
Reciclado mecánico de residuos plásticos. Caso práctico: Poliestireno de alto impacto para la fabricación de componentes de TV

E. Franco-Urquiza*¹, H.E. Ferrando², D.P. Luis¹ y M.LI. Maspoch²

¹Catedrático CONACyT, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Playa Pie de la Cuesta 702, Desarrollo San Pablo, 76130. Querétaro, México. ²Centre Català del Plàstic, Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona Tech. Edifici Vapor Universitari de Terrassa, Colom 114, 08222. Terrassa, España.

*Mechanical recycling of plastic wastes. Case of study: High Impact
Polystyrene for manufacturing TV components shelf*

*Reciclatge mecànic de residus plàstics. Cas pràctic: Poliestirè d'alt
impacte per a la fabricació de components de TV*

Recibido: 20 de octubre de 2015; revisado: 7 de diciembre de 2015; aceptado: 15 de enero de 2016

RESUMEN

En este trabajo se presenta una introducción sobre la situación actual del reciclaje de los materiales plásticos a nivel mundial, con un especial interés en la situación en la que se encuentra el estado Europeo. A pesar de que existen numerosas técnicas de reciclado de plásticos, el método de reciclado mecánico ha llamado mucho la atención por parte de las industrias transformadoras del plástico debido a la capacidad de producción que puede llevarse a cabo mediante el uso de técnicas como la extrusión y la inyección de plásticos. La parte final de este trabajo se enfoca en un caso práctico que se llevó a cabo en el Centre Català del Plàstic (CCP) y la empresa SONY para la obtención de materiales plásticos reciclables para manufacturar carcasas de televisiones. El trabajo realizado en el CCP fue el estudio de la viabilidad de la sustitución de materiales vírgenes por materiales reciclados procedentes de residuos industriales. El estudio consistió en analizar la viabilidad de sustituir un poliestireno antichoque (HIPS) virgen por el mismo material de origen pero reciclado. De esta manera, se compararon las propiedades de cuatro materiales HIPS reciclados (HIPS-RA, -RB, -RC y -RD) así como un estudio de su morfología. Se observó que el índice de fluidez del HIPS aumentó con la proporción de material reciclado y con el número de procesos de transformación. La propiedad mecánica más afectada resultó ser la resistencia al impacto, y se observaron dos tipos de morfologías claramente diferentes. El material reciclado que mostró mejores propiedades fue el HIPS-RB, y fue escogido para sustituir al HIPS virgen en la producción de componentes de electrónica de consumo. Finalmente, el estudio realizado permitió analizar los factores que intervienen en el estudio de materiales reciclados, conocer las posibilidades de su aplicación en el caso concreto de componentes de electrónica de consumo y crear las ba-

ses para poder establecer una metodología para realizar futuros estudios de introducción de materiales reciclados en otras aplicaciones tecnológicas.

Por lo anterior, el trabajo presenta una completa introducción en el área del reciclaje mecánico y las tendencias del mercado así como la viabilidad del reaprovechamiento de materiales de residuo para el desarrollo de componentes no estructurales y de elevada producción industrial.

Palabras clave: Reciclaje; residuos plásticos; reciclaje mecánico; HIPS.

SUMMARY

This paper presents an overview of the current situation about the global recycling of plastic wastes materials, with special interest on the European market. In spite of diverse techniques for recycling plastic wastes exist, the mechanical recycling approach has attracted the attention of the Plastics Processing Industry because of the production capacity that can be accomplished by using techniques such as extrusion and plastic injection. The final part of this work focuses on a case study that was conducted by the Centre Català del Plàstic (CCP) and the SONY Company to be able in using recycled plastics for manufacturing TV shelves. The work done at CCP was to study the feasibility of replacing virgin materials with recycled plastics from industrial wastes. The study was to analyze the feasibility of replacing virgin high impact polystyrene (HIPS) by the same source material but recycled. Thereby, the properties of four recycled HIPS (HIPS-RA -RB, -RC and -RD) as well as the study of their morphol-

*Autor para la correspondencia: edgar.franco@cidesi.edu.mx

ogy were compared. It was observed that the melt flow rate of HIPS increased with the proportion of recycled material and the number of transformation processes. Impact resistance was the most affected mechanical parameter and two types of clearly different morphologies were observed. HIPS-RB was the recycled material that showed better properties reason this was chosen to replace the virgin HIPS for the production of TV shelves. This work allowed analyzing the factors involved during the study of recycled materials, identifying opportunities for their application in the case of TV shelves and providing a basis to establish a methodology for future studies related to recycled plastics for distinct applications. The work presented shows a comprehensive introduction in the area of mechanical recycling and market trends as well as the feasibility for reusing plastic wastes for the development of non-structural components and high industrial production.

Keywords: Recycling; plastic wastes; mechanical recycling; HIPS.

RESUM

En aquest treball es presenta una introducció sobre la situació actual del reciclatge dels materials plàstics a nivell mundial, amb un especial interès en la situació en què es troba l'estat Europeu. Tot i que existeixen nombroses tècniques de reciclatge de plàstics, el mètode de reciclatge mecànic ha cridat molt l'atenció per part de les indústries transformadores del plàstic a causa de la capacitat de producció que es pot dur a terme mitjançant l'ús de tècniques com l'extrusió i la injecció de plàstics. La part final d'aquest treball s'enfoca en un cas pràctic que es va dur a terme al Centre Català del Plàstic (CCP) i l'empresa SONY per a l'obtenció de materials plàstics reciclables per manufacturar carcasses de televisions. El treball realitzat en el CCP va ser l'estudi de la viabilitat de la substitució de materials verges per materials reciclats procedents de residus industrials. L'estudi va consistir en analitzar la viabilitat de substituir un poliestirè anti-xoc (HIPS) verge pel mateix material d'origen però reciclat. D'aquesta manera, es van comparar les propietats de quatre materials HIPS reciclats (HIPS-RA, -Rb, -RC i -RD) així com un estudi de la seva morfologia. Es va observar que l'índex de fluïdesa del HIPS va augmentar amb la proporció de material reciclat i amb el nombre de processos de transformació. La propietat mecànica més afectada va resultar ser la resistència a l'impacte, i es van observar dos tipus de morfologies clarament diferents. El material reciclat que va mostrar millors propietats va ser el HIPS-RB, i va ser escollit per substituir el HIPS verge a la producció de components d'electrònica de consum. Finalment, l'estudi realitzat va permetre analitzar els factors que intervenen en l'estudi de materials reciclats, conèixer les possibilitats de la seva aplicació en el cas concret de components d'electrònica de consum i crear les bases per poder establir una metodologia per realitzar futurs estudis d'introducció de materials reciclats en altres aplicacions tecnològiques.

