



## Introducción

### 1.1 Introducción a los materiales poliméricos y al procesamiento de polímeros

#### 1.1.1. Materiales poliméricos

En esta lección se analizarán las diferencias entre los materiales poliméricos en cuanto a su capacidad para reciclarse.

#### Tipos de materiales poliméricos.

Es necesario comprender la naturaleza y el comportamiento de los materiales poliméricos para reciclar un plástico.

Dependiendo de su estructura molecular y rutas de procesamiento, los materiales poliméricos se pueden clasificar en tres categorías principales: termoplásticos, termoestables y elastómeros.

Los elastómeros no se tratarán en este curso, ya que sus aplicaciones en embalaje y bienes de consumo son raras.

Echemos un vistazo más de cerca a los termoplásticos y termoestables.

#### Termoplásticos

Los termoplásticos se pueden definir como materiales cuya estructura se ablanda y endurece de forma reversible al calentarse y enfriarse. Debido a esto, los materiales termoplásticos pueden fundirse y reprocesarse para reciclarlos.

En teoría, estos cambios son reversibles y no implican una modificación en la estructura química del polímero. Entonces, en una situación ideal, los materiales termoplásticos podrían reciclarse muchas veces.



En la práctica, se produce cierta degradación térmica y oxidativa durante el proceso de reciclaje y se puede esperar un cambio en las propiedades del material final.

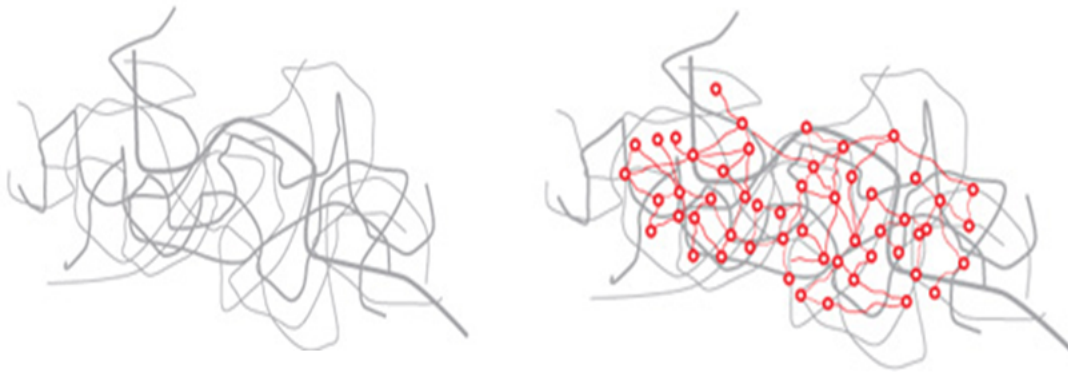
Cuando los termoplásticos se funden, las moléculas de polímero no se unen químicamente entre sí. Las cadenas termoplásticas se mantienen unidas por atracciones químicas débiles (es decir, fuerzas de van del Waals) o por entrelazamiento de las cadenas de moléculas.

Los termoplásticos, por ejemplo, poliolefinas, poliamidas y poliésteres, se utilizan para fabricar muchos bienes de consumo, como botellas, bolsas y películas. La siguiente lista muestra algunos materiales termoplásticos comunes y aplicaciones seleccionadas.

polímero termoplástico	Aplicaciones
Polietileno de alta densidad (HDPE)	Envases, tanques, botellas, cajas, láminas
Polietileno de baja densidad (LDPE)	Empaques, bolsas de comestibles, juguetes, tapas
Polietileno lineal de baja densidad (LLDPE)	embalaje
Polipropileno (PP)	Tapones, botes, botellas, láminas, botes de yogur, maletas, tubos, baldes, alfombras, carcasas de baterías, cuerdas
Poliestireno (PS)	Tarros de yogur, bandejas de espuma, tapas transparentes
Poliamida (PA)	Bolsas de vacío, hilos de pescar, ruedas de patín, ropa
Tereftalato de polietileno (PET)	botellas, macetas
Cloruro de polivinilo (PVC)	Envases de alimentos, solería, tuberías

## Termoestables

Los termoestables generalmente se procesan por fusión de manera similar a los termoplásticos, pero se vuelven irreversiblemente duros al calentarlos o al agregarles productos químicos especiales. Este endurecimiento implica un proceso de curado que implica la generación de enlaces químicos entre moléculas poliméricas lineales para formar una sola macromolécula reticulada. La siguiente figura ilustra las diferencias de estructura molecular entre los materiales termoplásticos y termoestables.



**Figura.** Arreglos de cadenas moleculares termoplásticas (izquierda) y termoestables (derecha).

Una vez formados, los plásticos termoestables no se pueden reprocesar y se producen importantes cambios estructurales antes de que puedan volver a fundirse. Por lo tanto, los materiales termoestables de desecho no se pueden reciclar como desechos termoplásticos. Los termoestables se utilizan donde se requiere resistencia y durabilidad. En la siguiente lista se muestran algunos ejemplos de materiales termoestables comunes y sus aplicaciones.

Polímero termoestable	Aplicación
Epoxy	Adhesivos, aislantes, pavimentos técnicos
Resina de melamina-formaldehído	Laminados resistentes al calor, superficies duras
Fenólico	Utensilios de cocina con asas resistentes al calor
Poliuretano (PU)	Espumas rígidas o flexibles para tapicería y aislamiento
Poliésteres insaturados	Tabiques de construcción, lados de la tostadora

## Termoplásticos vs termoestables

Entonces, teniendo en cuenta sus propiedades, ¿cómo se comparan los polímeros termoplásticos y termoestables?

Los polímeros termoplásticos exhiben las siguientes propiedades:

- Moléculas débiles, enlaces de cadena lineal entre ellos que pueden romperse por calentamiento.
- Son polimerizados por el proveedor del material en un primer paso.
- Son elásticos y flexibles.
- Se disuelven en disolventes orgánicos.
- Al calentarse, se ablandan y eventualmente se derriten.
- Su punto de fusión es más bajo que su punto de degradación.
- Están en forma de gránulos sólidos de material ya polimerizado antes del procesamiento.
- En estado sólido, exhiben una estructura relativamente blanda hecha de regiones cristalinas duras junto con regiones amorfas elásticas.

Los polímeros termoestables exhiben las siguientes propiedades:

- Tienen fuertes enlaces químicos, incluidos los enlaces cruzados.

- No se separan al calentar.
- Se someten a una polimerización en dos etapas durante el procesamiento.
- Son duros y quebradizos.
- No se disuelven en disolventes orgánicos.
- Al calentar, se carbonizan, no se derriten.
- Su punto de degradación es más bajo que su punto de fusión.
- Están en estado líquido antes de su procesamiento.
- En estado sólido, su estructura consiste en una resina intercalada con fibra de refuerzo.

### Preguntas cortas:

- Los materiales termoplásticos, que normalmente están presentes en muchas soluciones de envasado, suelen ser más flexibles, fáciles de procesar y reciclables que los materiales termoestables. ¿Es verdad? (S/N)
- Clasifique los siguientes materiales considerando su naturaleza (termoplásticos o termoestables). 1) Polietileno de alta densidad; 2) tereftalato de polietileno; 3) nailon 66; 4) Adhesivo epoxi; 5) Poliuretano expandido (1) termoplástico – poliolefina; 2) termoplástico – poliéster; 3) termoplástico – poliamida; 4) termoestable – resina; 5) termoestable - espuma).

### 1.1.2 Procesamiento de plásticos reciclados.

En esta lección aprenderá los principales aspectos a tener en cuenta al reprocesar materiales plásticos.

## Selección de

### técnicas de procesamiento.

Al seleccionar las técnicas de procesamiento de materiales reciclados, es importante distinguir el tipo de residuo que deseamos procesar.

Un flujo de residuos homogéneo se puede reprocesar en la misma maquinaria en la que se procesan los materiales vírgenes.

En algunos casos, también se puede procesar una corriente heterogénea de desechos plásticos mixtos en estas máquinas, pero se pueden aplicar varias técnicas específicas de reprocesamiento. En esta lección se proporcionará una breve introducción a cada uno de estos procesos, junto con ejemplos de su uso.

### Extrusión

La extrusión es un proceso continuo para la producción de componentes como tuberías o láminas. Revise las lecciones del módulo 2 para obtener una descripción detallada de la extrusión como técnica de procesamiento de plásticos.

Las extrusoras pueden ser de dos tipos, máquinas de un solo tornillo o de dos tornillos. Estos dos tipos de equipos realizan tareas ligeramente diferentes, aunque los principios básicos se aplican a ambos. Comenzaremos con una discusión sobre la composición por extrusión, ya que es de particular importancia en el campo del reciclaje mecánico.

El término composición abarca una variedad de pasos entre la síntesis del polímero y su formación final en una máquina de proceso. Esto podría incluir alimentar o transportar el material a una máquina, medir la cantidad correcta y mezclar el polímero con otros materiales, como aditivos. Finalmente, esto incluiría peletizar el material plástico final, por ejemplo, para usarlo como materia prima para máquinas de moldeo por inyección o moldeo por soplado. La ruta de composición se describe en la siguiente figura.



En general, la **medición y la alimentación** implican el uso de transportadores mecánicos, como tornillos alimentados, cintas transportadoras o cortinas vibratorias. Las operaciones más grandes pueden emplear silos operados por presión o vacío para entregar el material a la extrusora o a las estaciones de mezcla. En muchos casos se requiere una medición precisa y los alimentadores de tipo gravimétrico o volumétrico pueden lograrlo. De estos, los sistemas gravimétricos tienen una mayor precisión, pero un precio más alto. Una vez que se miden los ingredientes compuestos requeridos, deben mezclarse.

