



Guía para la
incorporación de

PCR

(resina reciclada posconsumo)

de PEAD

en envases de diferentes
aplicaciones.

BICIRCULO
La solución en sus manos



Guía para la incorporación de PCR (resina reciclada posconsumo) de PEAD en envases de diferentes aplicaciones

Financiado por:

VISIÓN 30/30 ANDI
www.andi.com.co
Calle 73 # 8 – 13 Piso 7 Torre A

Empresa encargada

Biocirculo 2 SAS

Autores

Cristian David López Vargas
Daniela Alejandra Villamarín Rivera

Revisores externos

Laura Flórez, directora Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho, (ICIPC)

Diseño editorial

Armónico

Concepto creativo

Alejandra Aguirre
Sergio Andrés Velásquez

Ilustración y diagramación:

Mariana Pachón
María Fernanda Vargas

Cita sugerida (formato APA)

López Vargas C, Villamarín Rivera D. (2024). Guía para la incorporación de PCR (resina reciclada posconsumo) de PEAD en envases de diferentes aplicaciones.
Bogotá, Colombia.

ISBN: 978-628-96623-0-6

Empresas aliadas

ALPLA COLOMBIA LTDA
AVIENT COLOMBIA S.A.S.
BRINSA SA
INYECCIÓN Y SOPLADO DE PLÁSTICOS S.A.S

Empresas de referencia

GRUPO CARLOS SANTAMARIA S.A.S.
INDUSTRIAS PATOJITO S.A.S.

Por encargo de

La Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI)
Las ideas vertidas en el texto son responsabilidad exclusiva de los autores y no comprometen la línea institucional de la ANDI.

Se autoriza la reproducción total del presente documento, sin fines comerciales, citando adecuadamente la fuente.

Contenido

Resumen	4
1. Introducción	6
2. Glosario	8
3. Contexto	12
3.1. Legislación y normatividad	13
3.2. PEAD y sus procesos de fabricación de envases	15
3.3. PEAD posconsumo	19
3.4. Cadena de inclusión de PEAD posconsumo en Colombia	22
4. Retos en la inclusión de PEAD posconsumo	36
4.1. Defectos del envase	37
4.2. Procesos de fabricación	43
4.3. Selección de materias primas	46
4.4. Mercadeo	48
5. Metodología de inclusión de PEAD posconsumo	50
5.1. Introducción a la metodología	51
5.2. Cimienta	52
5.3. Diseña	53
5.4. Prueba	59
5.5. Optimiza	60
5.6. Comunica	61
6. Casos prácticos	62
6.1. Caracterización de PEAD posconsumo nacional	63
6.2. Algunos ejemplos de validación	67
7. Recursos	74
7.1. Empresas	75
7.2. Bibliografía	75
8. Anexos	79
8.1. Algunas reacciones de degradación PEAD posconsumo	80



Resumen

Actualmente a nivel global **sólo se recicla el 9%** de los desechos plásticos producidos debido a que **no hay tecnologías o iniciativas a gran escala para su reutilización** y la separación en la fuente es ineficiente. A nivel internacional la legislación ha implementado medidas al respecto, mientras que en Colombia la Resolución 1407 de 2018 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques, buscando incrementar sus tasas de aprovechamiento. Además, la **Ley 2232 de 2022** del Congreso de la República, establece medidas tendientes a la reducción gradual de la producción y consumo de ciertos productos plásticos de un solo uso y adicionalmente asigna metas puntuales de recolección y aprovechamiento para el Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y otros plásticos.

El PEAD es la resina plástica que más se importa al país, de acuerdo con datos del Centro Virtual de Negocios (CVN); **aun así, presenta tasas de aprovechamiento menores a otros polímeros**, a pesar de que sus propiedades son favorables para ser utilizado varias veces. Su degradación genera variaciones en propiedades mecánicas al disminuir su rigidez, aumentar su elasticidad y disminuir su tenacidad. Con cada ciclo

térmico que sufre el material se reduce el tiempo de degradación oxidativa y con esto la capacidad de soportar altas temperaturas. Esta sensibilidad a la degradación lo hace más susceptible a adquirir colores característicos, y a reducir la resistencia a ataques químicos por agentes ambientales (por sus siglas en inglés ESCR).

