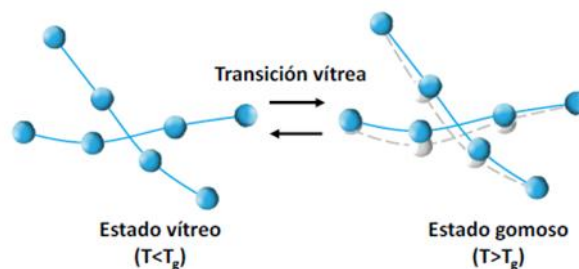


Figura 1. Esquema del principio de transición vítrea en los polímeros. En azul los trozos de cadenas poliméricas en un instante t ; en gris, los mismos trozos de cadenas poliméricas en otro instante debido al movimiento molecular.

La primera demostración consiste en sumergir un guante de nitrilo en nitrógeno líquido ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$). Tras unos segundos, el material, normalmente flexible, ya que es un polímero tipo elastómero, que se encuentra a temperatura ambiente en estado gomoso y flexible, se vuelve rígido y frágil debido a la inmovilización de las cadenas poliméricas, y se rompe fácilmente al aplicarle una fuerza, mostrando un comportamiento vítreo (Figura 2). Al bajar su temperatura por debajo de su propia T_g , el guante de nitrilo se “vitrifica”.



Figura 2. Demostración del cambio de propiedades de un guante de nitrilo, típicamente deformable a temperatura ambiente, pero se vuelve vítreo a bajas temperaturas sumergiéndolo en nitrógeno líquido.

En una segunda experiencia, se ilustra el principio de la T_g , comparando el comportamiento mecánico de dos plásticos comunes: el poliestireno (PS), con una T_g por encima de la temperatura ambiente, y el polietileno de alta densidad (HDPE), con una T_g por debajo de la temperatura ambiente. Se realizan ensayos de impacto tipo Charpy para evidenciar cómo el PS se rompe de forma frágil, mientras que el HDPE muestra un comportamiento más dúctil. Esta comparación tangible permite relacionar temperatura, estructura molecular y propiedades mecánicas (Figura 3).

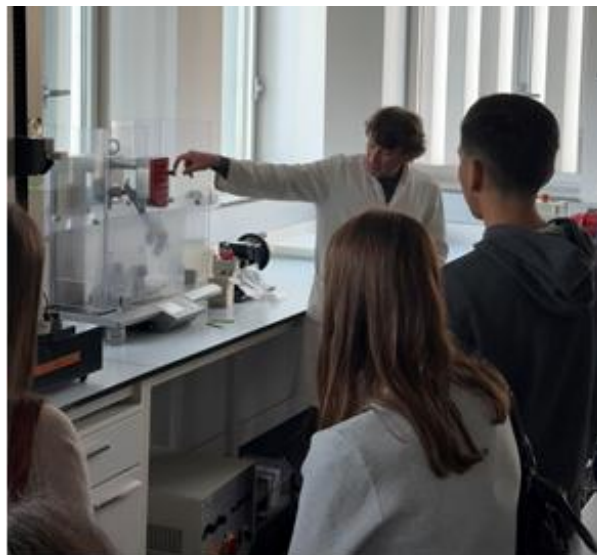


Figura 3. Experiencia de impacto Charpy donde se utiliza un péndulo que impacta materiales poliméricos frágiles (se comportan como vidrios) o dúctiles (capaces de absorber el impacto deformándose mucho antes de romper).

3. EXPERIENCIA II: ELASTICIDAD ENTRÓPICA DE LOS ELASTÓMEROS.

A diferencia de los materiales metálicos o cerámicos, los elastómeros son una clase de materiales que presentan una elasticidad de origen entrópico, que se representa en la figura 4 [2]. En estado de “reposo” (de equilibrio estadístico o de estado más estable termodinámicamente, denominado ovillo estadístico), las cadenas poliméricas están enredadas aleatoriamente, y tienen una entropía grande (es decir un desorden grande). Si no se aplica ningún cambio de temperatura o ninguna presión exterior, las cadenas siempre se encontrarán en este estado de “reposo”. Al estirarlas, éstas se alinean, reduciendo la entropía del sistema (el desorden es menor). Esta disminución de entropía implica una fuerza restauradora por parte del material mismo que busca recuperar el estado desordenado más estable.