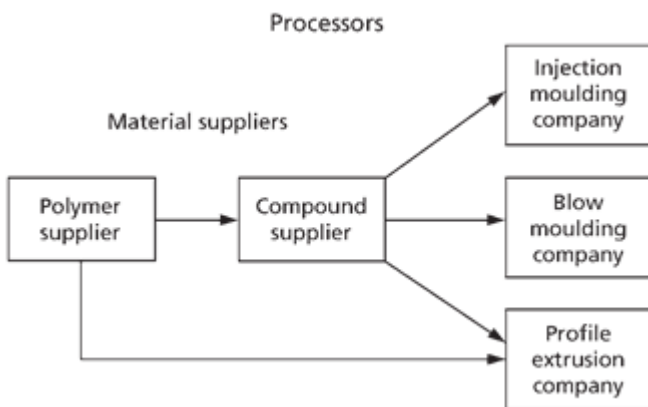
El objetivo de la **mezcla** es dispersar los ingredientes para producir una mezcla homogénea. Esto se puede hacer a temperatura ambiente simplemente mezclándolo para producir una mezcla seca. Alternativamente, los ingredientes se pueden mezclar en caliente. Generalmente, los mezcladores calientes se sitúan directamente encima de la extrusora para que la mezcla fundida se pueda verter directamente en la extrusora.

La **plastificación** es necesaria para mezclar y fundir el material para producir una mezcla que sea tanto homogénea como moldeable. Este trabajo lo realiza el tornillo extrusor.

El dispositivo de corte utilizado dependerá del producto. Los tubos, láminas y perfiles deben cortarse en longitudes específicas con una sierra. Los peletizadores rotativos, también conocidos como cortadores de hebras, se utilizan para producir gránulos.

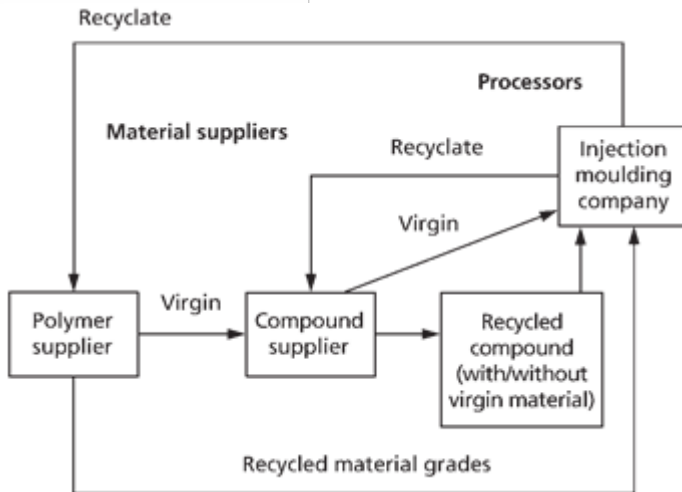
Los proveedores de material plástico realizan a menudo compuestos. Recibirán una cantidad de polímero base virgen, como polipropileno, de un fabricante de polímeros y crearán una serie de formulaciones y grados diferentes para vender a sus clientes, quienes requerirán materiales que puedan satisfacer las necesidades específicas de sus aplicaciones de uso final. Por ejemplo, simplemente añadiendo pigmentos, pueden crear una gama de colores. En algunos casos, este proceso puede ser continuo: en lugar de peletizar, el resultado puede ser un producto extruido como una tubería.

Al considerar la historia térmica de los plásticos, la mayoría de los materiales ya habrán pasado por algún tipo de ciclo de procesamiento antes de llegar al fabricante final para fabricar componentes de producción vendibles. En la siguiente figura se muestran ejemplos de posibles cadenas de suministro.



Al considerar el reciclaje de estos materiales, puede operar una cadena de suministro similar. Los materiales reciclados pueden ser utilizados por el proveedor de polímeros o el proveedor de compuestos para producir grados que contengan todos los materiales reciclados, una mezcla de reciclado y aditivos, o una mezcla de reciclado y material virgen. En la siguiente figura se muestra una posible cadena de suministro de reciclados.





## Moldeo por inyección

El moldeo por inyección es uno de los procesos de fabricación más comunes en uso hoy en día. Se presta a la producción de alto volumen de piezas complejas y de precisión con una variedad de usos. Revise la lección del **módulo 2** para obtener una descripción detallada de esta técnica. Además de los moldes de inyección rechazados, también se generan residuos a través de los canales utilizados para alimentar el plástico fundido desde la unidad de inyección al molde. Estos, así como las molduras rechazadas, pueden volver a introducirse en la máquina si se tiene cuidado de evitar la contaminación.

El moldeo por inyección es complejo y está controlado por una serie de parámetros. Se puede utilizar una variedad de materiales y viscosidades de materiales; sin embargo, las mezclas de plásticos, si no son homogéneas, pueden causar fluctuaciones en el proceso y dificultar la obtención de molduras de calidad uniforme.

Si se utilizan mezclas de materiales con diferentes puntos de fusión, puede haber problemas, a menos que se alcance la temperatura de la fracción de fusión más alta. El material sin fundir

será visible en las molduras, lo que afectará severamente la integridad mecánica. Asimismo, los contaminantes como la suciedad, la madera y otros residuos también serán visibles en las molduras.

Los filtros de fusión se pueden usar para atrapar contaminantes relativamente menores que no se derriten y evitar que entren en las molduras. Una forma de evitar este tipo de contaminación visible es utilizar el moldeo por coinyección.

Hay una serie de variaciones del proceso de moldeo por inyección, una que es particularmente aplicable a los reciclados es el moldeo por coinyección. El moldeo por coinyección produce una estructura similar a un sándwich que se puede utilizar para encapsular materiales reciclados, cubriéndolos con una capa de material de piel virgen (consulte la siguiente figura).



## Moldeo por soplado

El moldeo por soplado es el tercer proceso comercialmente más importante para la producción de plásticos después de la extrusión y el moldeo por inyección. Se utiliza para producir una variedad de artículos huecos, por ejemplo, botellas, tanques de combustible y otros recipientes grandes. En el **módulo 2** se proporciona una descripción detallada de las técnicas de moldeo por soplado.

Los reciclados provenientes de otros flujos de residuos son más difíciles de procesar mediante moldeo por soplado debido a los problemas de contaminación y cambios en las propiedades mecánicas de los reciclados fundidos. Recuerde que los criterios para un material de moldeo por soplado son bastante específicos:

- Debe tener una viscosidad adecuada.
- Debe tener una alta resistencia a la fusión.
- Debe ser extensible cuando se infla (a menudo se da como la relación de inflación del material).

- Debe poder sellar en

la base de la moldura.

Esto hace que el moldeo por soplado de materiales reciclados no sea imposible sino complicado, ya que es necesario realizar los arreglos adecuados antes de que el material resultante pueda procesarse de la misma manera que el original.

Además de los posibles efectos de los contaminantes sobre la viscosidad, también pueden causar problemas con el proceso de inflado. Durante el inflado, el material se expande a un ritmo constante para dar un espesor de pared constante a lo largo del cuerpo de la moldura. Los contaminantes pueden hacer que reviente, rompa o afecte la capacidad del macarrón para sellar en la base. Finalmente, existe la limitación de color de los materiales de reprocesamiento, especialmente las mezclas de diferentes colores. A menudo, para obtener un color uniforme, se agrega un masterbatch negro para enmascarar los colores subyacentes de los reciclados. Esto puede limitar los puntos de venta potenciales para los productos. Sin embargo, una solución para superar esto es usar más de una extrusora para producir un macarrón multicapa. Este proceso se denomina moldeo por soplado de extrusión multicapa.

Las capas múltiples proporcionan un medio para incorporar materiales reciclados y enmascarar el color inherente del propio material reciclado. Por ejemplo, considere una estructura de botella de dos capas que utilizó material virgen azul como capa exterior visible y material reciclado negro como capa interior. Si realmente mirara dentro de la botella, vería el material reciclado negro, pero toda la superficie exterior sería azul.

Las posibles configuraciones de capas se muestran en la figura adjunta. Una configuración de 3 capas para reciclados puede ser preferible a una de 2 capas, ya que la capa interna afecta principalmente la resistencia de la línea de soldadura en la base de la moldura. Esta costura puede debilitarse potencialmente con el reciclaje. Hay otro problema potencial con una configuración de 2 capas: el material reciclado puede no ser un material adecuado para entrar en contacto con el contenido del contenedor. Esto podría deberse a problemas de compatibilidad química o simplemente a que el acabado de la superficie del material reciclado

no sería de la calidad suficiente para el producto deseado. Una configuración de 3 capas supera este problema. Las máquinas de moldeo por soplado permiten un control preciso del grosor de las capas individuales, de modo que se puede optimizar el nivel de cada una de las capas.



Algunas aplicaciones pueden requerir el uso de una capa de barrera adicional, por ejemplo, los tanques de combustible requieren una barrera impermeable al combustible y los recipientes de alimentos como el ketchup pueden requerir una barrera para evitar que los olores penetren a través de las capas exteriores. La configuración de barrera más simple que incorpora material reciclado es una estructura de 4 capas, como se ilustra en la figura. La capa adhesiva es necesaria para unir las capas, ya que a menudo las combinaciones de materiales requeridas no se pegan entre sí.

La incorporación de recortes en el moldeo por extrusión y soplado no suele presentar ningún problema. Sin embargo, dados los requisitos específicos del proceso de moldeo por soplado en términos de viscosidad, resistencia a la fusión y propiedades de inflación, es poco probable que los materiales de otras corrientes de desechos sean adecuados. El proceso de moldeo por soplado es relativamente intolerante a los contaminantes debido a los efectos sobre la capacidad de inflar el macarrón y la uniformidad del espesor de pared que se produce. Si se

utilizan materiales reciclados, se debe prestar especial atención al área de unión, para que se produzca una resistencia de soldadura adecuada.

## Película soplada

Los residuos del proceso no se generan en grandes cantidades en la maquinaria de soplado de películas y el material puede reprocesarse siempre que permanezca libre de contaminación.

Al igual que en el moldeo por soplado, las oclusiones grandes o los contaminantes en el proceso pueden causar problemas de explosión e inflación. La aglomeración puede ser necesaria para facilitar la alimentación en algunos casos, debido a las bajas densidades aparentes de las películas trituradas.

Hay grandes cantidades de desechos de película disponibles, debido a la corta vida útil asociada con los materiales de embalaje y películas industriales, como bolsas de transporte, bolsas de basura y bolsas de plástico. La vida útil típica de los productos de este tipo es de solo dos años. El material 100 % reciclado se puede utilizar en aplicaciones de baja calidad, como bolsas de basura. Otros productos, como las bolsas de transporte, pueden incorporar desechos con el material virgen para reducir costos.

