

Envase de cartón multicapa con memoria de forma termo-activa

Thermo-active shape memory multi-layer paperboard packaging

José-María Cuevas-Zarraga¹, Edgar Abascal-Carranza¹, Nuria García-Huete², José-Manuel Laza-Terroba³ y José-Luis Vilas-Vilela^{2,3}

¹ Centro Tecnológico GAIKER (España)

² BC Materials (España)

³ Universidad del País Vasco (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8922>

1. INTRODUCCIÓN

Los polímeros con memoria de forma termo-activos, considerados materiales inteligentes, son materiales poliméricos capaces de fijar una forma temporal y recuperar la forma original memorizada, bajo procesos de calentamiento por encima de una temperatura de activación (T_{trans}). En general, el mecanismo involucrado implica la actuación de los segmentos poliméricos como interruptores moleculares con la temperatura gracias a variaciones en la flexibilidad de la cadena polimérica, es decir, las moléculas son flexibles y deformables por encima de T_{trans} , y rígidas y estables por debajo de esta transición térmica. En particular, los materiales con memoria de forma semicristalinos se caracterizan por una temperatura de fusión (T_m) como temperatura de activación del proceso térmico de recuperación de la forma, de modo que la forma temporal es fijada por la cristalización de los dominios cristalinos y la forma permanente original a través de enlaces covalentes a lo largo de la red macromolecular. Una vez deformado el polímero a una temperatura superior a T_m , la nueva forma temporal y la tensión mecánica interna se fijan enfriando el material por debajo de la temperatura de cristalización. De este modo, calentando nuevamente el polímero por encima de T_m , la energía elástica almacenada en el material deformado se libera y se produce la restauración de la forma original memorizada [1].

Los polímeros semicristalinos entrecruzados en base a polialquénameros han demostrado excelentes propiedades de memoria de forma a diferentes temperaturas de activación que van desde -10

hasta 50°C. Al igual que para otros polímeros con memoria de forma, estas propiedades incluyen efectos de memoria de forma unidireccionales (simples) y bidireccionales (dobles), la activación remota del efecto mediante campos electromagnéticos, e incluso sistemas con triple memoria [2]. En todos estos casos, las estructuras químicamente reticuladas requeridas pueden obtenerse utilizando un peróxido, o mediante radiación ionizante como haces de electrones o radiación gamma [3].

Tradicionalmente, los principales materiales empleados en envases son el papel, el vidrio, el acero, el aluminio y los plásticos, con menor presencia de la madera y los textiles. Además, las funciones del envase son diversas, pudiendo estar relacionadas con la protección, la presentación, la comunicación y el manejo y almacenamiento, así como con la facilidad de fabricación. Todas estas funciones, dependiendo del contenido, requieren materiales o combinaciones sofisticadas. En este contexto, la industria del envase y embalaje trata de aprovechar los diferentes materiales para conseguir un envasado eficiente que funcione como conexión entre el fabricante del producto y el consumidor [4]. Además, aparte de la sostenibilidad, dentro del diseño del envase las tendencias más destacadas en 2018 incluyeron aspectos como la interacción, la personalización, la forma reconocible, el factor sorpresa a través de la experiencia de abrir el producto, la experiencia de marca, la comunicación y uso simple, el compartir la experiencia o la adaptación al comercio electrónico, entre otros muchos [5]. Por lo tanto, desde un envase capaz de sorprender e interactuar, hasta un envase capaz de ayudar en el consumo y reciclaje, la capacidad de memoria de forma puede conducir al desarrollo de envases innovadores y diferenciadores que influyan en algunas decisiones de compra del consumidor [6].

En esta misma línea, nuevos conceptos de envase, que sacan provecho de la capacidad de movimiento de diferentes espumas y polímeros con memoria de forma, comienzan a aparecer como una posible

alternativa a los diseños convencionales [7-9]. De este modo, estas nuevas ideas se pueden fundamentar en el moldeo con formas complejas de las partes de protección de los productos, o también en las operaciones de embalaje y desembalaje de estos. Por otro lado, en envases de papel, han surgido nuevos diseños muy ingeniosos a partir de materiales celulósicos mecánico-activos que dan lugar a envases de cartón laminado que, por ejemplo, pueden expandirse o abrirse de forma autónoma con la temperatura y la humedad [10-14].

Es sabido que el papel y el cartón seguirán desempeñando un papel fundamental en el mercado del envase [15], donde muchos materiales multicapa laminados se elaboran con capas poliméricas intermedias, particularmente láminas de polietileno y sus derivados [16]. Precisamente, en este contexto, los autores presentan una nueva idea a partir de la incorporación de un polímero con memoria de forma similar al polietileno como un sustituto o componente de las capas intermedias para dar lugar a envases de cartón laminado activos con la temperatura. De este modo, el artículo discute algunos conceptos sobre diseño y aplicación, una vez formulado y caracterizado el polialquénamero con memoria de forma, para luego desarrollar un demostrador multicapa simple que sirve como ejemplo de un envase con apertura autónoma capaz de desplegarse cuando la temperatura supera una temperatura moderada, la cual puede programarse ajustando la cristalinidad del polímero [1].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El polímero empleado fue un polioctenámico (Vestenamer 8012[®] de Evonik) de bajo peso molecular, caracterizado por macromoléculas lineales y cíclicas con un contenido de dobles enlaces cristalizables en configuración *trans* del 80%. Por su parte, el agente de entrecruzamiento fue un peróxido de dicumilo (DCP) de 98,0% de pureza de Aldrich.