Para ilustrar este concepto, se utiliza una máquina de tracción que estira una muestra de caucho natural (Figura 5). Una vez estirada, se visualiza la fuerza necesaria para mantener la muestra tensa. A continuación, se calienta la muestra con aire caliente mediante un secador de pelo. Se observa que la fuerza necesaria para mantener la deformación aumenta con la temperatura, en contraste con lo que ocurre, por ejemplo, en materiales metálicos. Este comportamiento se explica por el incremento de la tendencia entrópica a recuperar el estado inicial al aumentar la agitación térmica de los átomos que constituyen las cadenas de elastómero.

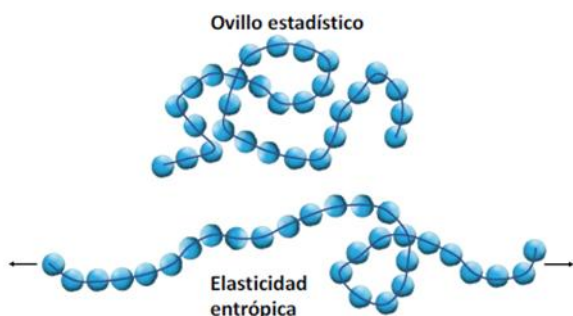


Figura 4. Esquema del concepto de elasticidad entrópica representando una cadena polimérica (sucesión lineal de átomos con enlaces fuertes) en estado de equilibrio (ovillo estadístico) y en estado estirado en el cual aparecen cierto alineamiento, anisotropía y orden (la entropía disminuye).

Este fenómeno permite introducir conceptos termodinámicos mediante una observación visual de un cambio de rigidez del material.



Figura 5. Experiencia de calentamiento de una muestra de elastómero estirado en una máquina de tracción.

4. EXPERIENCIA III: EFECTO ELASTOCALÓRICO.

El efecto elastocalórico consiste en variaciones de temperatura inducidas por la deformación de ciertos

elastómeros, derivadas de cambios en su estructura interna (Figura 6) [3]. Con la ayuda de una cámara térmica portátil (HIKMICROVIEWER [4]), se pueden visualizar estos cambios: aumentos superiores a 30 °C al estirar rápidamente la muestra, y descensos de hasta 13 °C al soltarla. El esquema enseña cómo se calientan las cadenas poliméricas a medida que aparecen los mecanismos de deformación: la elasticidad entrópica genera un primer calentamiento menor (efecto termoelástico), la cristalización bajo deformación del elastómero genera un segundo calentamiento mayor (calor latente de cambio de fase). La visualización térmica en tiempo real tiene un impacto en los participantes, quienes comprenden intuitivamente el vínculo entre estructura molecular y propiedades térmicas de estas clases de polímeros.