Una vez más, al igual que el moldeo por soplado, el soplado de películas tiene requisitos de materiales específicos en términos de resistencia a la fusión, viscosidad y características de inflación. En general, el soplado de película se limita a los materiales de poliolefina, siendo la mayor parte del uso de LDPE, LLDPE y HDPE.

## Moldeo por compresión

El moldeo por compresión se utiliza para fabricar productos termoplásticos y termoestables. Todos los procesos hasta ahora han utilizado materiales en forma granular. Sin embargo, el moldeo por compresión a menudo utiliza materias primas en forma de lámina. Las secciones llamadas blancos, del peso correcto, se precalientan y luego se colocan en la herramienta de moldeo por compresión. Luego se cierra para formar el componente. Debido al uso de láminas

en lugar de gránulos, los costes de la materia prima son mucho más elevados, ya que es más caro fabricar láminas que gránulos. Un tipo común de hoja se conoce como transferencia de estera de vidrio (*glass mat transfer, GMT*); se compone de polipropileno y altos niveles de fibra de vidrio. Cualquier material reciclado se puede utilizar para hacer más hojas GMT. Sin embargo, los niveles de vidrio y las características de flujo de la hoja pueden ser diferentes. Dado que estos generalmente los proporciona un proveedor a los fabricantes, el reciclaje de GMT por parte de los propios moldeadores por compresión no es común. Es posible el moldeo por compresión de plásticos mixtos. Es necesario profundir los materiales en un "blanco" con el peso adecuado y colocarlo en el molde. A continuación, se realiza el moldeo de forma normal. Se pueden hacer secciones gruesas de esta manera; sin embargo, sus propiedades no suelen ser muy buenas.

## Termoformado

Al igual que el moldeo por compresión, el termoformado utiliza láminas en lugar de gránulos. En este proceso, las láminas se sujetan a un marco y luego se calientan para ablandar, pero no derretir, el plástico. A continuación, se pone en contacto un molde con la lámina mientras se aplica vacío. Esto atrae la lámina sobre la superficie del molde y forma la moldura. La moldura debe recortarse para eliminar el exceso de material laminar. Esta chatarra se puede devolver al proveedor de láminas para que se utilice en la producción de láminas nuevas.

## Procesos de incorporación de residuos plásticos mixtos

Los siguientes tres procesos son adecuados para flujos de desechos mixtos y más contaminados. Existen operaciones comerciales de cada uno de estos procesos, se presentan variaciones dependiendo del tipo de residuo que se esté procesando. Aquí solo se presenta una descripción general de cada proceso general.

- **Moldeo por intrusión.**

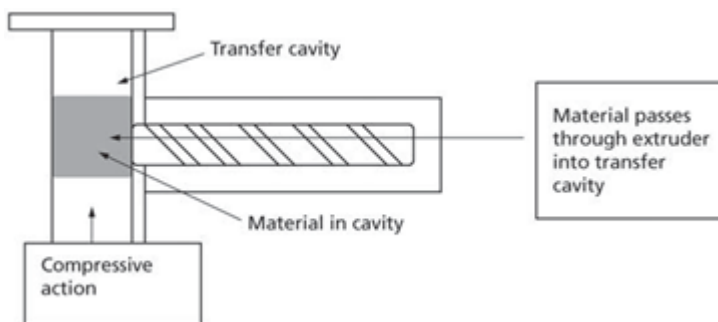
El proceso de intrusión es adecuado para plásticos mixtos. Por lo general, se muelen finamente antes de procesarlos para facilitar la dispersión. El proceso tiene elementos de extrusión en el sentido de que se utiliza una unidad de plastificación para ablandar la mezcla, que luego se introduce en un molde y luego se enfría. En los sistemas rotativos, se pueden llenar varias herramientas mientras se enfrían otras (generalmente sumergiéndolas en agua). Una vez que el plástico se ha enfriado se puede expulsar o retirar dependiendo del tipo de molde que se utilice. El proceso es tolerante a contaminantes como plásticos mixtos, arena, vidrio, madera y papel, siempre que esté presente una fracción mínima de poliolefina de alrededor del 40%. Otros contaminantes se incrustan en esta fracción de bajo punto de fusión. Este proceso generalmente se usa para producir formas grandes y geoméricamente simples, como perfiles y paneles para aplicaciones de reemplazo de madera, como cercas, postes y andamios.

- **Moldeo por transferencia.**

Este proceso combina elementos de moldeo por inyección y moldeo por compresión. Es similar al moldeo por inyección en el sentido de que se transfiere un peso fijo de material a un molde. El moldeo por transferencia se desarrolló originalmente a partir del moldeo por compresión, para permitir la producción de piezas más complejas que incorporan orificios, rebajes o insertos. El resultado fue un proceso en el que primero se cerraba el molde y luego el material de moldeo se transfería a la cavidad mediante una acción de compresión. Existe una serie de variaciones, ya que este método se utiliza para la producción de piezas termoestables, así como para plásticos mixtos. A continuación, se describe el proceso utilizado para los residuos plásticos mixtos.

El material se alimenta desde una tolva de fusión al barril calentado donde se homogeneiza y plastifica. Luego se alimenta a un acumulador de masa fundida, que dosifica un peso fijo de material a baja presión en un molde parcialmente abierto (a diferencia de la alta presión en el proceso de moldeo por inyección) (ver la figura a continuación). Cuando se logra el llenado, la prensa cierra el molde y el material se comprime. Cuando la moldura se haya enfriado y tenga estabilidad dimensional, se puede retirar. Las bajas fuerzas de sujeción requeridas por este

proceso hacen que los costos del equipo sean más bajos que los del moldeo por inyección convencional. Sin embargo, no se presta para producir piezas complicadas y se puede aplicar mejor a piezas bastante simples similares a las que se producen en los procesos de moldeo por compresión. Una de esas aplicaciones son las tarimas. Este proceso es aplicable tanto a plásticos mixtos como sin mezclar. El grado de otra contaminación que el proceso puede tolerar, por ejemplo, metal, depende del diseño de la extrusora y de la boquilla de la extrusora. Siempre que los contaminantes sean lo suficientemente pequeños y que haya suficiente material plástico para permitir que fluyan a través de la máquina y salgan de la boquilla, no se deben encontrar problemas.



- **Moldeo sinterizado.**

El proceso de moldeo por sinterización se puede utilizar con una amplia variedad de plásticos mixtos. El proceso es tolerante a la contaminación de materiales como el aluminio y el papel, y se han fabricado paneles fabricados con astillas de madera de desecho. La formulación también se puede variar para producir molduras con una gama de propiedades para su uso como paneles, insonorización o materiales de embalaje.

En este proceso, las escamas de plástico se plastifican en un molde calentado y se someten a presión.



El material pasa por un detector de metales para eliminar grandes fragmentos de metal y se tritura y dosifica en moldes. Luego, éstos pasan a través de una torre de arriba a abajo, donde se calientan. La presión de compresión aumenta cuanto más baja el molde por la torre. Los moldes más bajos se enfrían con el aire ambiental, que luego, después de un calentamiento adicional por medio de un radiador, se conduce hacia arriba en contracorriente hacia los moldes. Este proceso permite producir paneles de gran superficie de hasta 60 mm de espesor, con acabado natural o laminado en la misma operación. Una ventaja de este proceso es que la materia prima puede incluir la fracción pesada de la separación por densidad de las plantas de regeneración y los materiales no requieren limpieza antes del procesamiento.

## Aditivos para reciclados

Los dos problemas más significativos asociados al reciclaje de residuos plásticos de productos post consumo son:

1. La degradación de los plásticos como resultado tanto del procesamiento como de la vida útil, y
2. Las dificultades asociadas con obtener propiedades aceptables del material cuando se procesan plásticos mixtos.

Se pueden emplear aditivos de estabilización para retardar la degradación de los plásticos. Se pueden incorporar otros aditivos como rellenos o modificadores para mejorar las propiedades de los reciclados. Estos modificadores también pueden resultar beneficiosos en fracciones plásticas mixtas. En primer lugar, se discutirán los problemas asociados con la degradación de los materiales.

La mayoría de los productores de plástico reprocesan sus desechos para reducir sus costes de materia prima, así como el coste de eliminación de desechos. Muy a menudo, este material simplemente se retroalimenta al sistema junto con el material virgen. Esto presenta pocos

problemas siempre que se preste atención a la limpieza y que el material reprocesado no se haya contaminado con suciedad, aceite u otros tipos de desechos.

La cantidad de degradación que sufran estos materiales dependerá de las condiciones de procesamiento a las que fueron sometidos y los niveles de estabilizadores presentes. Si estos materiales se van a utilizar para una segunda aplicación, es posible reestabilizarlos. Para esto, se requiere conocimiento del tipo y cantidad de estabilizador utilizado originalmente. Algunos estabilizadores se consumen en el proceso de protección del plástico y estos materiales deben mantenerse en niveles óptimos para garantizar una protección continua. Es posible que se requieran más pruebas para evaluar la resistencia al calor y la luz (tanto el procesamiento como la estabilidad a largo plazo).

- Estabilidad al calor

Una combinación de calor y oxígeno provocará la oxidación del polímero, lo que provocará su degradación. El mecanismo es la formación de radicales libres, que son especies químicas altamente reactivas. Esta reacción se puede observar, ya que los productos tenderán a mostrar una decoloración a amarillo o marrón. Se pueden utilizar antioxidantes para interrumpir este mecanismo. Los productos químicos más comúnmente empleados son los fenoles impedidos, que actúan como descomponedores de radicales peróxido.

También se pueden emplear otros aditivos además de los fenoles impedidos. Los fosfitos combinados con fenoles impedidos, tienen un efecto sinérgico. Esta combinación es especialmente efectiva para poliolefinas como PE o PP.

Quizás el ejemplo más conocido del uso de aditivos para evitar la degradación térmica se encuentra en la estabilización térmica del cloruro de polivinilo. Los radicales libres producidos en este caso son el cloro, lo que da lugar a la formación de ácido clorhídrico. Los estabilizadores deben detener estas reacciones que conducen a la corrosión ácida del equipo de procesamiento.