Ambos componentes, el polioctenámico (PCO) y el DCP, se mezclaron en fundido a 70°C en una cámara de mezcla Haake Rheomix 600. Seguidamente, el material obtenido se prensó y se entrecruzó a

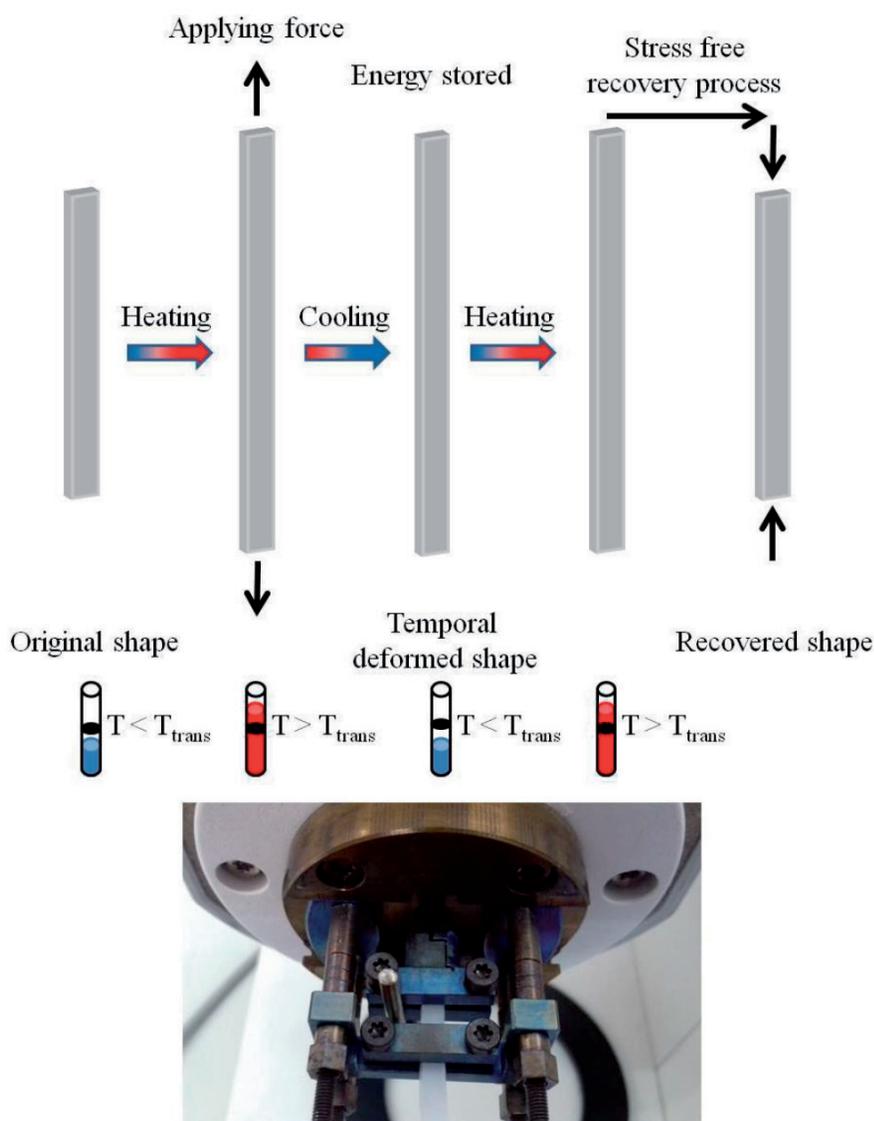


Fig. 1: Esquema del ensayo termo-mecánico cíclico, y detalle de la muestra de PCO sujeta en las mordazas

180°C durante 20 minutos, tras lo cual se enfrió hasta temperatura ambiente bajo presión para obtener muestras de 1,5 mm de espesor.

Las propiedades térmicas se analizaron mediante calorimetría diferencial de barrido (METTLER TOLEDO DSC 822), bajo atmósfera de nitrógeno (50 ml min⁻¹). En un primer barrido, el material se analizó desde -100 hasta 150°C con una velocidad de calentamiento de 10°C min⁻¹. Posteriormente, se sometió al material a un segundo barrido de enfriamiento desde 150 hasta -100°C con una velocidad de enfriamiento de -10°C min⁻¹, tras lo cual se procedió nuevamente a un segundo barrido hasta 150°C a la misma velocidad de calentamiento previa.

Por su parte, el análisis mecánico-dinámico-térmico en modo flexión se llevó a cabo para evaluar las propiedades termo-mecánicas fundamentales del PCO entrecruzado. Por lo tanto, el ensayo se realizó con muestras rectangulares (10 x

35 x 2 mm) con una frecuencia de ensayo de 10 Hz, una deformación de 64µm y una velocidad de calentamiento de 2°C·min⁻¹ (DMTA MK II de PolymerLaboratories).