Per l'anterior, el treball presenta una completa introducció a l'àrea del reciclatge mecànic i les tendències del mercat així com la viabilitat del reaprofitament de mate-

rials de residu per al desenvolupament de components no estructurals i d'elevada producció industrial.

Paraules clau: Reciclatge; residus plàstics; reciclatge mecànic; HIPS.

PARTE I. REVALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE MATERIALES PLÁSTICOS

INTRODUCCIÓN

Los materiales plásticos juegan un papel importante en casi todos los aspectos de la vida cotidiana. Los plásticos se utilizan para la fabricación de productos de consumo tales como envases de bebidas y contenedores de alimentos, por ejemplo. El uso generalizado de plásticos exige una buena gestión del límite de vida del producto hasta su desecho. En las últimas décadas, los plásticos han presentado un crecimiento continuo en la cantidad de residuos sólidos urbanos, un aumento realmente notorio desde 1960, cuando los plásticos representaron menos del 1% de los desechos sólidos urbanos.

Hoy en día, el consumo de materiales plásticos no sólo se encuentra en el sector de envase y embalaje, sino también dentro otros sectores industriales, dentro de los cuales se pueden destacar el sector de bienes duraderos como los electrodomésticos, automoción, muebles; así como también los bienes no duraderos o desechables como los pañales, bolsas de basura, y utensilios médicos. La generación de residuos y su manejo adecuado son dos de los grandes retos que enfrentan la sociedad para garantizar su viabilidad y sustentabilidad.

En la Figura 1 se muestra la evolución en la producción mundial de materiales plásticos, y es comparada con la producción en Europa, observando que a nivel mundial se ha venido produciendo un crecimiento continuo desde 1950 hasta la actualidad. Este aumento en la producción y consumo de materiales plásticos, junto con el hecho de que una parte importante de su producción se destina a aplicaciones con una vida útil corta o media (menos de 5 años), ha provocado un fuerte crecimiento en la generación de residuos plásticos. La baja densidad de éstos residuos es muy notoria (representa entre un 18% y un 20% en volumen de los residuos sólidos urbanos) y, debido a su elevada resistencia al envejecimiento ambiental, se conservan durante muchos años [1].

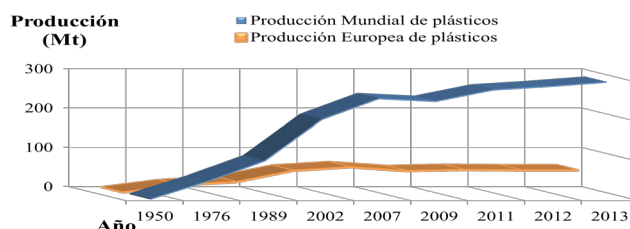


Figura 1. Producción mundial de plásticos 1950-2013. Adaptado de la referencia [2].

Debido a que la producción masiva materiales plásticos conduce a una extensa generación de residuos plásticos, su disposición (impulsada por las influencias comerciales, ambientales y reglamentos) se ha convertido cada vez más en un tema de elevada relevancia para la industria de transformación del plástico. En la actualidad existen varios métodos para el reciclaje de los residuos plásticos, dentro de los cuales es posible destacar el método del reciclado mecánico, el método de reciclaje químico y el método de recuperación energética.:

- Reciclado mecánico: consiste en la clasificación, trituración y limpieza. En algunos casos, como por ejemplo el Tereftalato de polietileno (PET), se venden las escamas del material recuperado. Sin embargo, en la mayoría de los termoplásticos se finaliza el reciclado mecánico mediante un granceado (peletizado) y venta de los pellets obtenidos [3]-[8]
- Reciclado químico: las macromoléculas presentes en los residuos plásticos se reducen mediante diferentes procesos (pirólisis, glicólisis, hidrólisis o alcoholisis) hasta obtener los monómeros iniciales o moléculas de bajo peso molecular que pueden servir de materia prima para la polimerización [9], [10].

Recuperación energética: el residuo plástico se emplea como combustible para producir electricidad, vapor o calor en procesos industriales .

En la Figura 2 se presenta la cadena de valor de los plásticos, su consumo, la generación de residuos y su gestión en Europa (UE 27 + Noruega + Suiza) durante el año 2013 [2]. Se estima que las cifras presentadas en ese año no variarán mucho respecto al 2014. Las cifras resumidas para Europa muestran que:

La producción total de plásticos alcanzó los 57 millones de toneladas, un 3.5% mayor respecto al año 2009, aunque la mayor producción de plásticos en Europa fue de 65 millones de toneladas en 2007.

La demanda de la industria de transformación fue de 46.3 millones de toneladas, un 4.5% más que en 2009.

Los residuos post-consumo fueron de 25 millones de toneladas, casi un 3% más que en 2009. De éstos, 9.5 millones de toneladas no se recuperaron y 15.5 millones sí fueron reutilizados.

La cantidad de plástico reciclado mecánicamente en 2013 fue de 6.5 millones de toneladas, mientras que la cantidad de energía recuperada fue de 9 millones de toneladas. Lo anterior representó un aumento del 8.7% y del 9.8% respectivamente en relación al año 2009.

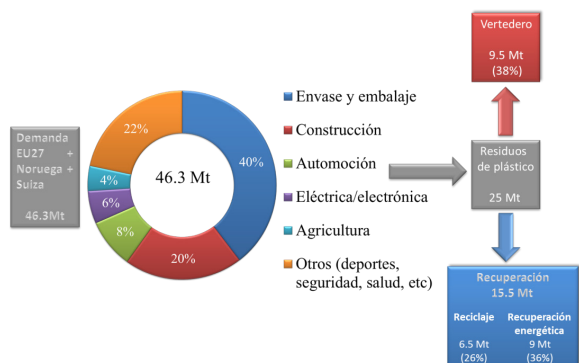


Figura 2. La cadena de valor de los plásticos. Situación en Europa (unión europea 27 miembros más Noruega y Suiza) en 2013. Adaptado de la referencia [2].