- Estabilidad a la luz

La luz, especialmente en el rango ultravioleta, puede inducir la fotooxidación provocando la degradación y escisión de las cadenas poliméricas. Para impedir este efecto, se pueden emplear

tres clases de aditivos.

Estos aditivos generalmente se denominan absorbentes de UV, extintores (depuradores) y trampas de radicales.

## Combinaciones de aditivos para fines específicos

Los aditivos utilizados en un plástico en particular dependerán en gran medida de la aplicación prevista. Las aplicaciones al aire libre, por ejemplo, requerirán estabilidad tanto a la luz como al calor.

Las cajas para botellas, hechas de un solo plástico, polietileno de alta densidad (HDPE), han sido ampliamente estudiadas. El uso de 100% reciclado sin mayor estabilización resultó en una pérdida de propiedades mecánicas, agrietamiento y decoloración después de seis meses. Sin embargo, cuando se incorporaron de HALS (estabilizadores frente al calor y la luz) y absorbentes UV, los reciclados conservaron sus propiedades durante más de cuatro años.

En resumen, para aplicaciones exitosas se debe tener cuidado para asegurar que los reciclados estén adecuadamente protegidos con aditivos adecuados, dependiendo de su uso futuro.

## Mantenerse alejado

Si bien el reciclaje mecánico primario seguirá siendo una práctica común entre los procesadores de plásticos, el reciclaje secundario está sujeto a límites prácticos y económicos de uso. El éxito depende principalmente de la economía de la clasificación para obtener materiales poliméricos únicos y del conocimiento de la procedencia del material y el historial de degradación. Existen procesos adaptados de la maquinaria convencional para tomar materia prima más altamente contaminada, sin embargo, su aplicación está limitada a perfiles y paneles del tipo de reemplazo de madera y no pueden superar las limitaciones inherentes en la composición de su materia prima. Incluso estos procesos también requieren generalmente que la materia prima se haya sometido a una clasificación preliminar.

En la siguiente tabla se proporciona una descripción general de los procesos discutidos en esta lección:

Comparación de procesos					
Proceso	Complejidad de piezas	Acción de formación	Molde	Tipos de plástico	Tolerancia a los contaminantes
Extrusión	Perfiles bastante simples	Extrusión	Ninguno	Sólo uno	Baja
Moldeo por inyección	Compleja	Inyección	Cerrado	Sólo uno	Baja
Moldeo por coinyección	Compleja	Inyección	Cerrado	Capas individuales	Baja
Moldeo por compresión	Sencilla	Compresión	Cerrado	Sólo uno	Media
Moldeo por extrusión y soplado	Compleja	Inflación	Cerrado	Sólo uno	Muy baja
Moldeo por soplado de extrusión multicapa	Compleja	Inflación	Cerrado	Capas individuales	Muy bajo
Moldeo por	Sencilla	Inflación	Cerrado	Sólo uno	Muy baja

inyección y soplado					
Película soplada	Sencilla	Inflación	Ninguno	Sólo uno	Muy baja
Moldeo por intrusión	Sencilla	Compresión	Abierto	Mezclado	Alta
Moldeo sinterizado	Sencilla	Compresión	Abierto	Mezclado	Muy alta
Moldeo por transferencia	Sencilla	Compresión	Cerrado	Mezclado	Alta

### 1.1.3 Efectos del procesamiento en termoplásticos

En esta lección aprenderemos cómo las propiedades de los plásticos se ven afectadas por el procesamiento.

#### Introducción

Ya sabemos cuál es la diferencia entre un termoplástico y un material termoestable en cuanto a su reciclabilidad.

En esta lección nos concentraremos en lo que ocurre con los materiales termoplásticos cuando se procesan. Consideraremos tres aspectos:

- Propiedades de deformación
- Propiedades de fusión
- Propiedades estructurales y químicas.

## Propiedades de

### deformación

Comencemos con el estudio de las propiedades de deformación. Para centrarnos en la deformación, necesitamos hablar de reología.

La reología es el estudio de la deformación y el flujo de productos fluidos.

Los plásticos exhiben una respuesta viscoelástica al estrés. En otras palabras, los plásticos son polímeros que combinan propiedades viscosas y elásticas. ¿qué significa esto exactamente?

Las propiedades viscosas se refieren a la forma en que un material continúa deformándose mientras se aplica tensión.

Las propiedades elásticas se refieren a la capacidad de un material de recuperar su forma original después de eliminar la tensión.

Los polímeros son más viscosos que la mayoría de los líquidos, lo que significa que su resistencia al flujo cuando se aplica una tensión es mayor que la de la mayoría de los líquidos. Además, los polímeros son más elásticos que la mayoría de los productos sólidos, lo que significa que tienden a volver a su forma original cuando cesa la tensión.

La interacción entre la viscosidad y la elasticidad determina con frecuencia el destino de cualquier operación de procesamiento. El procesamiento debe tener en cuenta no solo cómo fluyen los polímeros en su estado fundido, sino también cómo cambiarán las propiedades reológicas a medida que los polímeros se funden y solidifican cuando la temperatura aumenta o disminuye.

A medida que un polímero se degrada, su viscosidad disminuye. Graficar los cambios que ocurren durante el reciclaje repetido del material puede dar una medida de los procesos de degradación que ocurren.

### Propiedades de deformación: un ejemplo

Ejemplifiquemos lo que sucede con dos materiales comunes que son el polietileno de baja densidad (LDPE) y el nailon (PA).

Como material semicristalino, el LDPE pasa de un sólido a un fluido altamente viscoso y luego a un fluido móvil a medida que se calienta.

Como material amorfo, el PA cambia repentinamente de sólido a una sustancia altamente fluida.

Esto significa que estos polímeros reaccionan de manera diferente al calor y al estrés que se les aplica. Por lo tanto, los métodos y condiciones para procesarlos serán necesariamente diferentes.

Un método sencillo para comparar el flujo de plásticos derretidos en condiciones previamente definidas es determinarlo con un indexador de flujo fundido (*Melt Flow Indexer*). Este dispositivo funciona de manera similar a exprimir pasta de dientes de un tubo. Se aplica una carga vertical a un pistón y el polímero fundido se comprime a través de una matriz. La cantidad de polímero que se extruye en un tiempo fijo proporciona el índice de fluidez (MFI). Los materiales altamente viscosos tienen MFI bajos, mientras que los materiales muy fluidos exhiben MFI altos.

## Propiedades de fusión

Los termoplásticos deben calentarse por encima de su punto de fusión para que fluyan.

Como puede ver, la temperatura de fusión puede cambiar mucho de un material a otro. Incluso dentro de un mismo material, diferentes estructuras pueden conducir a cambios significativos en el punto de fusión.

Una vez que un polímero se calienta por encima de su punto de fusión, la viscosidad disminuye drásticamente. La tasa de cambio también depende del tipo particular de material. Eventualmente, se alcanza un punto en el que los materiales se vuelven térmicamente inestables y comienzan a degradarse. Este es un problema cuando se procesan plásticos combinados, porque las fracciones que componen la mezcla se derretirán y comenzarán a degradarse a diferentes temperaturas.

Por lo que tener una mezcla homogénea es de capital importancia en el reciclaje de plásticos.



## Propiedades de fusión: un ejemplo

Para mantenerlo simple en esta etapa, piense en una mezcla de más de un plástico como una mezcla heterogénea y una mezcla del mismo plástico como un plástico homogéneo.

Aquí tienes algunos de los puntos de fusión de los materiales plásticos comunes.

- Polietileno (PE): 135 °C
- Polipropileno (PP): 170 °C
- Poliestireno (PS): 240 °C



polietileno (PET): 245 °C

- Poliamida 6 (PA6): 233 °C

- Tereftalato de

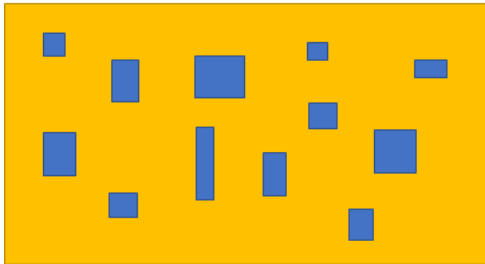
Considere una fracción de desecho que contiene 90% PE y 10% PA6.

Si procesamos los residuos a una temperatura adecuada para la fracción PE (135 °C), la fracción PA6 no se derretirá (233 °C) y será arrastrada por la corriente de fusión. El producto final sería una mezcla heterogénea que contiene gránulos de material sin fundir. Los gránulos sin fundir serían puntos de debilidad mecánica en el moldeo, como si estuvieran llenando agujeros sin ningún propósito. Solo si las regiones no fundidas son muy pequeñas, no serían perjudiciales para las propiedades del material.

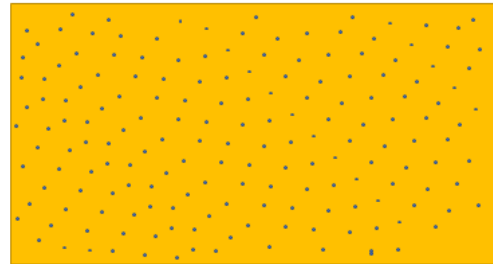
Ahora considere la misma mezcla de PA6 y PE nuevamente. ¿Qué pasaría si la mezcla se procesa justo por encima de los 233 °C? En este caso, la temperatura es mucho más alta de lo que generalmente se procesaría el PE, y puede comenzar a degradarse térmicamente, lo que probablemente cause una pérdida considerable en las propiedades mecánicas del plástico.

Por lo tanto, en el procesamiento de plásticos mixtos, a menudo se requieren pruebas para seleccionar los mejores materiales de entrada y las condiciones óptimas para el procesamiento. Pero como puede darse cuenta, esto se vuelve extremadamente difícil cuando se procesan desechos plásticos, ya que las propiedades de los materiales de entrada son muy difíciles de controlar.

**Moulding containing rough pieces of unmelted polymer (bad mechanical properties)**



**Moulding containing a finely dispersed unmelted polymer (improved mechanical properties)**



## Cambios estructurales y químicos.

Además de los efectos del calor sobre el polímero, también deben tenerse en cuenta los efectos de las fuerzas de esfuerzo cortante.