Las propiedades de memoria de forma se caracterizaron mediante un experimento termo-mecánico cíclico, con control de fuerza, en un equipo Mettler Toledo DMA-1 (Figura 1) usando probetas rectangulares de 20 mm x 4 mm x 1,5 mm. En particular, las muestras fueron calentadas hasta 80°C, y se les aplicó una fuerza de 1N para estirarlas. Seguidamente, manteniendo la tensión ejercida, la muestra se enfrió (-4°C min⁻¹) hasta los 10°C, tras lo cual se mantuvo a dicha temperatura y tensión durante 5 minutos. Posteriormente, se retiró la fuerza para fijar la forma temporal, la cual se cuantifica por la capacidad de fijación de la deformación (R_f), o la capacidad de fijar la deformación mecánica (ϵ_u) tras alcanzar una deformación máxima (ϵ_m). Esta capacidad de fijación se calcula mediante la ecuación (1).

$$R_f = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_m} \times 100 \quad (1)$$

Por último, la muestra sin tensión se calentó nuevamente hasta 80°C (4°C min⁻¹) y el proceso de recuperación con la temperatura se registró hasta recuperar la forma original. La capacidad de recuperación (R_r) cuantifica la facultad de recuperar la forma original tras una deformación previa (ϵ_m) según la ecuación (2). En este caso, ϵ_p representa la deformación residual tras el ciclo termo-mecánico.

$$R_r = \frac{(\epsilon_m - \epsilon_p)}{\epsilon_m} \times 100 \quad (2)$$

Una vez que la formulación de PCO con memoria de forma fue desarrollada y caracterizada, se fabricó un laminado multicapa mediante compresión a modo de demostrador. Así, se obtuvo un prototipo de cartón laminado apilando y comprimiendo en un molde plano una lámina de aluminio multicapa (polietileno/aluminio/polietileno - PE/Al/PE), el material con memoria de forma, una película adhesiva de alcohol polivinílico (PVA) y una lámina de cartón gruesa (0,23 mm de espesor). En concreto, para la demostración se seleccionó un diseño con forma de flor similar a los diseños presentados por Tomorrow Machine [13].

La estructura y espesor de la configuración final fue evaluada mediante microscopía electrónica de barrido a vacío (SEM) (EVO50 de Zeiss), empleando un detector de electrones secundarios.

El concepto del envase con capacidad de apertura autónoma quedó demostrado tras calentar localmente las aristas de la muestra bien por encima de T_{trans} , la cual se correspondía a la temperatura de fusión calculada mediante el análisis DSC, y plegando la estructura para formar un envase cerrado en forma cruzada. Tras enfriar la forma cerrada, la estructura doblada se colocó sobre una placa calefactora y se registró el proceso de apertura o recuperación de la forma con la temperatura.

3. RESULTADOS

Primeramente, se presenta este tipo de estructuras de cartón laminado con memoria de forma como una potencial e interesante herramienta para desarrollar envases de alto valor añadido para el sector.

El envase con capacidad autónoma de apertura o despliegue es un concepto interactivo muy reciente que se ha generado a partir de la combinación del co-