También, la fluidex del PEAD posconsumo disminuye y hace más difícil su procesamiento y, por otro lado, la contaminación cruzada durante el reciclaje y la degradación del material origina puntos negros que afectan su hermeticidad y apariencia, aumentando cuando se presentan condiciones de temperatura mayores a 190°C por un periodo superior a 10 minutos.

El proceso de aprovechamiento actual del PEAD posconsumo en la industria colombiana se basa en 4 pasos: (1) **selección**, asegurando que el envase recogido, separado y entregado cumpla con las características que se requieren para su reincorporación; (2) **transformación y preparación del material**, reduciendo su tamaño y aplicando procesos que mejoran las características físicas, disminuyendo la densidad aparente y eliminando contaminantes con lavados; (3) **moldeo**, de la resina recuperada transformándola en envases funcionales, aplicando controles en los procesos para superar desafíos como la contaminación, la variación de tono,



la disminución de propiedades mecánicas y las perforaciones; y (4) **consumo final**, separando adecuadamente en la fuente y garantizando su ingreso ágil a la cadena de aprovechamiento, evitando contacto con condiciones que promuevan su degradación (agua, sol, rellenos sanitarios, entre otros).

Por otro lado, dada la complejidad del uso de materiales recuperados en la cadena, **se requiere una metodología adecuada para la correcta inclusión de PEAD posconsumo**. La metodología que se expone en el presente documento se basa en 5 etapas: (1) **comentar** con bases sólidas la información requerida por un comité de desarrollo y definir objetivos claros, (2) **diseñar** procesos que incluyan PEAD posconsumo partiendo del estado actual de la compañía, (3) **probar** las estrategias priorizadas integralmente por el comité, (4) **optimizar** los procesos para cumplir con los objetivos planteados y crear nuevos retos a partir del alcance, y (5) **comunicar** los resultados de las pruebas y nuevos desarrollos con argumentos sustentados que no permitan a los productos o envases caer en el “greenwashing”.

Al iniciar la implementación de la metodología **surgirán retos por el uso de PEAD posconsumo**, por lo tanto, la Guía contempla alternativas en **4 áreas de tra-**

bajo críticas: envase, proceso productivo, compras y mercadeo. Estas alternativas consideran tanto el impacto de las curvas de temperatura de la máquina, la temperatura de ingreso de material a la tolva, el uso de materiales molidos, el establecimiento de acuerdos de calidad con proveedores y clientes, como el desarrollo de campañas junto a productores y comercializadores.

A nivel sectorial, **el presente documento busca ser una herramienta que movilice a la industria a consumir materiales plásticos recuperados**, que dé cumplimiento a la normatividad actual y promueva estrategias sostenibles en el consumo y fabricación de envases plásticos a nivel global. Para lograr su implementación, se requiere de inversiones en tecnología, desarrollo de proyectos de investigación y ecodiseño, alianzas sectoriales, promoción de políticas en torno a la economía circular y medidas que aporten a la mejora de las condiciones operativas y administrativas de los gestores de residuos en el país.



1. Introducción

Introducción

En el mercado mundial hay una gran variedad de polímeros. Estos tienen una durabilidad limitada, en donde el nivel de degradación depende principalmente de los parámetros moleculares y del ambiente de exposición [1]. **Los plásticos tienen un gran valor económico y no deberían sólo desecharse;** una opción para su uso constante es el reciclaje, que cobra una importancia cada vez mayor como alternativa principal para evitar la contaminación del medio ambiente [2].

Cada año en el mundo se producen cerca de 300 millones de toneladas de residuos plásticos, de los cuales solamente se recicla el 9%, de acuerdo con datos de Nat-Geo2023. **Aunque técnicamente todos los plásticos pueden reciclarse, no todos tienen una cadena de reciclaje.** Esto debido a que es muy costoso reciclarlos, son difíciles de recoger o todavía no hay tecnologías o iniciativas a gran escala para su reutilización y/o cierre de ciclo [3].