El cizallamiento provoca daños mecánicos y rompe las cadenas de polímeros. Por lo tanto, las fuerzas de cizallamiento muy altas conducen a la degradación del material.

Con esto en mente, una buena estabilidad térmica es un requisito para la mayoría de las operaciones de procesamiento de polímeros, ya que la acción combinada de calor y cizallamiento puede producir degradación.

Entonces, en concomitancia con el calor, el cizallamiento reducirá la longitud de las cadenas poliméricas. Esto afectará:

- Peso molecular y viscosidad.
- Propiedades mecánicas (por ejemplo, resistencia a la tensión y al impacto)
- Color

Se debe tener en cuenta el tiempo de residencia del material en la máquina de procesamiento. Un tiempo de residencia típico puede ser de 3 a 5 minutos. Los tiempos de residencia más largos

pueden causar deterioro térmico. Además, dentro de un ciclo de circuito cerrado, el material de desecho se puede volver a moler y reprocesar muchas veces.

El esfuerzo cortante no solo es aplicable a los polímeros fundidos. También es relevante durante las etapas de trituración y corte de materiales de desecho mientras se encuentran en estado sólido.

La forma en que esto afecta las propiedades del material dependerá de la respuesta específica del material cada vez que se somete a procesos de degradación y de cómo se mezcla el triturado, por ejemplo, con material nuevo. El cizallamiento mecánico es el principal mecanismo de deterioro de las propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción. La molienda mecánica para reducir el tamaño de los plásticos sólidos es el segundo factor más importante. Dado que las acciones de mezcla, procesamiento y reducción de tamaño tienen un efecto de cizallamiento sobre el material polimérico, es necesario evaluar el nivel de daño del plástico.



## ACTIVIDAD DE FIN DE LECCIÓN

En el siguiente enlace encontrarás un interesante ensayo sobre el reciclaje mecánico de plásticos para que lo conserves.

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/marc.202000415>

No es necesario que lo lea todo, si no lo desea. Concéntrese en la sección 3 (Reciclado mecánico de tereftalato de polietileno). Guarde el papel, ya que discutiremos sobre parte de la información que se presenta en la sesión en línea.

La sección informa sobre la degradación que sufre el PET ante determinados fenómenos de degradación. Busca información y contesta brevemente y con tus propias palabras las siguientes preguntas:

- a) ¿Qué es el entrecruzamiento y cuáles son las consecuencias del entrecruzamiento en las propiedades de los materiales PET?
- a) ¿Cómo cambia la resistencia a la tracción y la resistencia al impacto del PET a medida que aumenta el número de reciclados?

### 1.1.4 Necesidad de clasificar los plásticos

En esta lección aprenderá por qué es tan importante abordar una clasificación eficaz de los plásticos.

¿Por qué la

## clasificación es tan crítica?

Como ya hemos visto, como los termoestables no se vuelven a fundir, no se pueden reprocesar de la misma manera que los termoplásticos. Por lo tanto, los termoplásticos y los termoestables deben separarse antes del reciclaje.

Pero, ¿es necesario separar los materiales termoplásticos entre sí? ¿Podemos simplemente mezclar todos los plásticos y reprocesarlos?



Lamentablemente, la respuesta a las preguntas anteriores es no.

Si eso fuera factible, el reciclaje de plásticos sin duda sería mucho más fácil. Aunque la mezcla y el reprocesamiento pueden ser posibles en algunos casos específicos, no suele ser el caso.

## Una mirada a la

### miscibilidad de los plásticos

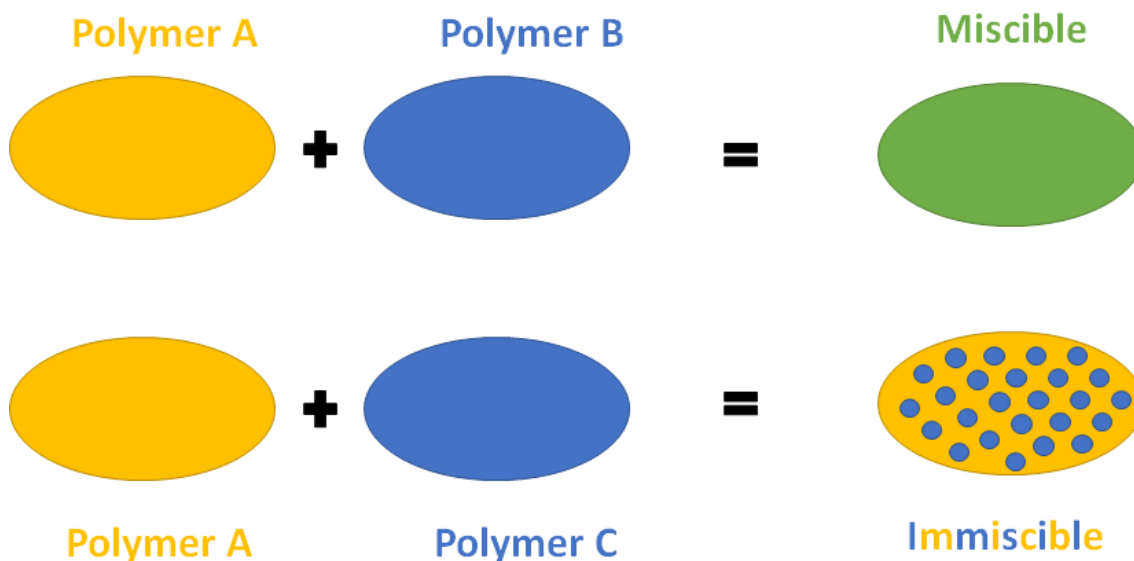
Es probable que diferentes materiales plásticos no sean compatibles debido a las diferencias en su composición química, estructura y cantidades de otros compuestos agregados.

Si se juntan dos polímeros inmiscibles, ocurre un fenómeno llamado separación de fases.

Como resultado, el material mezclado contendrá regiones diferenciadas de cada polímero, que serían visibles bajo un microscopio o incluso a simple vista. Además, no existirán enlaces químicos entre estos materiales, lo que definitivamente tendrá un impacto en sus propiedades mecánicas, de barrera y ópticas.

Una forma de imaginar esto se presenta en la siguiente figura. Para mezclas de polímeros inmiscibles, un polímero se dispersa en el otro polímero. La fuerza de estos sistemas depende de qué tan bien se disperse un polímero en el otro. Se pueden usar algunos aditivos para ayudar a que un material se disperse finamente en el otro, haciéndolos así más compatibles.

Diferencias entre mezclas de polímeros miscibles e inmiscibles. Las mezclas inmiscibles presentan un polímero disperso en otro



## Un ejemplo de polímero mezclado

Hay algunos ejemplos comerciales de este tipo de materiales combinados.

El poliestireno de alto impacto, una mezcla de poliestireno y polibutadieno, es uno de ellos. Las cajas de CD están hechas de poliestireno de alto impacto.



Mientras que el poliestireno por sí solo es muy frágil, el polibutadieno, un material gomoso, es un excelente absorbente de energía y presenta una gran flexibilidad. Cuando estos dos materiales se mezclan, el resultado es un material plástico con dureza mejorada.

## Compatibilidad de plásticos.

La siguiente tabla proporciona algunos ejemplos de qué tan bien se mezclan los polímeros de diferentes tipos. Como puede ver, es muy raro encontrar una alta compatibilidad entre materiales. En general, cuanto mejor se puedan dispersar dos materiales, mejores serán las propiedades de la mezcla final.

Important synthetic design materials	Additive												
	PE	PVC	PS	PC	PP	PA	POM	SAN	ABS	PBT	PET	PMMA	
PE	●	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	
PVC	○	●	○	○	○	○	○	●	●	○	○	●	
PS	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
PC	○	⊙	○	●	○	○	○	●	●	●	●	●	
PP	⊙	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	
PA	○	○	⊙	○	○	●	○	○	○	⊙	⊙	○	
POM	○	○	○	○	○	○	●	○	○	⊙	○	○	
SAN	○	○	○	●	○	○	○	●	○	○	○	●	
ABS	○	●	○	●	○	○	⊙	○	●	⊙	⊙	●	
PBT	○	○	○	●	○	⊙	○	○	⊙	●	○	○	
PET	○	○	⊙	●	○	⊙	○	○	⊙	○	●	○	
PMMA	○	●	⊙	●	○	○	⊙	●	●	○	○	●	

● Compatible  
 ● Limited compatibility  
 ⊙ Compatible in small quantities  
 ○ Not compatible

**Figura:** Compatibilidad de materiales plásticos (adaptado de Kovacs, Becker y Cesconetto, 2009).

Pero independientemente de que los materiales sean miscibles o no, para reprocesar los materiales reciclados y mantener sus propiedades deseables en el producto reprocesado, es mucho más efectivo clasificar los materiales en lugar de mezclarlos.

Un reciclado de alta pureza también exigirá un precio comercial más alto, ya que la calidad seguramente será más alta. Sin embargo, se requiere una clasificación rentable de los materiales plásticos, ya que el coste de la clasificación compensará la comerciabilidad del material. Debido a esto, los métodos para clasificar plásticos deben ser lo más simples y económicamente viables posible.

## Para concluir

Recuerde que el reprocesado siempre conducirá, en mayor o menor medida, a la degradación del material como resultado del calor y el esfuerzo cortante mecánico.



Los problemas asociados con el procesamiento de mezclas de plástico reciclado son dignos de mención siempre que:

Los plásticos tienen diferentes propiedades de fusión y transición vítrea.

La inmiscibilidad de los plásticos pone en peligro su estructura y conduce a una disminución significativa de su rendimiento mecánico.

Entonces, cuando nuestro objetivo es reciclar materiales por medios mecánicos, se requiere clasificación. El reciclaje químico puede ser un proceso elegible cuando la clasificación no se puede aplicar de ninguna manera.

## ACTIVIDAD DE FIN DE LECCIÓN:

En el siguiente enlace encontrará un breve artículo con información interesante sobre la compatibilidad de los plásticos:

<https://pmd.igdp.org.br/article/586fc520f7636eea018b45f4/pdf/pmd-7-2-141.pdf>

Revíselo e indique si la compatibilidad de los siguientes materiales se puede lograr o no.