Gracias a las mejoras continuas en la gestión de los plásticos al final de su vida útil y a una creciente concienciación de la población, la cantidad de plásticos que termina en los vertederos disminuye constantemente. En la figura 2 se observa que un 62 % de los residuos plásticos generados durante el año 2013 en Europa fue recuperado; no obstante, solamente el 26% fue reciclado mecánicamente, indicando que deberían intensificarse los esfuerzos para aprovechar todo el potencial de dichos residuos. Uno de los mayores inconvenientes que se tenía hasta hace unos años fue que para el reciclado mecánico no existían estándares para evaluar la calidad de los plásticos post-consumo en los productos reciclados. En este sentido, en septiembre de 2009 se puso en marcha un proyecto de 3 años de duración (EuCertPlast), creado por la Comisión Europea en el marco del programa Eco-Innovación, que tiene como objetivo la creación de una certificación europea para aquellos agentes de reciclaje que cumplan con estándares de calidad. El proyecto tuvo un aceptable nivel de éxito, y hoy en día es posible lograr la certificación siguiendo las especificaciones y requerimientos de EuCertPlast para llevar a cabo el reciclado mecánico de los residuos plásticos, así como el diseño, la fabricación y el uso de productos reciclados en Europa.

La voluntad de reducir y aprovechar los residuos plásticos generados en las industrias, tanto por el impacto que provocan sobre el medio ambiente como por el coste económico que suponen, está motivando a muchas empresas del sector del plástico a estudiar la viabilidad de recuperar los materiales residuales de los procesos de transformación [1], [2], [7], [11]-[14]

Reciclaje mecánico de materiales termoplásticos

En el año 2014 se celebró en París una nueva edición del congreso internacional Identiplast, donde uno de los puntos de mayor interés se centró en alcanzar, con la colaboración de todos los actores de la industria, el objetivo común de que en el año 2020 ningún residuo plástico se envíe a los vertederos, ya que esto resulta costoso, ocupa un espacio considerable, conlleva un rechazo social y promueve daños al medio ambiente. Esto ha sido una de las acciones más significativas para la reducción de residuos plásticos a nivel internacional.

Una de las vías industriales más accesibles para reutilizar desechos plásticos es implementar la técnica del reciclado mecánico [5]-[7], [14]-[16] que es un proceso físico mediante el cual el plástico post-consumo o el industrial (scrap) es recuperado, permitiendo su posterior utilización en la transformación de un producto.

El reciclado mecánico está enfocado principalmente a los polímeros termoplásticos por el hecho de presentar una arquitectura molecular no reticulada, lo cual permite moldearlos con temperatura y presión. Además de representar el 75% del mercado de los polímeros.

Los residuos termoplásticos pueden provenir de la industria de la transformación (residuos industriales) o de distinto flujos (residuos postconsumo de envase y embalaje, eléctrico-electrónico, agricultura, vehículos fuera de uso, etc). Los residuos plásticos industriales presentan, como el material virgen, una ausencia completa de suciedad e impurezas y se encuentran poco degradados, por tanto su viabilidad de reciclaje es muy grande. Sin embargo, los residuos postconsumo requieren, como mínimo, de una separación por tipo de polímero y de un proceso de lavado, aunque la complejidad del tratamiento varía en

cada caso. En función del flujo del que provenga el residuo, el reciclado mecánico será más o menos viable [8], [11]. En algunos casos (por ejemplo, residuos plásticos agrícolas) el material a reciclar, además de encontrarse muy sucio, puede estar bastante degradado por efecto de la exposición a la intemperie [6].

Para que el proceso de reciclado mecánico pueda ser viable, de forma ideal, se tienen de dar las siguientes circunstancias:

- Recogida en cantidades suficientes para que sea viable industrial y económicamente.
- Diseño de los componentes pensando en el fin de vida (ecodiseño). Se deberían poder desmontar con facilidad y estar fabricados de un solo tipo de material.
- Ausencia de materiales o partículas extrañas que pudieran dañar los equipos de transformación o alterar las características del plástico.
- Que el material no presente excesiva degradación.

El proceso de reciclaje mecánico de materiales plásticos pasa por muchas etapas que dependen en parte del origen del material que se pretende reciclar. En el caso de la recuperación de los plásticos presentes en la recogida selectiva, son necesarias unas etapas de separación de los diferentes grupos de materiales poliméricos para aislar el material deseado. Los métodos de separación empleados de forma más habitual son: el método de flotación, hidrociclón y centrifugación. Existen otros métodos que se encuentran en fase de experimentación, de momento son poco utilizados, como los de disolución selectiva, separación electroestática, separación por láser o separación espectroscópica [17], [18]

]Cuando se dispone del plástico deseado, se necesita adecuar el residuo con el objetivo de obtener un material de alta calidad. Normalmente esta fase consiste en dos tratamientos:

Purificación, el cual consiste en la trituración, separación de las partículas metálicas, lavado y secado del residuo. Mezclado, el cual consiste en la modificación física, modificación por aditivos, mezcla física, extrusión (plastificación, homogeneización y desgasificación).

Con la combinación de estos dos tratamientos, el material resultante puede llegar a ser altamente competitivo, y en ocasiones puede llegar a cubrir la demanda equivalente a un polímero virgen.

Métodos de pretratamiento

Las etapas del método de pretratamiento suelen ser las siguientes:

Trituración: la trituración consiste en dar al plástico la forma y medida que sea compatible con los procesos de transformación que se utilizarán posteriormente. Esta operación se lleva a cabo mediante molinos, cortadoras u otros equipos similares.

Separación de las partículas metálicas: la detección y separación de las partículas metálicas presentes en los residuos plásticos que se van a reciclar es una etapa fundamental para evitar posibles daños en los equipos utilizados durante el proceso de reciclado, así como para mejorar la calidad del material reciclado. Los métodos más utilizados son los detectores y separadores inductivos de metales.

Lavado: es un proceso imprescindible para el reciclado de materiales plásticos postconsumo que muchas veces presenta numerosas impurezas adheridas. La efectividad

del lavado tiene una gran influencia en la calidad final del material reciclado. Cuantas más impurezas contenga el reciclado más problemas y paradas técnicas se producirán durante el procesado posterior y encarecerán el proceso. Normalmente el lavado se realiza con agua, aunque también se pueden utilizar otras sustancias. Esta etapa se puede integrar a la de separación y/o a la de trituración.