A nivel internacional países como Austria, Francia, Portugal, España y Chile han instaurado legislación respecto a la gestión de estos residuos. Incluso la Unión Europea ha presentado su primer paquete de medidas para acelerar la transición a la economía circular [4].

En Colombia la Resolución 1407 de 2018, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, **reglamenta la gestión ambiental de residuos de envases y empaques de diferentes materiales**, incluidos los fabricados con plástico. Así mismo, la Ley 2232 de 2022 del Congreso de la República **busca incrementar las tasas de aprovechamiento de plásticos**, como el Tereftalato de polietileno (PET) y el Polietileno de Alta Densidad (PEAD), reglamentando el uso de materia prima posconsumo en la fabricación de botellas y envases y estableciendo metas puntuales de recolección y aprovechamiento.

El PEAD es el plástico que más se importa en Colombia de acuerdo con el CVN [5], lo cual induce a oportunidades de alto impacto legislativo, social y sostenible, **a partir de los retos para el 2030 de aprovechar el 30% de este material y lograr su recolección en un 50%**, de acuerdo con lo establecido en la Ley 2232 de 2022.

Por todo lo anterior, la presente guía identifica y desarrolla las ideas y estrategias necesarias para mejorar la inclusión de resina PEAD posconsumo en envases rígidos a partir de la recopilación de alternativas utilizadas en Colombia y el mundo.





2.

Glosario



Cizallamiento. Es una fuerza compuesta que se caracteriza por ser paralela a la superficie sobre la que se ejerce y tiende a dividir al cuerpo, desplazando entre sí las secciones que resultan del corte.



Envase secundario. Es aquel diseñado para contener un número determinado de envases y empaques primarios con el fin de dar protección adicional a las unidades de venta, para permitir una mejor manipulación o con fines comerciales [7].



Craqueo. Es un proceso químico por el cual se quiebran las moléculas de un compuesto produciendo así compuestos más simples. A menudo es causado por estrés térmico (calor) o radiación ionizante (por ejemplo, luz, radiación UV o radiación gamma), que a menudo involucra oxígeno [6].



Escisión de cadena. Degradación/división de la cadena principal de un polímero. A menudo es causado por estrés térmico (calor) o cizallamientos [8].



Comercializador. Persona natural o jurídica que comercialice y/o distribuya, al por mayor o al detal, productos o bienes envasados o empacados, en cualquiera de las fases de comercialización, incluyendo las ventas a distancia o por medios electrónicos [7].



Esferulita. Son regiones esféricas semicristalinas dentro de polímeros lineales no ramificados [9].



Densidad aparente. Es una propiedad de los polvos, gránulos y otros sólidos "divididos", se define como la masa de muchas partículas del material dividida por el volumen total que ocupan.



Fabricante/Importador. Persona que fabrique, importe envases y empaques o provea materias primas para la fabricación de envases y empaques, con fines de comercialización [7].



Envase primario. Es aquel de primer nivel o interior, es decir, que se encuentra en contacto directo con el producto. Es la mínima unidad de empaque que se conserva desde la fabricación hasta el consumidor [7].



Hermeticidad. De hermetismo, significa inaccessible, impenetrable o estanque. Se utiliza para establecer que un envase no presenta fugas por orificios en su cuerpo o deformación en su boca.



Higroscópico. Son compuestos que absorben agua de su ambiente [10].



Módulo de Young. Es el módulo de elasticidad para el esfuerzo de tracción y compresión en el régimen de elasticidad lineal de una deformación uniaxial, generalmente se evalúa mediante pruebas de tracción [11].



Molido. Se utiliza con frecuencia para describir el material plástico en forma de residuo generado en una operación de procesamiento de plásticos y reutilizado internamente [12].



Nucleación. Hace referencia a la formación de multímeros, los cuales son intermediarios en los procesos de polimerización. Se cree que este tipo de proceso es el mejor modelo para procesos como la cristalización [9].



Peletizado. Es el proceso de comprimir o moldear un material en la forma de una esfera, cilindro u otros.