- A) Polimetilmetacrilato (PMMA) y Policarbonato (PC)
- B) Tereftalato de polietileno (PET) y Polietileno de alta densidad (HDPE)
- C) Policloruro de vinilo (PVC) y Poliestireno (PS)

### 1.1.5 Reprocesamiento de reciclados termoplásticos

En esta lección, aprenderá qué se necesita y qué debe controlarse al reprocesar termoplásticos.

#### Introducción.

Como ya hemos visto, es factible reciclar y reprocesar los termoplásticos cuando se clasifican adecuadamente.

En esta lección vamos a abordar qué es necesario controlar antes, durante y después del reprocesado de termoplásticos reciclados.

Una vez que los materiales de desecho lleguen a la fábrica de reciclaje, es probable que sea necesario reducir su tamaño, limpiarlos, separarlos y, muy probablemente, volver a combinarlos y granularlos antes de que puedan volver a procesarse. Aunque los diferentes sistemas se analizarán más adelante en este módulo, en esta lección se presenta un breve vistazo a los diferentes pasos del proceso.

## Control de calidad de los materiales de entrada.

Los materiales de desecho pueden recibirse en diferentes formas, como fardos, molduras o grandes terrones. No hace falta decir que, para producir materiales reciclados de alta calidad, se requieren productos de desecho de alta calidad.

A menudo se sabe poco sobre la historia del material a reciclar, incluyendo:

- ¿Cuántas veces ha sido reprocesado anteriormente?
- ¿Cuánto estrés térmico o mecánico ha sufrido ya (por ejemplo, debido al procesamiento o exposición a condiciones exteriores)?
- ¿Para qué servía antes?
- ¿Es un solo material o una combinación de plásticos?
- ¿Qué cantidad de contaminantes contiene?



## Pureza de los materiales de entrada

La pureza de los materiales de entrada es un asunto de suma importancia.

Es más probable que los entornos de ciclo cerrado obtengan grandes beneficios del reciclaje.

Una práctica común en la industria del plástico es reprocesar internamente los materiales de desecho generados durante la producción normal. Este reciclaje primario permite reducir tanto los residuos de producción como la utilización de materias primas. Por ejemplo, los desechos de puesta en marcha y las piezas rechazadas generadas durante el moldeo por inyección o el termoformado pueden volver a triturarse y volver a introducirse directamente en la máquina de producción. Dentro de un ciclo de circuito cerrado, el reciclaje es fácil porque el conocimiento sobre los flujos de residuos es alto y los materiales son confiables.

Un ejemplo de un ciclo de circuito cerrado en acción se ve en la industria automotriz. Desde 1991, Volkswagen ha reciclado parachoques de desecho acoplados con un grado modificado de polipropileno. El material de desecho se mezcla con material virgen y se devuelve al proceso de producción de parachoques. Las propiedades de los parachoques fabricados son tan buenas como las fabricadas con material virgen solo durante al menos ocho ciclos de reprocesamiento.

Experimentos de este tipo han demostrado que las propiedades a corto plazo no varían demasiado si el material no contiene fibras de vidrio. La fibra de vidrio se usa a veces para reforzar algunos plásticos y tiende a dañarse cuando se reprocesa.

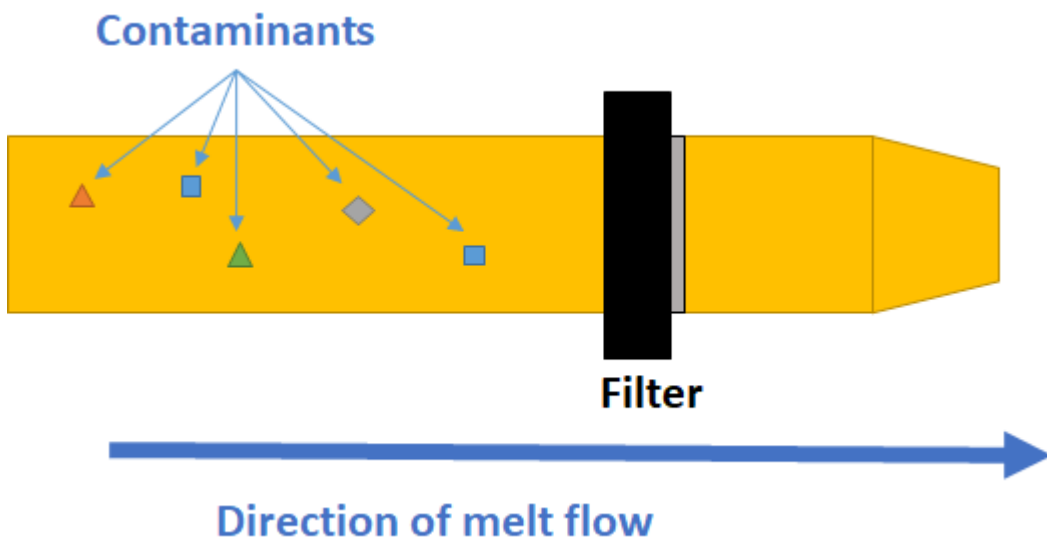
Como se ha mencionado en lecciones anteriores, la presencia de polímeros mixtos y, muy especialmente, de contaminantes también puede acelerar los procesos de deterioro. Los contaminantes pueden incluir pintura, etiquetas, recubrimientos, polvo, madera, metales, residuos de pegamento o tintas de impresión. Si los contaminantes se derriten durante el procesamiento, no hay forma de eliminarlos y se homogeneizarán dentro del fundido durante la etapa de procesamiento. Estos contaminantes pueden ser visibles posteriormente en el componente.

Para ello, hay que tener en cuenta una serie de factores. Debe determinarse si el material es puro o mezclado y si está contaminado, por ejemplo, con metal o madera. Para facilitar la alimentación en las máquinas de procesamiento, ya sea moldeo por inyección, extrusión o moldeo por soplado, el tamaño y la forma del triturado (es decir, la densidad aparente) deben ser adecuados. Si el material es higroscópico (absorbe agua), por ejemplo, la poliamida, puede requerir un secado previo. Finalmente, ¿el reciclado debe ser reprocesado solo, mezclado con otro material virgen o modificado con aditivos?

Los metales son un problema particular en el reprocesado, ya que pueden dañar el funcionamiento interno de las máquinas de procesamiento. La protección contra la contaminación por metales generalmente se aborda colocando imanes en las tolvas de alimentación.

Si el nivel de otra contaminación es bajo y los contaminantes no se funden dentro del intervalo de fusión del polímero, se pueden eliminar de la masa fundida sin demasiada dificultad utilizando una pantalla de filtro. Una pantalla de filtro se parece a un tamiz de malla muy fina y atrapa partículas más grandes, que no pueden pasar. Las pantallas deben cambiarse a intervalos regulares. La frecuencia de cambio dependerá del nivel de contaminación. Los

dispositivos de filtro de este tipo se pueden usar en máquinas de moldeo por inyección o extrusión. Sin embargo, solo se pueden tolerar niveles bastante bajos de contaminación, generalmente del 1% o menos. Es importante que los sistemas de monitoreo estén disponibles para indicar cuándo puede ser necesario cambiar el filtro, ya que las alteraciones en el proceso cambiarán la calidad de los materiales producidos.



**Figura.** Esquemas de un sistema para eliminar contaminantes no fundidos.

Los contaminantes reducen las propiedades mecánicas de los componentes. Por lo tanto, la filtración puede mejorar las propiedades. Sin embargo, esto puede compensarse con el aumento del cizallamiento asociado con la acumulación de presión en la masa fundida detrás de las pantallas del filtro. Un cizallamiento mayor podría causar degradación y reducir el rendimiento mecánico. Por lo tanto, el tamaño de la malla debe seleccionarse para equilibrar estos dos efectos.

## Reducción de

### tamaño

La reducción de tamaño es necesaria para llevar las partículas de material a un tamaño adecuado para ser procesadas. Esto puede implicar un proceso de dos etapas.

En una primera etapa se utiliza un triturador para producir partículas grandes de unos 25-50 mm. Estos materiales se pueden desmenuzar posteriormente con un cortador rotatorio. El cortador rotativo es un dispositivo que consta de un rotor y cuchillas giratorias, cuchillas estáticas, una cámara de molienda y una pantalla.

A medida que el plástico se mueve entre las cuchillas estacionarias y giratorias, se corta a medida. Este tamaño está determinado por el tamaño de malla de la pantalla.

Normalmente se utiliza un extractor de aire para disipar el calor generado por la acción de corte de las palas. Como característica de diseño, es importante que las cuchillas se puedan reajustar, reemplazar o quitar rápidamente para volver a afilarlas, ya que es probable que sufran un desgaste considerable.

### Lavado

Es necesario lavar para eliminar la suciedad y los residuos adheridos al plástico de desecho.












Aumenta la pureza de los plásticos y, en algunos casos, mejora la eficiencia de otros procesos, como la clasificación. El lavado también elimina las etiquetas y los residuos de pegamento soluble en agua.

Una vez que los materiales se lavan, deben secarse. Esto se puede hacer mecánicamente simplemente usando la gravedad y un transportador para permitir que cualquier líquido se drene. Los métodos térmicos utilizan aire caliente para secar las escamas de plástico.

### Identificación y clasificación de plásticos.

Una forma de permitir una fácil identificación de los plásticos es marcar las molduras.

Códigos del Sistema de Identificación de Resinas para el reciclaje de envases.

Resin Identification Number	Resin	Resin Identification Code –Option A	Resin Identification Code –Option B
1	Poly(ethylene terephthalate)	 PETE	 PET
2	High density polyethylene	 HDPE	 PE-HD
3	Poly(vinyl chloride)	 V	 PVC
4	Low density polyethylene	 LDPE	 PE-LD
5	Polypropylene	 PP	 PP
6	Polystyrene	 PS	 PS
7	Other resins	 OTHER	 O

**Figura:** Códigos del Sistema de Identificación de Resinas para el reciclaje de envases.

Esto permite que los plásticos se clasifiquen manualmente. Sin embargo, la clasificación manual es un proceso que requiere mucha mano de obra y requiere poco equipo, pero depende de la precisión del trabajo humano para producir un producto de alta pureza.

Una alternativa es utilizar tecnologías de clasificación mecanizada. Esto funciona mediante la evaluación de las diferencias en las propiedades del material.