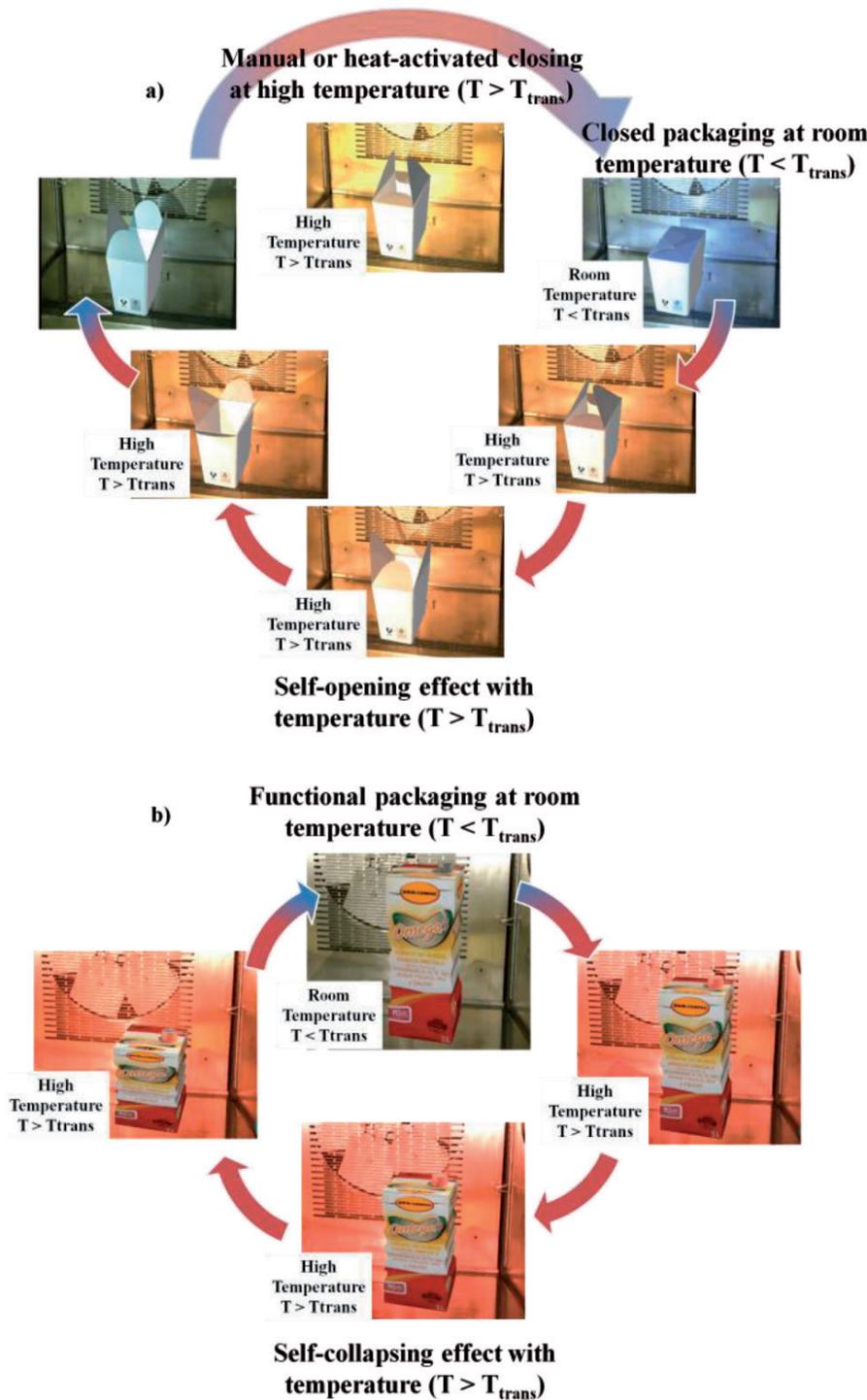


Fig. 2: a) Concepto demostrativo de un envase con apertura autónoma frente a la temperatura. b) Demostración del envase colapsando o comprimiéndose con la temperatura

nocimiento científico y de la creatividad de los diseñadores, donde la capacidad de movimiento del envase procede del cambio de forma de los materiales inteligentes cuando se exponen a temperaturas moderadas o altas [10-13]. A partir de este concepto ya presentado con celulosa activa, la misma respuesta se puede obtener empleando envases multicapa que presenten una lámina polimérica intermedia con capacidad de memoria de forma frente a la temperatura. De esta manera, la tecnología desarrollada podría implantarse en la cadena de valor de la industria

fabricante de envases de cartón laminado o *tetra-pack*, de igual modo que el PE [6,

16], para ampliar las propiedades funcionales y estéticas de los productos.

Cuando se calienta este envase hasta cierta temperatura, este puede cambiar su forma (expandirse o reorganizarse), e incluso abrirse para poder acceder al producto (por poner algunos ejemplos, abrirse a temperatura adecuada para el consumo de alimentos, efecto sorpresa en una cena con invitados, envoltorio de un regalo sorpresa, etc.) (Figura 2a y Vídeo 1 de la información complementaria).

El mismo efecto se puede aprovechar para diseñar envases que colapsen o se compriman con la temperatura y proporcionen soluciones capaces de adaptar su forma o tamaño al contenido. Así, esta estrategia permite ahorrar espacio o estimar la cantidad restante dentro del envase como una aproximación alternativa a otras investigaciones y diseños basados en retorcer o aplastar el envase [17, 18]. Además, este efecto de compresión autónoma puede contraer y compactar el envase para ahorrar espacio y facilitar el reciclaje, por ejemplo, tanto en la separación de envases en el hogar, como en su transporte (Figura 2b y Vídeo 2 de la información complementaria). Para este propósito, además, podrían aprovecharse, tanto el efecto de memoria simple con sólo dos formas en cada ciclo, como el efecto múltiple con diferentes formas intermedias al variar la temperatura.

En cuanto a los experimentos de demostración para visualizar los conceptos de diseño presentados y las actividades en materia de investigación, la Figura 3a muestra las propiedades térmicas del PCO entrecruzado con memoria de forma obtenidas en el segundo barrido del análisis DSC.

Como se observa en la Tabla I, la temperatura de activación del efecto de memoria de forma (T_{trans}) se corresponde con la temperatura de fusión ($T_m = 49,8^\circ\text{C}$) del material, y las respectivas temperaturas de inicio (T_{mo}) y final (T_{me}) de esta transición endotérmica se producen a 32°C y 55°C , respectivamente. Asimismo, la cristalinidad (% de cristalinidad= 28%) del polímero se

$$\% \text{ cristalinidad} = \frac{\Delta H_m \text{ (muestra)}}{\Delta H_m \text{ (PCO 100\% cristalino)}} \times 100 \quad (3)$$

	Segundo barrido		
	T_{mo} (°C)	T_m (°C)	T_{me} (°C)
PCO entrecruzado con DCP.	32,4	49,8	55,2

Tabla I: Propiedades térmicas del PCO entrecruzado (datos del segundo barrido de calentamiento)

calcula a partir de la entalpía de fusión ($\Delta H_m = 64 \text{ J g}^{-1}$) mediante la ecuación (3), donde la entalpía de fusión de un policicloocteno 100% cristalino es 230 J g^{-1} [26].

La figura 3b recoge los resultados del análisis DMTA, donde se observa como a bajas temperaturas el PCO en estado vítreo se caracteriza por un módulo de almacenamiento elevado debido a las cadenas amorfas rígidas y a los dominios cristalinos de la red polimérica. A medida que la temperatura aumenta por encima de la temperatura de transición vítrea (T_g), el módulo de almacenamiento (E') disminuye progresivamente hasta temperaturas cercanas a la temperatura de fusión. Ya por encima de T_m , el módulo decrece bruscamente hasta alcanzar un nivel dependiente de la densidad de entrecruzamiento, el cual proporciona estabilidad al material, dado que los enlaces covalentes del polímero entrecruzado evitan que este fluya como un líquido viscoso.

En cuanto a la capacidad de memoria de forma de la formulación, esta se demuestra en la Figura 4a y Figura 4b. En la primera fase del experimento termo-mecánico de tracción, la muestra se calienta por encima de la T_m correspondiente y se estira con una fuerza constante de 1N. A 80°C dicha tensión aplicada se mantiene durante 5 min y, seguidamente, la probeta se enfría muy por debajo de T_m bajo la misma tensión, proceso durante el cual la muestra contrae. Finalmente, tras 5 min a -10°C , la tensión de deformación se anula ($F=0$) y la forma temporal se fija. En este caso, la capacidad de fijación (R_f), calculada mediante la ecuación (1), alcanza un valor cercano al 25%, si bien se puede esperar una capacidad de fijación superior en función de las condiciones de ensayo [19].