Modificación física: en algunos casos en que no sea económicamente viable la separación de dos o más polímeros, es interesante estudiar la posibilidad de crear una mezcla de polímeros que presente buenas propiedades mecánicas. En el caso de mezclas incompatibles, es necesario utilizar un agente compatibilizador que garantice la cohesión entre los diferentes componentes. De esta forma se consigue un triple objetivo: simplificar la etapa de separación de los residuos, unificar los sistemas de tratamiento y transformación, y mejorar la competitividad del producto, ya que las mezclas obtenidas son materiales “nuevos” que pueden tener propiedades mejoradas que los componentes individuales de partida, y por tanto pueden competir directamente con las demandas de los materiales vírgenes.

Modificación por aditivos: La adición de aditivos a los plásticos es una práctica habitual y necesaria que tiene como objetivo mejorar sus propiedades y su procesabilidad. Como ejemplo de aplicación de aditivos, en la fabricación de tuberías a partir de plásticos procedentes de films de embalaje se requiere de la adición de antioxidantes, cargas minerales y modificadores de impacto [19]. En la tabla 1 se indican los tipos de aditivos más utilizados en los polímeros y el efecto que producen.

Tabla 1. Principales tipos de aditivos y sus efectos [1]

TIPO DE ADITIVO	EFEECTO
Antioxidantes	Prevención de reacciones de degradación por oxidación
Lubricantes	Modificación de las propiedades de transformación en la etapa de plastificación
Ignifugantes	Mejora de las propiedades de resistencia a la llama
Cargas	Aumento del módulo de elasticidad y disminución del precio
Pigmentos	Modificación del color
Plastificantes	Aumento de la fluidez
Nucleantes	Facilitación de la cristalización
Modificadores de impacto	Aumento de la resistencia al impacto
Agentes de aco-plamiento	Mejora de la adhesión de una segunda fase a la matriz polimérica

Mezcla física: El objetivo de esta etapa es garantizar la homogeneidad del material para evitar segregaciones de sus componentes en etapas posteriores. Con este tipo de mezclado se consigue una distribución homogénea de los aditivos.

Extrusión (plastificación, homogeneización y desgasificación): En esta etapa el material reciclado es extruido con un cierto porcentaje de material virgen. La extrusión permite asegurar la máxima homogeneidad del material. Posterior a su granceado, el material puede ser transformado en un nuevo componente o pieza.

Medidas para optimizar el reciclado mecánico de los plásticos

En la tabla 2 se detallan las medidas que hay que tener en cuenta en todo el proceso de desarrollo de un producto para favorecer su posterior reciclaje.

Tabla 2. Medidas para optimizar el reciclaje de los materiales plásticos [14], [16]

MEDIDA	ETAPA EN EL DESARROLLO DEL PRODUCTO	EFEECTO EN EL RECICLAJE
Minimización de material	Elección material Diseño	Minimiza residuos
Preferencia por termoplásticos	Elección de material	Posibilita el reciclaje
Preferencia por macroestructuras homogéneas	Elección de material	Posibilita el reciclaje
Caracterización del material	Elección de material Diseño	Optimiza el desmontaje y la clasificación
Volúmenes y espesores pequeños	Diseño	Minimiza residuos Optimiza el desmontaje y la clasificación
Refuerzo sin cargas minerales	Diseño	Posibilita el reciclaje
Aplicación de uniones lineales en vez de superficiales	Diseño Proceso de transformación Aplicación	Optimiza el desmontaje y la clasificación
El proceso de transformación se adapta al material y no al revés	Diseño Aplicación	Optimiza el desmontaje y la clasificación
Optimización del proceso de transformación para minimizar la degradación	Proceso de transformación	Posibilita el reciclaje
Minimización de los residuos del proceso de transformación	Proceso de transformación	Minimiza residuos
Posibilitar la separación y el desmontaje en piezas y materiales	Aplicación	Minimiza residuos Optimiza el desmontaje y la clasificación Reutiliza las piezas
Definición o delimitación de piezas y zonas con tensiones internas altas y bajas	Aplicación	Minimiza residuos Optimiza el desmontaje y la clasificación
Definición y delimitación de piezas contaminadas o defectuosas	Aplicación	Minimiza residuos Posibilita el reprocesado y la reutilización por separado

Parte II. Caso práctico: viabilidad de utilización de HIPS reciclado para la fabricación de componentes de TV

Muchos trabajos sobre aplicaciones de materiales plásticos reciclados se han centrado en componentes o aplicaciones de bajo valor añadido, como por ejemplo films, tuberías, mobiliario urbano, etc [20][21]. En el estudio que se resume a continuación se ha querido innovar con la investigación en aplicaciones tecnológicas para materiales reciclados, concretamente para el sector de la electrónica de consumo. Este estudio se llevó a cabo en el Centro Catalán del Plástico (CCP) y la Universidad Politécnica de Cataluña Barcelona Tech [5], y formó parte de un proyecto de investigación más amplio encargado al CCP por una empresa armadora de televisiones a nivel mundial.

Objetivos del estudio

- Estudiar la viabilidad de la sustitución de un poliestireno de alto impacto (HIPS) virgen por uno reciclado.
- Determinar los factores que más inciden en la calidad del HIPS reciclado.
- Seleccionar el material más adecuado de entre cuatro HIPS reciclados para sustituir total o parcialmente el material virgen.

Poliestireno de alto impacto

El poliestireno de alto impacto, conocido por el acrónimo en inglés HIPS (*high-impact polystyren*), es un termoplástico amorfo de la familia de los estirénicos. Apareció en el mercado en la década de los cincuenta como un intento de mejorar las propiedades del poliestireno (PS), el cual resultaba excesivamente frágil para determinadas aplicaciones [22].