Un ejemplo es el uso de la densidad para separar poliolefinas. Las fracciones de poliolefina (PP, LDPE, HDPE) tienen todas densidades por debajo de 1 g/cm<sup>3</sup>. Esto permite que se use un proceso llamado 'flotación y hundimiento' para separarlos de las otras fracciones de polímeros. La separación se lleva a cabo en un tanque de flotación utilizando agua como medio de separación.

Tabla: Algunas de las poliolefinas utilizadas y su densidad.

Plástico	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Polipropileno	0.90
Polietileno de baja densidad (LDPE)	0.90
Polietileno de alta densidad (HDPE)	0,95
Poliestireno	1.05
Poliamida (PA6 o PA66)	1.15
Cloruro de polivinilo (PVC)	1.40
Tereftalato de polietileno (PET)	1.40

El principio se aplica en los separadores de flotador y hundimiento. Como sugiere el nombre, esta técnica de separación por densidad involucra una fracción flotante y una fracción hundida. La fracción de poliolefina más ligera permanece flotando en la superficie y las partículas más densas se hunden.

Cuando dos plásticos tienen la misma densidad (como PET y PVC) es necesario utilizar algunos parámetros diferentes.

Otras técnicas, como la fluorescencia de rayos X, la espectrometría de infrarrojo cercano (NIR), o incluso la determinación del color o las propiedades de la superficie, son posibles para clasificar los diferentes tipos de plásticos.

## Técnicas de reciclaje



El reciclaje de plástico se puede lograr por medios mecánicos o químicos. Estas dos alternativas se van a presentar en detalle en las próximas semanas de este curso.

El reciclaje mecánico es el método más común de reciclaje. Aquí los plásticos se muelen físicamente de nuevo a un tamaño adecuado y se reprocessan.

El reciclaje interno de un solo flujo de materiales plásticos, también conocido como reciclaje primario, es relativamente fácil de llevar a cabo. Sin embargo, la recuperación de materiales usados fuera de este escenario hace que el esfuerzo requerido para reprocessar el plástico sea significativamente mayor en comparación. Esto se conoce como reciclaje secundario.

A veces, estos sencillos métodos de reciclaje mecánico ya no se pueden aplicar. El reciclaje terciario implica procesos químicos para descomponer los polímeros y producir materias primas monoméricas.

El reciclaje cuaternario se aplica a los plásticos que no son aptos para ninguna de las alternativas de reciclaje anteriores. En este caso, los materiales de desecho se utilizarían para producir energía por pirólisis. Esta estrategia conserva poco valor y contribuye a la producción de gases de efecto invernadero. Por lo que debería permanecer como la última opción elegible.

### **Control de calidad de la salida.**

Se pueden realizar experimentos simples para evaluar los efectos del procesamiento en las propiedades plásticas, especialmente en la resistencia a la tracción y al impacto de los materiales.

Las molduras se deben producir usando las mismas condiciones que se usaron para la producción completa para obtener resultados útiles y representativos.

Los siguientes procedimientos experimentales exploran las limitaciones de reciclaje de un material plástico. Los resultados de estos experimentos se pueden utilizar para determinar si es necesario introducir material virgen en las mezclas recicladas y cuándo, y las posibles propiedades de los componentes resultantes.

Método A: Reciclaje de ciclo cerrado sólo con triturado.

- i. Moldee un material 100% virgen, guarde algunas molduras para su evaluación.

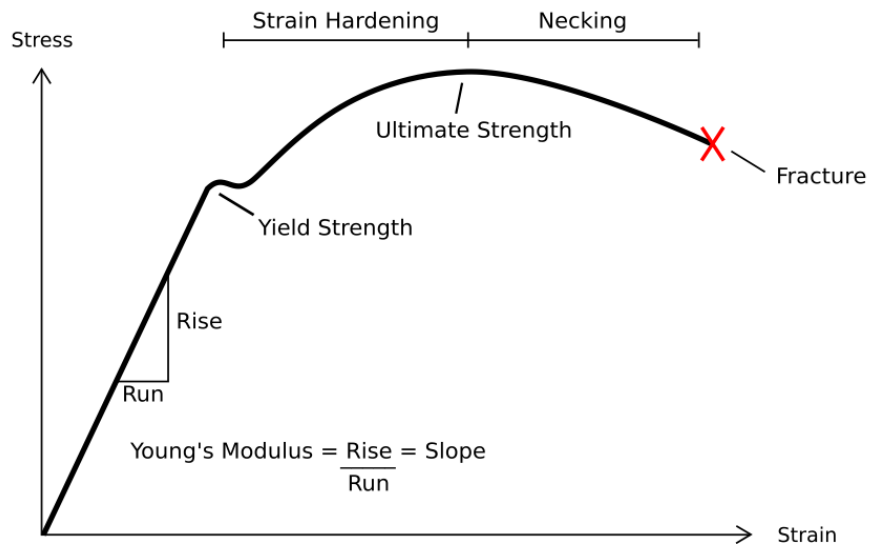
- ii. Vuelva a moler una cantidad de este 'primer paso'
- iii. Moldee y guarde algunas molduras para su evaluación
- iv. Repita para el número requerido de pasadas, por ejemplo, 'segunda pasada', 'tercera pasada', etc.
- v. Realice evaluaciones en virgen y todas las pasadas (mecánicas y/o reológicas según se requiera)
- vi. Examine los resultados

#### Método B: Mezclado con material virgen.

- i. Moldee una mezcla de 50% virgen y 50% de material de tercera pasada
- ii. Guarde algunas molduras para su evaluación
- iii. Mezcle el 50% de esta primera mezcla con 50% virgen
- iv. Repita para un número de pases, por ejemplo, 5
- v. Lleve a cabo una evaluación mecánica/reológica en las muestras de moldeo de mezcla 1-5
- vi. Examine los resultados

Las propiedades a corto plazo (p. ej., resistencia a la tracción y resistencia al impacto) son importantes. Sin embargo, no deben ser los únicos evaluados. Los efectos a largo plazo del procesamiento repetido en las propiedades plásticas también deben investigarse cuidadosamente. Es necesario evaluar si estos materiales, cuando se mezclan con vírgenes, sufrirán una degradación acelerada.

Otro criterio importante para un procesamiento de alta calidad es la homogeneidad del material. Cuando los reciclados son mezclas de diferente viscosidad y color, es importante que se mezclen adecuadamente para formar un material coherente. Hay tornillos especiales disponibles para equipos de procesamiento. Estos tornillos homogeneizadores mejoran tanto la calidad del producto como la reproducibilidad. De hecho, lograr la homogeneidad con los reciclados, especialmente los materiales mixtos, es difícil ya veces imposible. Esto significa que el control de calidad de los reciclados es definitivamente tan necesario como el del material virgen.



**Figura:** Curva típica tensión-deformación de un material plástico. Se obtiene a partir de ensayos de deformación realizados en condiciones estándar y permite evaluar la resistencia del material.

## 1.1.6 Posición actual de la industria sobre la producción y el reciclaje de plástico

En esta lección, se verán algunas ideas sobre la gestión de desechos plásticos desde el punto de vista de los procesadores industriales.

### Introducción

Sería difícil imaginar una sociedad moderna hoy en día sin plásticos. Los plásticos han encontrado una gran variedad de usos en campos tan diversos como los electrodomésticos, el embalaje, la construcción, la medicina, la electrónica y los componentes automotrices y

aeroespaciales. Como se puede ver en esta lista, la tecnología plástica se puede aplicar con gran éxito en una variedad de formas.

Entonces, ¿qué hace que el plástico sea un material tan versátil?

La razón de su éxito en la sustitución de materiales tradicionales como metales, madera y vidrio en una gama tan diversa de aplicaciones es la capacidad de modificar sus propiedades para satisfacer una amplia gama de necesidades de los diseñadores. Esto, sumado a la facilidad con la que se pueden procesar los plásticos, los convierte en materiales ideales para la producción de una variedad de componentes. Mire a su alrededor y se sorprenderá al ver cuántos usos diferentes han encontrado los plásticos y qué tan grande es el mercado que soporta la industria del plástico.

El material plástico utilizado para fabricar muchos de estos productos es lo que se denomina grado 'virgen'. Son materiales que han llegado directamente del fabricante de polímeros a la fábrica y aún no han sido procesados. Si estos materiales luego llegan a ser reprocesados, entonces se les llama 'reciclados'. Sin embargo, no todos los materiales plásticos se reprocesan, la mayoría simplemente se desechan, lo que genera la necesidad de disponer de ellos. Un aumento continuo en el uso de plásticos ha llevado a que una cantidad cada vez mayor de plásticos terminen en el flujo de desechos.

La gestión de los residuos es uno de los principales problemas a los que se enfrenta la sociedad moderna y no se limita únicamente a los plásticos. Sin embargo, una combinación de medidas legislativas e iniciativas gubernamentales, el aumento del coste de la eliminación en vertederos y el interés público en apoyar el reciclaje ha significado que el reciclaje de plásticos deba aumentar. Generalmente, los plásticos están hechos de petróleo crudo. Por lo tanto, el reciclaje de plásticos ayuda a conservar este recurso natural.

Toda estrategia de gestión de residuos se basa en tres directrices:

- Evitar, es decir, reducir y, si es posible, evitar producir residuos en su origen. Sin desperdicio = sin problema.

- Recuperación, la

recuperación de materiales del flujo de residuos para su reciclaje.

- Eliminación, la eliminación de materiales no reciclables, por ejemplo, en vertederos.

El segundo punto se puede aplicar a los problemas de los residuos plásticos mediante la recuperación de material que se destina al vertedero. Por lo tanto, el material plástico recuperado del flujo de residuos se denomina 'recuperación'.

### Recuperación de plásticos reciclados

Hay varias opciones sobre cómo se puede hacer esto: reutilización, reciclaje mecánico, reciclaje de materias primas y recuperación de energía. Estos se definen a continuación.