Posconsumo. Término descriptivo que abarca el material generado por los usuarios finales de los productos, que ha cumplido su finalidad prevista o que ya no puede utilizarse (incluido el material devuelto dentro de la cadena de distribución) [12].



Posindustrial. Término descriptivo que abarca el material desviado durante un proceso de fabricación. Este término excluye el material reutilizado, como el retrabajado, el triturado o el residuo que se ha generado en un proceso determinado y que es susceptible de ser recuperado dentro de ese mismo proceso. El término preconsumo es usualmente usado como sinónimo [12].



Productor. Persona natural o jurídica que, con independencia de la técnica de venta utilizada, incluidas las ventas a distancia o por medios electrónicos: (a) Fabrique, ensamble o remanufacture bienes para su comercialización en el territorio colombiano, de su propia marca, siempre que se realice en ejercicio de actividad comercial con destino al consumidor final y que estén contenidos en envases y/o empaques; (b) importe bienes para poner en el mercado nacional con destino al consumidor final, contenidos en envases y/o empaques; (c) como titular de la marca exhibida disponga en el mercado los envases y/o empaques de los diferentes productos; (d) ponga en el mercado envases y/o empaques diseñados para ser usados por una sola vez [7].



Purga. Material resultante del paso del polímero a través de los equipos de procesamiento de plásticos con el fin de limpiar el equipo, al cambiar de un polímero a otro, o al cambiar de un color o grado de polímero a otro [12].



Tenacidad. Es la capacidad de un material para absorber energía y deformarse plásticamente sin fracturarse. Es una propiedad que indica la resistencia de un material a la fractura cuando hay una grieta (u otro defecto que concentra la tensión) [13].



Tiempo de residencia. El tiempo que pasa el plástico entre el fondo de la tolva y la boquilla de inyección u extrusión.



Transformador. Persona natural o jurídica que transforme material aprovechable en materia prima y/o producto final y lo devuelva a la cadena productiva y/o realice su valorización energética [7].





Contexto

En este capítulo se describen los aspectos legales, técnicos y teóricos fundamentales para realizar la transición hacia el uso de resina reciclada posconsumo (PCR) de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) en envases rígidos.

3.1. Legislación y normatividad

A nivel mundial se cuenta con diversos avances, normas o regulaciones que apuntan a disminuir el consumo de plásticos en aplicaciones innecesarias o donde su cierre de ciclo es inviable por factores sociodemográficos o tecnológicos, así como para regular el uso no sostenible de materiales no renovables. A continuación, se relacionan los principales ejes de interés que hoy movilizan la recuperación de los materiales plásticos a nivel global.

En enero de 2018 se impulsó la Estrategia de la **Unión Europea** (UE) sobre el plástico y en 2019 se legisló la Directiva UE 2019/904, donde se disponen propuestas para motivar la economía circular que se sustenta en tres pilares [14].



Mejorar la economía y calidad del reciclaje de plásticos.



Frenar los residuos plásticos y basura.



Impulsar la innovación y la inversión hacia soluciones circulares.

Mientras que, en **Estados Unidos** se está trabajando en la Estrategia Nacional para Prevenir la Contaminación por Plásticos, cuyos objetivos son reducir la contaminación durante la producción, mejorar la gestión de materiales después del uso y eliminar la basura y microplásticos que se escapan al medio ambiente [15] [16].

Por su parte, en **Chile** en 2021 entró en vigor la Ley 21368 que regula la entrega de plásticos de un solo uso y las botellas plásticas, para proteger el medio ambiente y disminuir la generación de residuos [17].

Para acoplarse a la tendencia mundial y a las necesidades ambientales del país, **Colombia** expidió la Resolución 1407 de 2018, modificada por la Resolución 1342 de 2020, del **Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible**; en la cual se reglamenta la conformación de planes de gestión ambiental de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio y metal, que, debido a sus características de baja biodegradabilidad, mal gestionados, contribuyen a la contaminación del suelo y agua. Así mismo, disminuye la vida útil de los rellenos sanitarios [7] [18].