El HIPS se caracteriza por la presencia de partículas elastoméricas en inversión de fase que proporcionan una alta resistencia al impacto, que puede llegar a ser hasta 10 veces superior a la del Poliestireno (PS). El elastómero más utilizado actualmente es el polibutadieno (PB) en una proporción entre el 5 y el 35% en peso. Sin embargo, debido a la inversión de fase, el porcentaje en volumen o volumen efectivo de la fase elastomérica puede llegar a representar entre un 20 y un 40% del volumen del material. En la figura 3, se muestra una micrografía obtenida por microscopía electrónica de transmisión (MET) de la morfología de un HIPS. Se observa que el material está constituido por una matriz de PS con partículas de PB. Sin embargo, estas partículas no son exclusivamente de polibutadieno (zonas oscuras en la micrografía), sino que debido al método de síntesis utilizado, se consigue que las partículas de PB contengan inclusiones poliestirénicas (zonas más claras en la micrografía). Este tipo de estructura se conoce como estructura salami o granada. El diámetro y el porcentaje en volumen de las partículas, así como su distribución, son aspectos morfológicos que influyen en las propiedades finales del HIPS [5], [23]

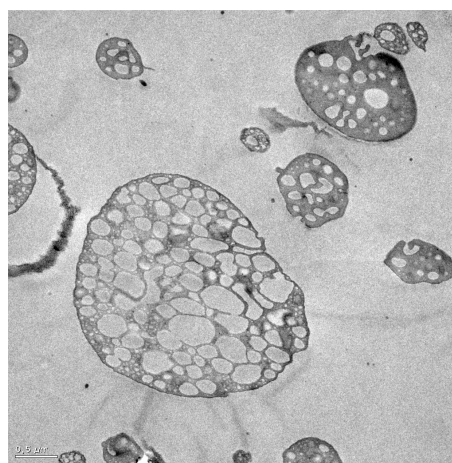


Figura 3: Micrografía MET del HIPS virgen utilizado en este estudio [19].

Algunas de las aplicaciones del HIPS son: Componentes para automóviles, juguetes, maquinillas de afeitar desechables, teclados y periféricos para ordenadores, artículos para el hogar, equipos audiovisuales (radios, televisores, lectores de CD...), teléfonos, envases de productos lácteos, etc.

Selección del material reciclado

El aprovechamiento de residuos de HIPS procedentes del sector de la electrónica de consumo ha sido objeto de diversos estudios [3], [7], [8], [13], [15], [24], [25]. En todos los casos el material muestra una gran estabilidad a ser reprocesado (hasta 8 veces a 220°C [5]) sin una variación importante de sus propiedades, sólo se detecta una disminución de la deformación a rotura.

Incluso en el caso del reciclado de televisores postconsumo por trituración de los aparatos seguido por una separación por flotación, se obtuvo un HIPS con unas propiedades similares a las del material virgen [26].

El enfoque del estudio que aquí se presenta es inverso al de los trabajos antes mencionados. Lo que se pretende en este caso es el reaprovechamiento de residuos de HIPS procedentes de diferentes orígenes para aplicaciones en el sector de la electrónica. Para ello se dispuso de 4 materiales HIPS reciclado, proporcionados por diferentes recicladores. Estos materiales se caracterizaron y compararon con el HIPS virgen utilizado habitualmente por la empresa SONY para la fabricación de los marcos o carcasas de los televisores. Adicionalmente se caracterizó un material que procedía de la trituración de piezas de componentes electrónicos fabricados con el HIPS virgen. En la tabla 3 se indican los materiales utilizados en este trabajo y su nomenclatura.

Tabla 3. Descripción de los materiales estudiados

CODIGO	ORIGEN	OBSERVACIÓN
HIPS-V	Material virgen	ATO 4241 HB
HIPS-RO	Material recuperado	Trituración de piezas de componentes de electrónica de consumo
HIPS-RA	Material reciclado A	Residuo de puertas de frigoríficos
HIPS-RB	Material reciclado B	Residuo de láminas termoconformadas para envases ligeros de un solo uso (p. e. yogures)
HIPS-RC	Material reciclado C	Origen desconocido
HIPS-RD	Material reciclado D	Origen desconocido

Para todos los materiales se llevó a cabo una caracterización morfológica, estructural, térmica y mecánica. Además de la comparación de los resultados, se pudo seleccionar el HIPS reciclado más adecuado para sustituir al material virgen.

Caracterización y discusión de los resultados

Caracterización morfológica y estructural

La morfología de los materiales se ha estudiado mediante microscopía electrónica de transmisión. Para determinar con exactitud las dimensiones y la fracción en volumen de las partículas de segunda fase, se han analizado un mínimo de 3 micrografías MET de los diferentes materiales con la ayuda de un analizador automático de imágenes.

En la figura 4 se muestran, a modo de ejemplo las micrografías MET de dos materiales (HIPS- Virgen y HIPS-RA) así como la imagen binaria de los contornos de las partículas, realizada al utilizar el analizador automático de imágenes.

De la observación de la figura 4 se aprecia que las micrografías MET no son muy nítidas, lo cual hace necesario reproducirlas manualmente sobre una transparencia para evitar errores en el análisis automático de las imágenes. Por otra parte, se pone en evidencia que el tamaño y proporción de las partículas puede variar considerablemente de un material a otro, y como consecuencia las propiedades pueden variar notoriamente.

Uno de los parámetros que se ha obtenido del análisis automático de imágenes es la proporción superficial de partículas elastoméricas en cada material. A partir de la figura 5 se puede apreciar que los HIPS del estudio presentan porcentajes de partículas bastante diferentes, comprendidos entre 12% y el 24%.

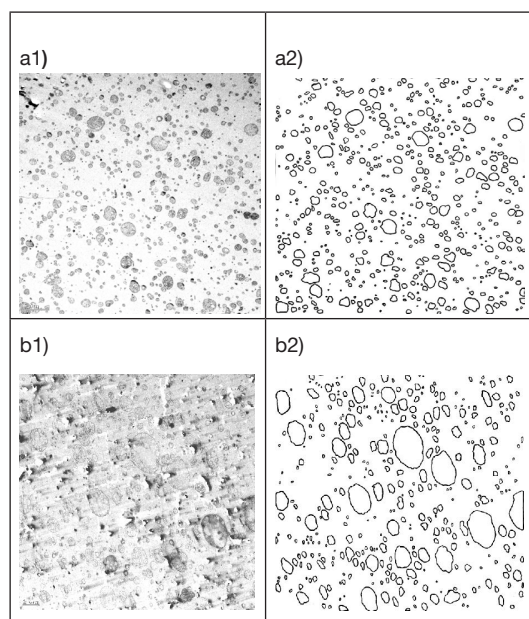


Figura 4. Micrografías MET de los materiales HIPS de partida con las imágenes binarias de los contornos de las partículas elastoméricas correspondientes al HIPS-V: a1) fotografía MET, a2) imagen binaria, y al HIPS-RA: b1) fotografía MET, b2) imagen binaria.