- **Reutilizar:** los ejemplos más comunes de reutilización son los envases de vidrio, donde las botellas de leche y bebidas se devuelven para limpiarlas y volver a usarlas. La reutilización no es una práctica generalizada en relación con los envases de plástico: los productos de plástico en general tienden a desecharse después del primer uso. Sin embargo, hay ejemplos de reutilización en el mercado. Por ejemplo, una serie de fabricantes de detergentes comercializan bolsitas de recarga para líquidos de lavado y suavizantes de ropa embotellados. Los consumidores pueden rellenar y, por lo tanto, reutilizar sus botellas de plástico en casa.
- **Reciclaje mecánico:** también conocido como reciclaje físico. El plástico se muele y luego se reprocesa para producir un nuevo componente que puede o no ser el mismo que su uso original.
- **Reciclaje de materias primas:** el polímero se vuelve a convertir en su componente de petróleo/hidrocarburo para usarlo como materia prima para la producción de nuevos polímeros. Esto también se conoce como reciclaje químico.
- **Recuperación de energía:** los materiales se incineran para recuperar su energía inherente.

El reciclaje mecánico es el más practicado de estos métodos y será el tema central de gran parte de los capítulos posteriores. Sin embargo, las otras son opciones valiosas para la eliminación de desechos, especialmente para materiales que no cumplen con los criterios para el reciclaje mecánico por razones de practicidad o rentabilidad.

Hay una serie de tecnologías disponibles para recuperar y reciclar plásticos. Algunos están actualmente en uso por la industria y son capaces de procesar grandes cantidades de material de manera rentable, mientras que otros existen actualmente solo en laboratorios. El reciclaje

de plástico es un área en constante desarrollo para tratar de satisfacer las demandas de la legislación, las fuerzas del mercado y la presión ambiental, que a menudo compiten entre sí. Ningún fabricante que desee permanecer en el negocio puede reciclar materiales si no es rentable hacerlo. Los plásticos reciclados se utilizan en el mismo mercado en el que se originaron. Reemplazan y compiten con los materiales vírgenes. El precio que puede cobrar el reciclado dependerá tanto del precio de los materiales vírgenes como de la calidad del reciclado. El precio de los materiales vírgenes puede variar mucho ya que está vinculado tanto a los precios del petróleo como a la oferta y demanda del mercado. Esto, a su vez, significa que el precio que puede cobrar el reciclaje varía mucho.

La presión medioambiental puede crear una demanda por parte del consumidor de productos reciclados. Al crear dicho mercado, un fabricante puede ver que se obtienen ganancias y, por lo tanto, comenzará a producir y vender productos reciclados. Este negocio también estará sujeto a los efectos de las fuerzas del mercado, la oferta y la demanda. La presión medioambiental también puede dar lugar a que la legislación obligue a los fabricantes a utilizar materiales reciclados. En este caso, es posible que no exista ya un mercado y esta legislación afectará a la fuerza del mercado 'natural'. El resultado puede ser menos rentable y requerir subsidios para poner en marcha dicha actividad. Sin embargo, para el crecimiento a largo plazo, la actividad debe ser autosuficiente.

Se requiere una infraestructura totalmente sostenible para el reciclaje y la recuperación de plásticos si se quiere desviar de los vertederos las grandes cantidades de material plástico disponible. Sin embargo, esto ocurrirá solo cuando se cree la demanda de los materiales del producto final y sea económicamente viable reciclarlos. Actualmente, esto ha significado que las actividades de reciclaje deben ser subsidiadas si no son comercialmente rentables. Por lo tanto, es fundamental que la industria del plástico continúe educando al público y a los usuarios potenciales de reciclado para crear y desarrollar la oferta y la demanda de estos materiales.

### **Necesidades de investigación**

Para el desarrollo de nuevas tecnologías de reciclaje se requiere una inversión suficiente tanto en investigación y desarrollo (I+D) como en nueva maquinaria y tecnología. La investigación debe dirigirse a las áreas de mayor necesidad industrial y, una vez desarrolladas, las tecnologías deben transferirse con éxito a la industria. Las guías de mejores prácticas deben estar disponibles para resaltar y difundir los métodos de tratamiento más actualizados y efectivos. Los intereses del diseño para el desmontaje y el reciclaje no comienzan al final de la vida útil de un producto. Comienzan con la concepción de un nuevo producto. Al introducir la necesidad de reciclabilidad en la etapa de diseño, se pueden reducir los problemas de eliminación de desechos. Si un producto es parte de un componente más grande, también se debe considerar el desmontaje.

Una vez que los materiales ingresan al flujo de reciclaje, tanto las aplicaciones como los consumidores deben encontrarse para los materiales reciclados. Esto crea demanda y permite que el material reciclado tenga valor económico en el mercado. Si el valor asociado del material es suficiente, entonces el reciclaje del material será rentable y sostenible. Estos materiales deben competir con los materiales vírgenes en términos de costo y calidad. Una tendencia importante en esta área es que los propios fabricantes de plástico están comercializando grados que contienen materiales reciclados, lo que elimina gran parte de la responsabilidad de los diseñadores en términos de encontrar formas de incorporar materiales reciclados. También aumenta la confianza en la calidad de los materiales reciclados. La falta de conocimiento sobre la consistencia de la calidad y las propiedades, a menudo una causa de resistencia a cambiar a reciclados.

Con la ayuda de estándares para estos materiales, se pueden identificar más fácilmente nuevos usos potenciales para los reciclados. El diseño de componentes para el desmontaje y el reciclaje, y la creación de una infraestructura capaz de manejar los materiales posconsumo son cuestiones que deben abordarse.

## EXAMEN FINAL

1. ¿Cuál de los siguientes tipos de materiales plásticos tiene una temperatura de fusión por debajo de su temperatura de degradación, lo que permite su reciclaje?
  - a. Elastómeros
  - b. Cualquiera de los anteriores exhibe estas propiedades.
  - c. Materiales termoestables
  - d. Materiales termoplásticos
  
2. La composición de materiales reciclados generalmente implica la siguiente secuencia de operaciones:
  - a. Mezclado > Peletización > Alimentación/transporte > Dosificación > Plastificación
  - b. Dosificación > Alimentación/transporte > Mezclado > Plastificación > Granulación**
  - c. Alimentación/transporte > Dosificación > Peletización > Mezclado > Plastificación
  - d. Plastificación > Dosificación > Alimentación/transporte > Mezclado > Granulación
  
3. ¿Qué afirmación es cierta para el moldeo por inyección y el moldeo por soplado?
  - a. El material fundido generalmente no requiere filtración de partículas sólidas no fundidas.
  - b. La homogeneidad de los reciclados de plástico de entrada es relativamente poco importante.
  - c. La homogeneidad de los reciclados de plástico de entrada es un aspecto crítico cuando se considera el reprocesado.**
  - d. La combinación de varias capas de materiales plásticos reciclados y nuevos no es una alternativa viable para aumentar la calidad del material final.
  
4. ¿Cuál de los siguientes procesos recomendaría para materiales reciclados que contengan papel y metales contaminantes?
  - a. Moldeo por intrusión**
  - b. Moldeo por transferencia
  - c. Ninguna de las anteriores
  - d. Moldeo sinterizado



5. Elija la declaración incorrecta:

- a. La adición de antioxidantes (por ejemplo, fenoles impedidos) es útil para retrasar la oxidación de las poliolefinas.
- b. Los absorbentes de UV, los extintores y las trampas de radicales se pueden usar para aumentar la estabilidad a la luz de los materiales reciclados.
- c. La aplicación prevista no es un factor relevante cuando se considera la aditivación de un material con estabilizadores.**
- d. El cloruro de polivinilo se ve especialmente afectado por la degradación por calor, por lo que requiere el uso de estabilizadores.

6. Elige la afirmación correcta:

- a. Las poliolefinas como el PE y el PP generalmente no son compatibles con otros materiales termoplásticos.**
- b. Si dos materiales son inmiscibles no hay forma de combinarlos en un solo material.
- c. Las poliolefinas como el PE y el PP son generalmente compatibles con casi cualquier otro material termoplástico.
- d. Todos los polímeros termoplásticos son compatibles y se pueden combinar en un polímero mixto.

7. ¿Cuál no es un aspecto relevante al considerar la producción de bienes de consumo a partir de plásticos reciclados?

- a. La pureza de los materiales de entrada.
- b. Los usos previos del material.
- c. Los esfuerzos térmicos y mecánicos sufridos previamente.
- d. Ninguna de las anteriores. Todos ellos son aspectos relevantes a considerar.**

8. La separación de flotación y hundimiento es...

- a. una técnica útil para separar polímeros de densidad similar (por ejemplo, PET y PVC).

- b. un método para eliminar contaminantes de un polímero (los contaminantes se hunden y el polímero flota).
- c. una técnica de separación de desechos orgánicos de materiales de desecho.
- d. a menudo se utiliza para separar poliolefinas con diferente densidad.**

9. Seleccione la afirmación correcta:

- a. El control de calidad de los materiales reciclados solo se refiere a las propiedades a largo plazo.
- b. El control de calidad de los materiales reciclados se refiere tanto a las propiedades a corto como a largo plazo.**
- c. No se requiere control de calidad de los materiales reciclados como lo es para los materiales vírgenes.
- d. El control de calidad de los materiales reciclados solo se refiere a las propiedades a corto plazo.

10. ¿Cuál de estas opciones no es una estrategia de recuperación?

- a. Vertedero**
- b. Reutilizar
- c. Reciclaje mecánico
- d. Reciclaje de materias primas

**Copyright: CC BY-NC-SA 4.0:**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Con esta licencia, es libre de compartir la copia y redistribuir el material en cualquier medio o formato. También puede adaptar, remezclar, transformar construir sobre el material.



y

**Sin embargo, sólo bajo los siguientes términos:**

**Atribución:** debe otorgar el crédito apropiado, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso.

**No comercial:** no puede utilizar el material con fines comerciales.

**ShareAlike:** si remezcla, transforma o construye sobre el material, debe distribuir sus contribuciones bajo la misma licencia que el original.

**Sin restricciones adicionales:** no puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.

La información y las opiniones expuestas en este informe pertenecen a los autores y no reflejan necesariamente la opinión oficial de la Unión Europea. Ni las instituciones y órganos de la Unión Europea ni ninguna persona que actúe en su nombre podrán ser considerados responsables del uso de la información proporcionada.

Cofinanciado por el  
programa Erasmus+  
de la Unión Europea