Para finalizar el ensayo, tras 1 min a -10°C , el PCO se calienta nuevamente hasta 80°C y, tras un proceso de dilatación térmica, se produce el proceso de recuperación de la forma original cuando la temperatura alcanza la temperatura de fusión T_m , siendo dicha recuperación según la ecuación (2) prácticamente total ($R_r = 100\%$).

Una vez demostradas las propiedades de memoria de forma del material, en la Figura 5a se observa una imagen de un corte lateral del laminado multicapa, donde se aprecia que el espesor de la capa del PCO con memoria de forma alcanza las 770mm dentro de una estructura con un espesor total de 1mm.

Por su parte, en la Figura 5b se presenta el diseño en forma de flor empleado como demostrador. Como previamente se ha descrito, las aristas o pliegues de la

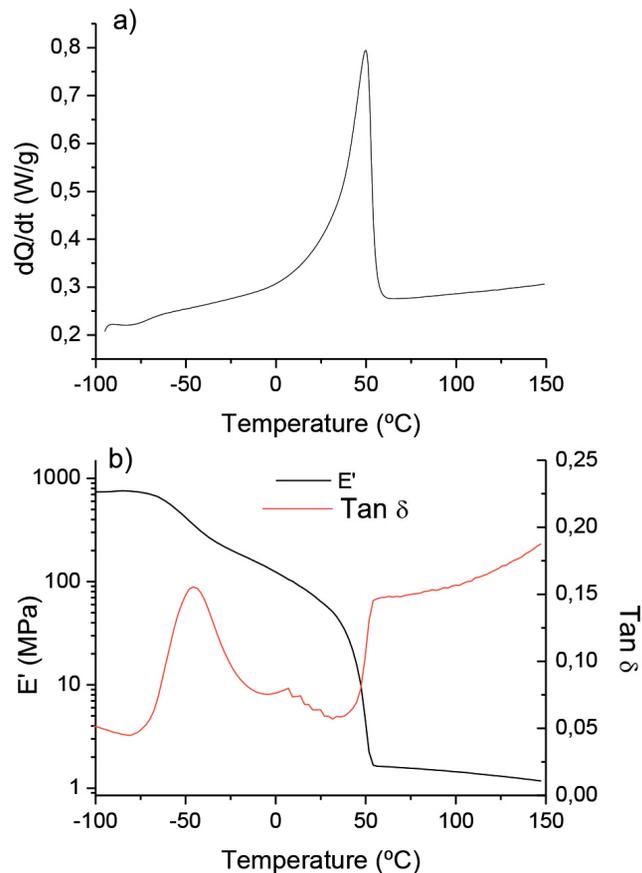


Fig. 3: a) Segundo barrido de calentamiento (DSC) del PCO con memoria de forma. b) Evolución del módulo de almacenamiento (E') y de la $\tan \delta$ con la temperatura para el PCO entrecruzado

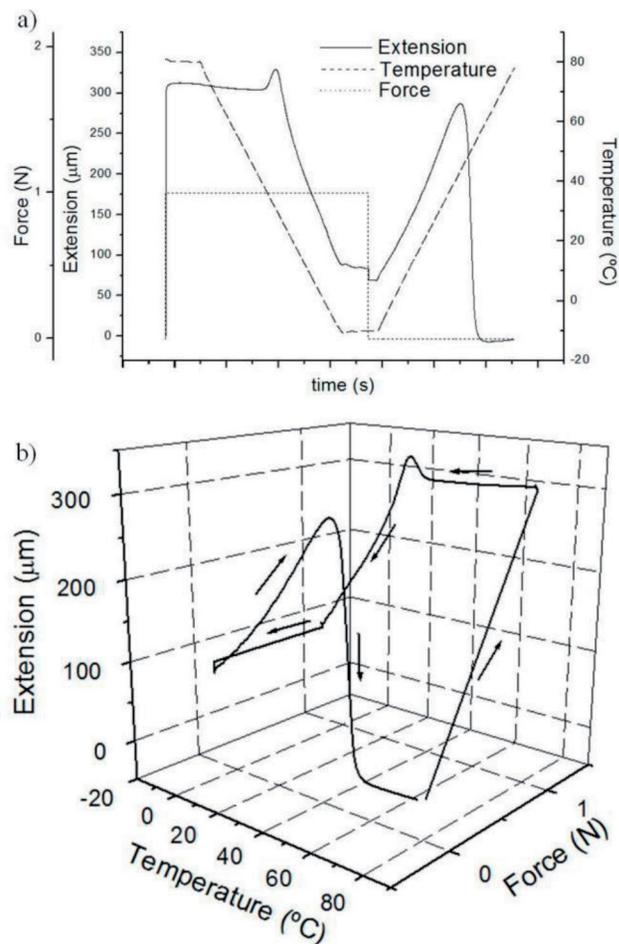


Fig. 4: a) Ciclo termo-mecánico del PCO entrecruzado. b) Propiedades de memoria de forma en modo tracción del PCO reticulado