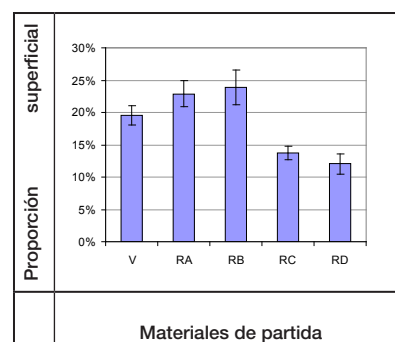
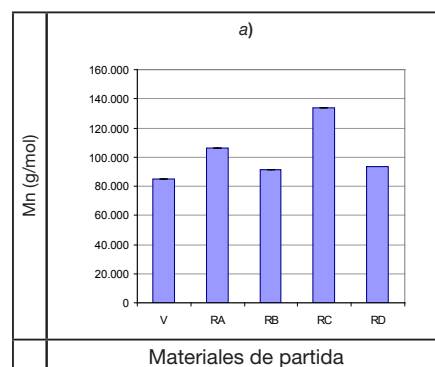


Figura 5. Proporción superficial de partículas elastoméricas de los HIPS estudiados.

La masa molecular media en número y en peso se determinó por cromatografía de permeabilidad en gel (GPC), cuyos resultados se muestran en la figura 6a. El valor de la masa molecular media influye en la fluidez del fundido, por eso, se complementó el estudio con la determinación del índice de fluidez (MFI) (figura 6b).



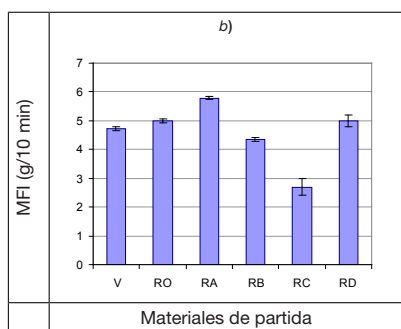


Figura 6. Para los diferentes HIPS: a) Peso molecular, b) Índice de fluidez.

Los valores de la masa molecular media, así como los del MFI, presentan bastantes diferencias. En resumen, se puede decir que los reciclados RA y RC son los que presentan mayores diferencias respecto al HIPS virgen.

Caracterización mecánica

Se realizó una caracterización mecánica completa mediante ensayos de tracción, flexión e impacto del HIPS virgen, de los 4 reciclados y del HIPS reprocesado (RO).

En la figura 7 se presenta un gráfico de barras correspondiente a la tensión de cedencia determinada a tracción para cada material. Se observa que el material que presenta mayor tensión a la cedencia es el RC, tal como cabía esperar, puesto que es el material de mayor masa molecular. El comportamiento a flexión mostró una tendencia similar al de tracción por lo que no se detallan los resultados.

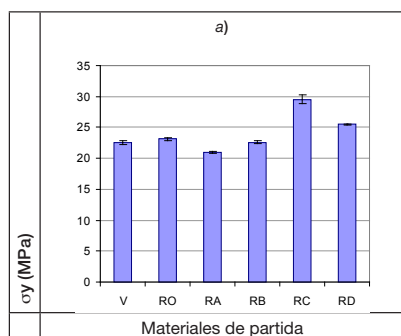


Figura 7. Tensión de cedencia de los diferentes HIPS.

En la figura 8 se indican los valores de la resistencia al impacto para cada HIPS estudiado. Se observa claramente que hay dos tipos de comportamientos, por un lado los materiales HIPS-V, RO, RB y RC con valores de resistencia al impacto entre 7 y 8 kJ/m² y los materiales RA y RD con una disminución de la resistencia al impacto de aproximadamente al 50%.

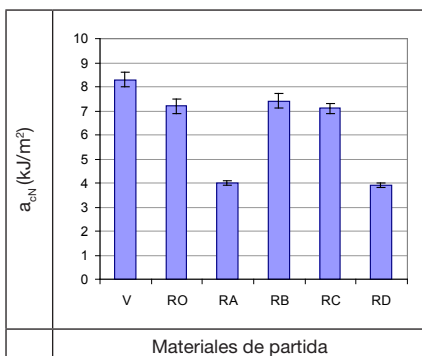


Figura 8. Resistencia al impacto de los diferentes HIPS.

Este diferente comportamiento a impacto también se pone de manifiesto con la observación de las superficies de fractura (figura 9). El material HIPS-RD (con baja resistencia al impacto) presenta una superficie de fractura discontinua y una propagación de grieta inestable (figura 9a). El material HIPS-RA presenta superficies de fractura similares al RD. Por otro lado, el material HIPS-RB (con alta resistencia al impacto), presenta una superficie de fractura homogénea y una propagación de grieta estable (figura 9b). Además, en este último caso se pudo apreciar a simple vista un emblanquecimiento de la superficie característico de una deformación plástica que justifica una resistencia al impacto más elevada. Los materiales HIPS-V, RO y RC presentan superficies de fractura similares al RB.

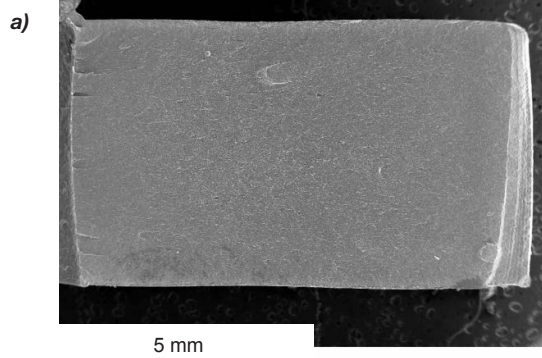
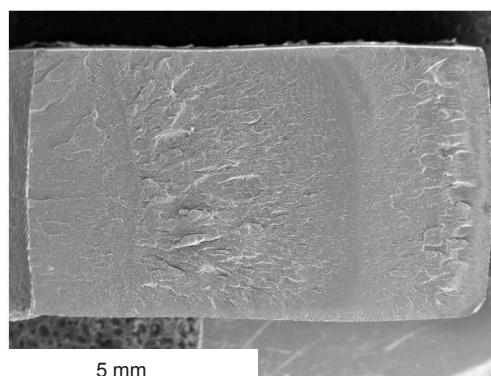
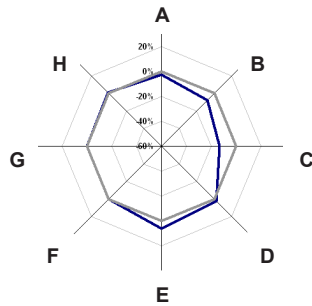


Figura 10. Micrografías SEM de la superficie de fractura de probetas de impacto: a) Material HIPS-RD, vista de toda la superficie de fractura (11), b) Material HIPS-RB vista de toda la superficie de fractura (11).