También, en consonancia con la reglamentación internacional implementada alrededor de los plásticos de un solo uso, el **Congreso de la República de Colombia** estableció la Ley 2232 de 2022 en la cual se establecen medidas a la reducción de producción y consumo de ciertos productos plásticos de un solo uso. Allí, se incluyen dos metas de impacto para el año 2030: las botellas, envases y recipientes para contener líquidos elaborados con PEAD deberán aprovecharse en un 30% y ser recolectados al 50% [19]. Esta ley es complementada por la Resolución 0803 de 2024, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible donde se define el aumento anual de estas metas de aprovechamiento iniciando en 2025 al 18% y terminando con 30% en 2030 para PEAD, también se adicionaron metas de recolección para todos los envases y recipientes plásticos para contener líquidos, iniciando en 25% en 2025 y terminando con 50% para 2030.

Además, para reforzar la apuesta por la circularidad de los plásticos, la reforma tributaria de la Ley 2277 de 2022 del Congreso de la República, incluyó un impuesto a la venta de productos plásticos de un solo uso utilizados para envasar, embalar o empacar bienes, tanto a fabricantes como importadores, que contempla ciertas excepciones; por ejemplo, son excluidos de la obligación, los envases fabricados con 100% de materia prima reciclada [20].

3.1.1. Panorama sectorial en Colombia

El aprovechamiento de mayor valor en la industria consiste en lograr que el envase después de su uso sea transformado en materia prima de alta calidad para posteriormente ser utilizado en la fabricación de este mismo producto. Es decir, nuevamente envases, logrando así la circularidad. Para llevar esto a cabo, es necesario comprender las normativas que se han instaurado a nivel nacional que limitan el uso de PEAD posconsumo. Con este fin, se identifican reglamentaciones relacionadas en áreas específicas de la industria, como cosméticos, alimentos y fármacos.

3.1.1.1. Cosméticos, aseo, plaguicidas y productos de higiene doméstica

En cosméticos, aseo, plaguicidas y productos de higiene doméstica no hay normativas directas que prohíban el uso de material posconsumo en los envases; sin embargo, la Decisión 833 de 2018 de la **Comisión de la Comunidad Andina** (cosméticos) y la Decisión 706 de 2008 de la Comisión de la Comunidad Andina (productos de higiene doméstica y productos absorbentes de higiene personal) definen las siguientes directrices:



Garantizar que su uso no perjudique la salud del consumidor, así como la calidad y seguridad del producto.



Informar el material del envase primario y envase secundario, cuando corresponda, al solicitar la emisión de la Notificación Sanitaria Obligatoria (NSO).

Con esto, las áreas de aseo y plaguicidas son flexibles al uso del material posconsumo. Para los sectores de cosméticos e higiene doméstica, aunque tienen algunas restricciones, presentan oportunidades teniendo en cuenta algunos casos de pruebas de migración específica o global, según sea el caso (NTC 5022/5023). [21] [22].

3.1.1.2. Alimentos y bebidas

El uso de material posindustrial, descarte industrial y posconsumo está prohibido para envases primarios en contacto con alimentos; según la Resolución 4143 de 2012 del **Ministerio de Salud y Protección Social**. También, está prohibida la reutilización de empaques y

envases plásticos sin autorización del **Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos** (INVIMA). Sin embargo, se determinan las siguientes excepciones:

- El material de descarte de los mismos procesos, que, por estar limpio y sin degradar, puede utilizarse usualmente mezclado con material virgen.
- Para envases y empaques multicapa o con barrera funcional para consumo de PEAD posconsumo, la barrera debe ser de primer uso (material virgen) y el producto debe tener autorización de uso por el INVIMA.
- Uso de material posconsumo con proceso de ultralimpieza validado por la **Administración de Alimentos y Medicamentos** (FDA, por sus siglas en inglés), **Unión Europea o Mercosur**.

Se presentan varias opciones de interés para cumplir con la inclusión de PEAD posconsumo en envases alimenticios, teniendo en cuenta la criticidad que se da en el contacto directo y en la baja seguridad sanitaria que presentan los productos sin procesos de sanitización [23].