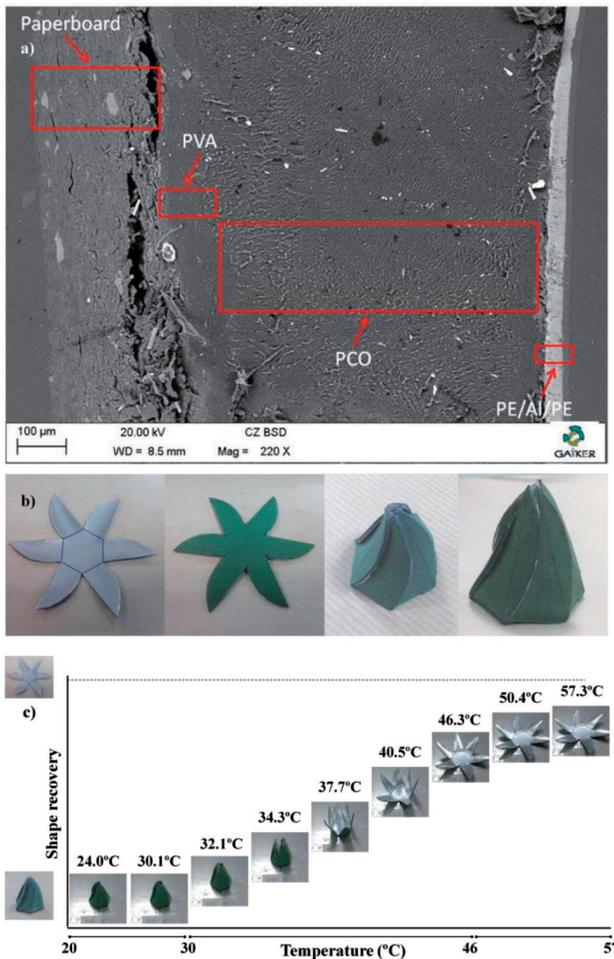


Fig. 5: a) Corte lateral de la estructura multicapa que incorpora la lámina interna de PCO con memoria de forma. b) Envase con forma de flor (abierto y plegado). c) Envase de apertura autónoma con la temperatura

muestra se calentaron localmente para poder plegar la estructura y alcanzar la forma de un envase cerrado. Seguido, tras fijar dicha forma cerrada mediante el enfriamiento de la estructura, el envase con memoria de forma se colocó en una placa de calefacción controlada y se registró el proceso de recuperación de la forma original con el calentamiento, a modo de demostración experimental, del envase con capacidad de apertura con la temperatura que se ha propuesto (Figura 5c y Video 3 de la información complementaria). Como se puede apreciar, el rango de actuación del efecto de recuperación de la forma concuerda con los resultados del análisis calorimétrico, y con el comportamiento termo-mecánico del polímero con memoria de forma desarrollado y caracterizado.

4. DISCUSIÓN

Las empresas ya identifican el valor fundamental que tiene un envase atractivo a la hora de generar una impresión positiva en los consumidores y llevar el producto al cliente objetivo. La forma, la textura y el color, entre muchos otros aspectos, atraen al consumidor, transmiten

sensación de calidad y mejoran la comunicación del mensaje que quiere transmitir la marca [20, 21].

En este escenario, envases que interactúen con el usuario a través de nuevas capacidades o funciones extra surgen como un nuevo concepto sorprendente y llamativo que hacen destacar al producto en venta. La capacidad de memoria de forma, por lo tanto, es una propiedad extra factible e intuitiva capaz de sorprender e ilusionar a las personas mediante, por ejemplo, la creación de envases que se abran o se cierren con la temperatura.

En este trabajo, tras primeramente identificar la temperatura de activación, se muestran las propiedades de memoria de forma de un PCO entrecruzado mediante un análisis termo-mecánico. De este modo, los autores amplían las posibilidades de un concepto ya demostrado por Inventa y el estudio de diseño Tomorrow Machine [22], donde se presentan cuencos que se expanden o envases que se abren, todos basados en un material celulósico capaz de actuar de forma mecánica. En particular, los autores proponen desarrollar este mismo comportamiento mediante la incorporación de una capa polimérica

ca con memoria de forma en envases de cartón. De tal forma que, si bien el diseño del demostrador conceptual presentado no está optimizado, se puede promover la unión entre creatividad, utilidad y sostenibilidad en productos que se beneficien de esta capacidad de actuación, considerando que la memoria de forma puede aprovecharse no solo durante el uso, sino también al final de la vida útil.

Por supuesto, la incorporación de los polímeros con memoria de forma en la tecnología de los envases debe considerar nuevos aspectos a nivel de diseño para aprovechar el efecto de memoria de forma sin detrimento de la función del envase según la aplicación específica. En este sentido, la industria debe siempre tener en cuenta el producto que envasa, quien es el comprador y como dicho producto es adquirido. En consecuencia, las capas del envase, el aspecto tridimensional del mismo y la versatilidad del diseño para sucesivas modificaciones en función de los nuevos productos a contener, deben valorar los conceptos estándares junto con el proceso de activación de la función extra, es decir, la modificación de la forma [23]. Estos materiales termo-mecánicamente activos, por lo tanto, implican una mayor complejidad a la hora del diseño para activar el efecto con la temperatura evitando cualquier fallo indeseado. Asimismo, de considerarse este tipo de polímeros con memoria de forma, sus propiedades y su capacidad de procesamiento deben ser analizadas y comparadas con los materiales convencionales empleados en el sector. Y, al igual que las poliolefinas, que son materiales muy populares y utilizados en botellas y envases de alimentos, ven afectadas sus propiedades y procesamiento por su composición química, cabe esperar lo mismo para cualquier nuevo polímero con memoria de forma contemplado. Precisamente, por eso cualquier problema relacionado con la densidad, la dilatación térmica, la temperatura de deformación, la resistencia química, la permeabilidad, el coeficiente de fricción, las propiedades mecánicas, la viscosidad, el contacto alimentario, la formación de film o la capacidad de laminación o adhesión cuando se combina con otros materiales, debe ser sopesado para lograr un envase totalmente funcional [24, 25].