En un intento por dilucidar las variaciones obtenidas en los resultados mecánicos, se llevó a cabo una evaluación de las superficies de rotura de las probetas de tracción que se presentan en la **Figura 11**. En esta figura se puede apreciar que las mezclas HIPS-RA (**Figura 11a**) contienen impurezas aglomeradas en el centro de la probetas que estarían reforzando el material durante un ensayo de tensión, pero que en un ensayo de impacto, éstas impurezas estarían promoviendo una propagación inestable de la grieta, acelerando el proceso de fractura y disminuyendo la tenacidad. Las mezclas HIPS-RB no presentaron estas aglomeraciones de impurezas, lo que permitió la elongación del material (**Figura 11b**), que en el ensayo de fractura se vio representado por una propagación estable de la grieta que absorbe o requiere mayor energía, incrementando su tenacidad.



A = Módulo elástico en flexión
 B = Tensión a la cedencia en flexión
 C = Resistencia al impacto
 D = Tensión a la cedencia en tracción
 E = Índice de fluidez
 F = Peso molecular
 G = Proporción superficial de partículas
 H = Temperatura VICAT

Figura 12. Gráfico de la variación de las principales propiedades del material HIPS-RO (línea azul) respecto al HIPS-V (línea gris).

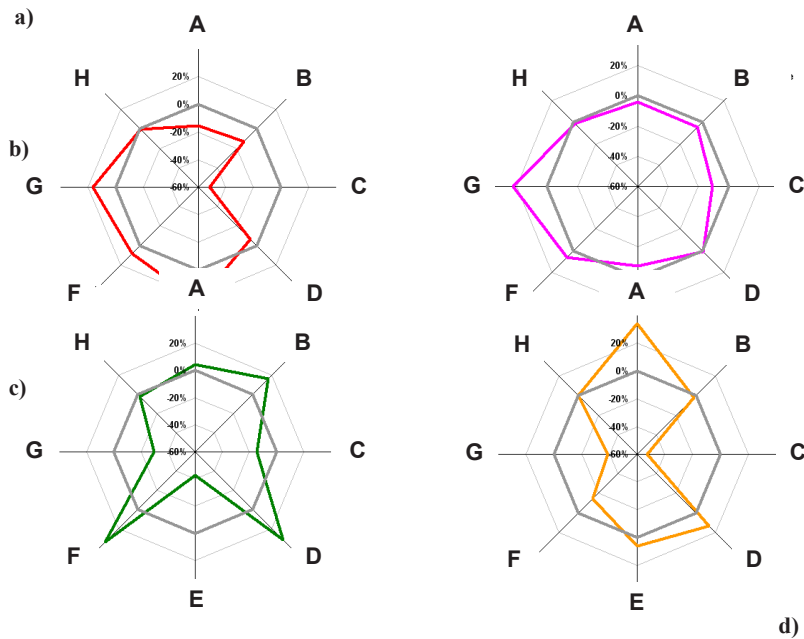


Figura 11. Gráfico de la variación de las principales propiedades de los HIPS reciclados respecto al HIPS-V (línea gris). a) HIPS-RA, b) HIPS-RB, c) HIPS-RC y d) HIPS-RD.

Un análisis de éstas impurezas concluyó que se trataban de componentes inorgánicos de titanio y calcio, probablemente utilizados como aditivos para una aplicación en específico del material durante su uso original.

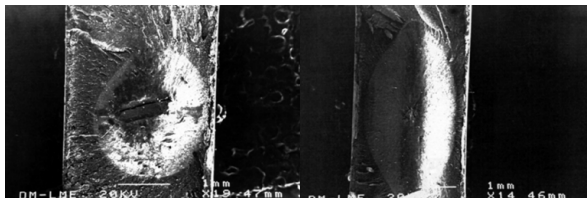


Figura 11. Micrografías SEM de las superficie de rotura de probetas de tracción: a) HIPS-RA, b) HIPS-RB.

CONCLUSIONES

En este apartado, a modo de conclusiones, se comparan las principales propiedades de cada material con la

ayuda de diagramas multivariantes. En la figura 12 se muestra la variación de las principales propiedades del HIPS recuperado obtenido a partir de la trituración de piezas (HIPS-RO) respecto al material virgen (HIPS-V). No se indican valores de propiedades sino variaciones, por tanto, el material virgen se sitúa en 0% en todas sus propiedades. Se observa que el material recuperado y el virgen se comportan prácticamente igual.

En la figura 11 (a, b, c y d), se muestran los gráficos de la variación de propiedades (según clave incluida en la figura 11) de los cuatro HIPS reciclados estudiados en este trabajo.

De la observación de la figura 11, se puede concluir que:

- El material HIPS-RA (figura 11a) presenta una fluidez (propiedad E) un 20% mayor que el HIPS-V, este hecho obligó a inyectar las probetas en unas condiciones diferentes de los otros materiales. Si se prepararan mezclas HIPS-RA y HIPS-V, podrían aparecer dificultades para procesar conjuntamente

ambos materiales. También se aprecian diferencias muy elevadas en la resistencia al impacto.

- El material HIPS-RB (figura 11b) muestra un comportamiento muy similar al HIPS-V para todas las propiedades. La resistencia al impacto (propiedad C) es la propiedad que presenta mayor variación (11%).
- El material HIPS-RC (figura 11c) presenta un comportamiento muy diferente que el material virgen. La mayor diferencia la presenta el MFI (propiedad E), que es un 43% inferior a la del HIPS-V.
- El material HIPS-RD (figura 11d) presenta una resistencia al impacto (propiedad C) muy baja, parecida a la del material RA.
- De todas las propiedades analizadas en los gráficos de la figura 12, las que presentan más variabilidad son la resistencia al impacto y el índice de fluidez, siendo por tanto las que más influyen en la calidad del HIPS reciclado.