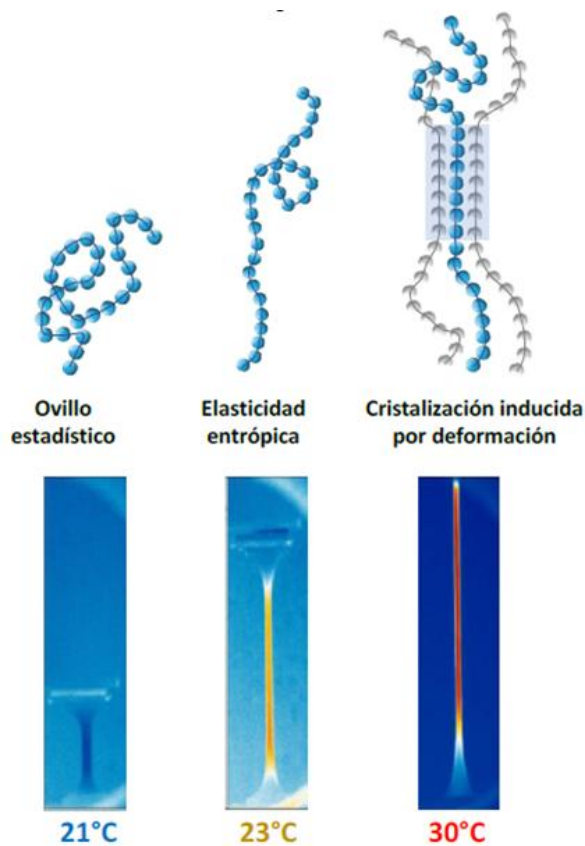


Figura 6. Esquema de las cadenas poliméricas de elastómero en varios estados deformados (no deformados a la izquierda o altamente deformados a la derecha). Las imágenes de cámara infrarroja ilustran la temperatura en la superficie de una muestra de elastómero en diferentes estados de deformación (azul corresponde a temperatura ambiente de 21°C, amarillo a 23°C y rojo a 30°C).

En otra experiencia, se estira manualmente una banda de goma y se coloca sobre los labios, una zona especialmente sensible a la temperatura. Se percibe un calentamiento durante el estiramiento (proceso exotérmico) y un enfriamiento al soltar la muestra

(proceso endotérmico). Este cambio se debe a mecanismos descritos anteriormente como la cristalización inducida por deformación (SIC), que libera calor, y su fusión al relajarse, que lo absorbe.



Figura 7. Al acercar rápidamente una tira de caucho a los labios después de haberla estirado, se siente un calor. Este efecto podría ocurrir debido a cualquier tipo de mecanismo disipativo en polímeros (fricción molecular o ruptura de enlaces intramoleculares. Sin embargo, cuando se relaja la misma muestra, y se vuelve a poner en los labios, sentimos frío, lo que descarta efectos disipativos. Este frío es debido entre otras cosas a la fusión de los cristales formados previamente durante la deformación. La cristalización, siendo exotérmica, tiene como efecto calentar el material (el material libera el calor), aunque la fusión, siendo endotérmica, enfría el material (el material absorbe el calor).

5. CONCLUSIONES.

Hemos presentado tres experiencias didácticas que permiten introducir conceptos clave de la ciencia de polímeros de forma accesible y sensorial: la transición vítrea, la elasticidad entrópica y el efecto elastocalórico.

Estas actividades han demostrado ser eficaces para captar el interés de estudiantes de bachillerato y fomentar la comprensión de conceptos complejos a través de la experiencia directa. Las reacciones del alumnado son muy positivas, destacando la sorpresa y el entusiasmo al "sentir" físicamente los fenómenos.

De cara al futuro, se está trabajando en simplificar las experiencias para prescindir de equipamiento de laboratorio especializado (como máquinas de tracción o ensayos de impacto) y ampliar el rango sensorial de las actividades, integrando otros estímulos como sonido y olor, para hacerlas aún más accesibles y transportables a contextos escolares.

6. REFERENCIAS.

[1] M. C. Shen and A. Eisenberg, 'Glass transitions in polymers', *Progress in Solid State Chemistry*, vol.

3, pp. 407–481, Jan. 1967, doi: 10.1016/0079-6786(67)90039-8.

[2] R. T. Deam and S. F. Edwards, 'The theory of rubber elasticity', *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 280, no. 1296, pp. 317–353, Jan. 1997, doi: 10.1098/rsta.1976.0001.

[3] J. P. Joule, 'V. On some thermo-dynamic properties of solids', *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 149, pp. 91–131, Jan. 1997, doi: 10.1098/rstl.1859.0005.

[4] 'HIKMICRO Viewer Software'. Accessed: Jun. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.hikmicrotech.com/en/industrial-products/hikmicro-viewer-software/>