Por consiguiente, en el caso de los envases de cartón laminado, la adecuada selección de materiales y el óptimo diseño del artículo se muestran esenciales para el éxito del producto, donde debe considerarse el número de capas, el espesor de las diferentes películas activas y pasivas, y el diseño de la caja abatible (bisagras,

pliegues, dobleces, etc.). Incluso este trabajo de diseño sería aún más complejo si se considerasen polímeros capaces de memorizar múltiples formas y recuperarlas de forma gradual con la temperatura [26], si bien podría surgir una gama de soluciones todavía más amplia si cabe. En definitiva, en la industria del envase cabrían esperarse desde efectos decorativos hasta funcionales gracias a estos nuevos envases de cartón laminado con memoria de forma activos y sensibles al entorno.

5. CONCLUSIONES

El envase es una potente herramienta de marketing, donde los diseños y funcionalidades innovadoras desempeñan un papel clave para captar la atención del consumidor. Las características visuales, los sonidos o las sensaciones táctiles pueden proporcionar al producto una gran ventaja competitiva [24, 27]. En este sentido, y a partir de diferentes soluciones, los envases mecano-activos se están convirtiendo en nuevas propuestas dentro del diseño del envase para fomentar la interacción con el cliente y comunicar la esencia de un producto o marca. En este punto, el desarrollo de envases mono o multicapa que incorporen polímeros con memoria de forma en su estructura puede convertirse en un concepto interesante de cara a proporcionar nuevas experiencias de desembalaje más interactivas. Así, por ejemplo, los cambios de forma del envase inducidos térmicamente podrían indicar al cliente si la comida está lista para el consumo. De este modo, envases que se expandiesen con la temperatura podrían diseñarse para ahorrar espacio y reaccionar frente a los líquidos calientes, de modo que se formase el envase o bol totalmente funcional para el consumo de alimentos deshidratados. También, el desembalaje con la temperatura podría convertirse en un nuevo elemento interactivo para regalos o juguetes. Por lo que, en definitiva, las compañías podrían diferenciarse a través de nuevos conceptos de envase que se abren o cierran cuando la temperatura sea la adecuada o la programada.

No obstante, aunque hay descritos gran variedad de polímeros con memoria de forma, esta posible idea necesita un estudio más profundo. El balance entre propiedades físico-químicas, los procesos de fabricación y la respuesta de cambio de forma durante el uso, requieren una mayor optimización. Aspectos relacionados con la regulación, con las limitaciones en el diseño o con el precio en cuanto al empleo de este tipo de polímeros activos

dentro de la industria del envase deben evaluarse cuidadosamente. Por ejemplo, en el caso particular del PCO, presentado en este trabajo, la mejora de su capacidad de procesado mediante la mezcla con otras poliolefinas y cargas, así como el empleo de métodos alternativos de entrecruzamiento para alcanzar productos más seguros y saludables, podrían ser algunos de los aspectos fundamentales a afrontar en un futuro para su aplicación en diferentes envases y aplicaciones.

REFERENCIAS

- [1] Liu C, Qin H, Mather P T. "Examen de los progresos alcanzados en polímeros con memoria de forma". *Oficial de química de los materiales*. De marzo de 2007. Vol.17 p.1543-1558. DOI: <https://doi.org/10.1039/B615954K>
- [2] Meng H, Hu J. "un breve examen de Estímulo-polímeros activos sensibles a la luz, térmicas, magnéticas, eléctricas y de agua/solvente estímulos". *Oficial de materiales inteligentes sistemas y estructuras*. En mayo de 2010. Vol.21-9 p.859-885
- [3] Radusch Kolesov H J, Gohs U et al. "Múltiples Shape-Memory Comportamiento de mezclas de Polietileno/Polycyclooctene Cross-Linked por irradiación de electrones". *Los materiales y la ingeniería macromolecular*. Vol.297-12 p.1225-1234. DOI: <https://doi.org/10.1002/mame.201200204>
- [4] F. A. Paine. *El embalaje Manual del usuario*. 1ª edición. Nos Springer, 1991. 596 págs. ISBN: 978-1-4613-1483-7
- [5] Marvin Magasura. 26 expertos comparten ideas sobre 2018 Tendencias de embalaje y embalaje sostenible [en línea]. Montreal: GlobalVision. Disponible en Web: < <https://www.globalvisioninc.com/blog/sustainable-packaging-design-expert-roundup/> >
- [6] Raheem D. "Aplicación de plástico y papel como materiales de embalaje de alimentos - Una visión general". *Emiratos oficial de Alimentos y Agricultura*, noviembre de 2017. Vol.25-3 p.177-188, DOI:<https://doi.org/10.9755/efjfa.v25i3.11509>.
- [7] A. "Kausar Compuesto de poliuretano Espumas en aplicaciones de alto rendimiento: Una revisión". *Polymer-Plastics tecnología e ingeniería*. De junio de 2017. Vol.57-4. DOI: <https://doi.org/10.1080/03602559.2017.1329433>
- [8] Kang S M S J, Lee, Kim B K. "espumas de poliuretano con memoria de forma". *Polímero eXPRESS cartas*. De enero de 2012. Vol.6-1 p.63-69. DOI: <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2012.7>
- [9] I A Rousseau, Owens J N, Berger E J, et al. *Envasado y embalaje de los métodos utilizando polímeros con memoria de forma*. Operaciones de tecnología global de GM, Inc. US20100301512. 2010-12-2
- [10] Granberg H, Lindström M, Forsberg S, Berthold F, Razavi F, Holmberg V, Béland M C. *Movimiento mecano controlada de materias activas*. Innventia AB. US20110151156. 2011-06-23
- [11] Berthold F, Lindström M, un Nylinder Granberg, H, J, H Sojakka Béland M C. *material sándwich*. Innventia AB. No 2014083200. 2014-06-05
- [12] Granberg H. "textil-como envases de papel". Más allá. Vol4/2014 p.4
- [13] Angela Montagud. 100% auto-sostenible embalajes de apertura [en línea]. Valencia: Más con menos, mayo de 2014. Disponible en Web: < <http://morewithlessdesign.com/sustainable-self-opening-packaging/> >
- [14] Simone Hellyer. Edición especial: los envases activos e inteligentes [en línea]. William Reed Business Media Ltd, Inglaterra: 24 de septiembre de 2014, Última actualización