Como conclusión general de este caso de estudio se puede afirmar que el material HIPS-RB es el mejor material reciclado para sustituir el material virgen utilizado en la fabricación de marcos de TV, ya que se demostró que este material reciclado podría sustituir el material virgen totalmente, sin necesidad de preparar mezclas RB con V. Después de este caso de estudio, la empresa SONY fabricó este tipo de pieza con material 100% reciclado proveniente de residuos de láminas termoconformadas para envases ligeros de un solo uso (p. e. yogures), obteniéndose excelentes resultados que por tal razón algunos de ellos son todavía confidenciales.

Como conclusión adicional, se puede afirmar que la sustitución de un plástico virgen por uno reciclado, en aplicaciones de alto valor añadido, es viable. Para ello, igual que con los materiales vírgenes, hace falta una adecuada selección del material. En el caso de plásticos reciclados, para poder seleccionar el material se requiere de una caracterización completa previa, puesto que generalmente estos materiales reciclados no suelen comercializarse con sus correspondientes hojas técnicas.

REFERENCIAS

1. F. Gao, *Handbook of plastics recycling*, vol. 53, no. 2. John Wiley & Sons, Ltd., 2004.
2. PlasticsEurope, "Plastics - the facts 2014/2015: An analysis of European plastics production, demand and waste data," 2015.
3. G. Xu, J. Qiao, C. Kuswanti, K. Koelling, J. A. Stuart, and B. Lilly, "Characterization of virgin and postconsumer blended high-impact polystyrene resins for injection molding," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 84, no. 1, pp. 1–8, 2002.
4. R. S. Chen, S. Ahmad, S. Gan, M. Hafizuddin, A. Ghani, and M. N. Salleh, "Effects of compatibilizer, compounding method, extrusion parameters, and nanofiller loading in clay-reinforced recycled HDPE/PET nanocomposites," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 132, pp. 1–9, 2015.
5. N. K. Kalfoglou and C. E. Chaffey, "Effects of extrusion on the structure and properties of high-impact polystyrene," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 19, no. 8, pp. 552–557, Jun. 1979.
6. H.-Y. Cheng, Y.-J. Yang, S.-C. Li, J.-Y. Hong, and G.-W. Jang, "Modification and extrusion coating of polylactic acid films," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. i, p. n/a–n/a, 2015.
7. L. Shen, *Plastic recycling*. Elsevier, 2014.
8. M. L. Barthes, O. Mantaux, M. Pedros, E. Lacoste, and M. Dumon, "Recycling of aged ABS from real WEEE through ABS/PC blends in the ABS-rich compositions," *Adv. Polym. Technol.*, vol. 31, no. 4, pp. 343–353, 2012.
9. D. S. Achilias, C. Roupakias, P. Megalokonomos, a. a. Lappas, and V. Antonakou, "Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP)," *J. Hazard. Mater.*, vol. 149, no. 3, pp. 536–542, 2007.
10. M. Goto, "Chemical recycling of plastics using sub- and supercritical fluids," *J. Supercrit. Fluids*, vol. 47, no. 3, pp. 500–507, 2009.
11. D. S. Achilias, C. Roupakias, P. Megalokonomos, and A. Lappas, "Recycling techniques of polyolefins from plastic wastes," *Glob. NEST J.*, vol. 10, no. 1, pp. 114–122, 2008.
12. J. Hopewell, R. Dvorak, and E. Kosior, "Plastics recycling: challenges and opportunities," *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.*, vol. 364, no. 1526, pp. 2115–2126, 2009.
13. Y. Inagaki, M. Kuromiya, T. Noguchi, and H. Watanabe, "Modification of plastic wastes from electrical products," pp. 121–124.
14. A. Merrington, "Recycling of Plastics," in *Applied Plastics Engineering Handbook*, M. Kutz, Ed. William Andrew Publishing, 2011, pp. 177–192.
15. F. Elmaghor, L. Zhang, R. Fan, and H. Li, "Recycling of polycarbonate by blending with maleic anhydride grafted ABS," *Polymer (Guildf.)*, vol. 45, pp. 6719–6724, 2004.
16. Y. Yang, R. Boom, B. Irion, D. J. van Heerden, P. Kuiper, and H. de Wit, "Recycling of composite materials," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 51, pp. 53–68, 2012.
17. K. Inada, R. Matsuda, C. Fujiwara, M. Nomura, T. Tamon, I. Nishihara, T. Takao, and T. Fujita, "Identification of plastics by infrared absorption using InGaAsP laser diode," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 33, no. 2, pp. 131–146, 2001.
18. G. Wu, J. Li, and Z. Xu, "Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review," *Waste Manag.*, vol. 33, no. 3, pp. 585–597, 2013.
19. H. E. Ferrando Lebraud, "Estudi de la viabilitat de la utilització de materials termoplàstics reciclats per a aplicacions en el sector de l'electrònica de consum," Universitat Politècnica de Catalunya, 2007.
20. E. Franco-Urquiza and M. L. Maspocho, "Feasibility of reusing waste PVC from electric cables: mechanical properties," *AFINIDAD*, vol. 71, no. 567, pp. 185–191, 2014.
21. C. Sica, A. Dimitrijevic, G. Scarascia-Mugnozza, and P. Picuno, "Technical Properties of Regenerated Plastic Material Bars Produced from Recycled Agricultural Plastic Film," *Polym. Plast. Technol. Eng.*, vol. 54, no. 12, pp. 1207–1214, 2015.

-
22. T. Maharana, Y. S. Negi, and B. Mohanty, "Review Article: Recycling of Polystyrene," *Polym. Plast. Technol. Eng.*, vol. 46, no. 7, pp. 729–736, 2007.
 23. G. Grause, J. Ishibashi, T. Kameda, T. Bhaskar, and T. Yoshioka, "Kinetic studies of the decomposition of flame retardant containing high-impact polystyrene," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 95, no. 6, pp. 1129–1137, 2010.
 24. X. Liu and H. Bertilsson, "Recycling of ABS and ABS/PC Blends," *J Appl Polym Sci*, vol. 74, pp. 510–515, 1999.
 25. C. Sánchez, M. Hortal, C. Aliaga, A. Devis, and V. A. Cloquell-Ballester, "Recyclability assessment of nano-reinforced plastic packaging.," *Waste Manag.*, vol. 34, no. 12, pp. 2647–55, 2014.
 26. S. Or, R. Of, P. In, and M. Consumer, "TO SHRED OR TO DISASSEMBLE ? RECYCLING OF PLASTICS IN MASS CONSUMER GOODS," pp. 63–68, 1997.