- el 25 de septiembre de 2014. Disponible en Web: < https://www.bakeryandsnacks.com/Article/2014/09/25/Active-and-Intelligent-packaging-Tomorrow-Machine?utm_source=copyright&utm_medium=OnSite&utm_campaign=copyright >
- [15] El papel y el cartón tienen papeles clave en el embalaje del futuro [en línea]. La tecnología de envasado de hoy. RDG Media, Inc.: 19 de febrero de 2018. Disponible en Web: < <http://www.packagingtechtoday.com/news-headlines/paper-board-key-roles-future-packaging/> >
- [16] Mark J. Kirwan. *El Manual de Tecnología de envases de papel y cartón*. 2ª edición. Londres: Wiley-Blackwell, 2013. 428 págs. ISBN: 978-0-470-67066-8
- [17] Robin Nierynck. Coca-Cola lanza 'twist' ayuda a la botella de agua reciclaje [en línea]. Medio ambiente Media Group Ltd, Reino Unido: 14 de diciembre de 2016. Disponible en Web: < <https://www.letsrecycle.com/news/latest-news/coca-cola-launches-twist-water-bottle-for-recycling/> >
- [18] Fredrik Rosen. Innovación Expo: Dynamodic por lugar [en línea]. La Confederación de Industrias Papeleras Europeas, Bruselas, 22 de noviembre de 2017. Disponible en Web: < <http://www.cepi.org/system/files/public/documents/events/EuropeanPaperWeek2017/ExhibitBrochureReadyToPrintfinal.pdf> >
- [19] Cuevas J M, Laza J M, Rubio R, et al. "Desarrollo y caracterización de semi-cristalino polyalkenamer basado en polímeros con memoria de forma". *Materiales y Estructuras Inteligentes*. Febrero de 2011. Vol.20-3-035003. DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/3/035003>
- [20] Mazhar M, Daud S, Bhutto S, et al. "Impacto del envase del producto sobre el comportamiento de compra de los consumidores: Evidencia de Karachi". *Oficial de la comercialización y la investigación del consumidor*. En el año 2015. Vol.16 p.35-42
- [21] Wells L E Farley H, Armstrong G A. "la importancia de packagingdesign para marcas de alimentos de marca propia". *Revista Internacional de distribución y Retail Management*. 2007. Vol.35-9, pp.677-690, <https://doi.org/10.1108/09590550710773237>
- Marianne Lockner [22]. *Paquete sueco finalistas diseño* [en línea]. Estocolmo: Aumento Innventia AB, de junio de 2013. Disponible en Web: < <http://www.innventia.com/en/About-us/News1/Prizewinning-Swedish-package-design/> >
- [23] Kelly Morr. La guía definitiva para el empaquetado del producto diseño [en línea]. 99designs Pty Ltd, Australia: 2016. Disponible en Web: < <https://99designs.es/blog/tips/ultimate-guide-to-product-packaging-design/> >
- [24] Novák, I, A, Z Špitalský Popelka, Krupa I, S. *Poliolefina Tavman en el envasado y la industria alimentaria*. En: Al-Ali AIMA'adeed M, Krupa I (eds) *compuestos y materiales de poliolefina*. Springer Serie en Polímeros y materiales compuestos. Springer, Cham, 2016, 354 págs. ISBN: 978-3-319-25982-6
- [25] Riley A. *Papel y cartón de embalaje*. En: Emblema, emblema H (eds) *de la tecnología de envasado - Fundamentos, Materiales y Procesos*, Woodhead Publishing Limited, 2012, 600 págs. ISBN: 978-1-84569-665-8
- [26] Xie T. "sintonizables de polímeros con memoria de forma multi-efecto". *La naturaleza*. En marzo de 2010. Vol.464 p.267-270. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature08863>
- [27] Rodríguez-Parada L, Mayuet P.F., Bienvenido R. "Diseño de envases de alimentos: Caso de estudio sobre la percepción de las formas y relieves termoformado". *Actuaciones de TMCE* 2018. Mayo 2018. p.487-494. ISBN: 978-94-6186-910-4

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Gobierno Vasco la financiación recibida (Grupos de Investigación, IT718-13).