3.1.1.3. Medicamentos y productos biológicos

En medicamentos y productos biológicos no hay normativas directas que prohíban el uso de material posconsumo en los envases; sin embargo, el Decreto 677 de 1995 de la Presidencia de la República de Colombia define que deberán estar fabricados con materiales que no produzcan reacción física o química con el producto y que no altere su potencia, calidad y pureza. El INVIMA, previo concepto técnico, aprobará o no los envases de los medicamentos al momento de otorgar el registro.

El material posconsumo se encuentra usualmente contaminado con productos químicos de varias procedencias, en ellos se pueden encontrar diferentes compuestos que afectan el producto interno y pueden producir reacciones químicas inesperadas. Con esto, si se logran acotar y controlar las posibles reacciones químicas que afecten el medicamento, se podrían generar nuevas metodologías de trabajo [24].

3.2. PEAD y sus procesos de fabricación de envases

El Polietileno de Alta Densidad (PEAD) es un plástico que se obtiene a partir del etileno, derivado de la extracción de hidrocarburos de refinería o a partir de gas natural. El principal uso del PEAD es la fabricación de envases [25].

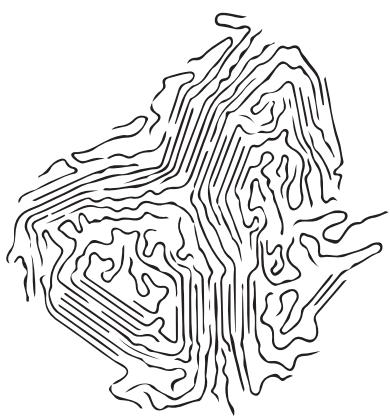
Es ampliamente usado en moldeo por extrusión soplado en envases para leche, químicos de uso doméstico, productos automovilísticos, químicos industriales, productos de cuidado personal, artículos de aseo y cosméticos; este moldeo puede ser por extruido-soplado o por extruido-inyectado-soplado. **Es un material de bajo costo con un excelente balance entre rigidez y tenacidad**, en un amplio rango de temperatura. En su estado natural, es un material translúcido y lechoso. Es fácilmente pigmentable para un amplio rango de colores [26].

3.2.1. Propiedades

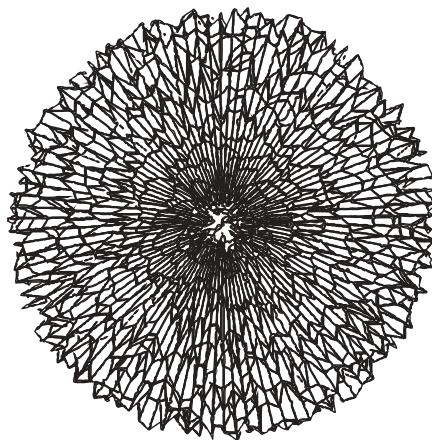
Cuenta con una excelente barrera a la humedad, pero no a los gases, por ello no es adecuado para productos sensibles al oxígeno, a menos que se utilice en multi-capas, con una barrera contra el oxígeno. Tiene buena resistencia a ácidos y bases fuertes, pero puede hincharse con solventes hidrocarbonados. En contacto

con solventes polares en el medio ambiente genera estrés y craqueo. **Es químicamente la estructura más cercana al polietileno puro.** Mantiene la organización por la baja cantidad de ramificaciones (Ilustración 1-a), por ello alcanza altas densidades en comparación a otros polietilenos [26].

Ilustración 1. Representación esquemática del PEAD.



a. Modelo general de ordenamientos semicristalino.



b. Esferulitas formadas en los sitios de nucleación.

Fuente: Textos Científicos, 2014 [27].

El polietileno tiene estructura semicristalina, es decir, tiene regiones con organización a corto alcance (cristales), intercaladas con regiones de poco orden (amorfas). Las estructuras a gran escala compuestas por cristales, se llaman esferulitas y se forman radialmente desde el sitio

de nucleación (inicio polimerización), formando esferas que, a mayor grado de cristalización, mayor es su densidad (Ilustración 1-b). La cristalinidad aproximada del PEAD es del 60% al 70%. Las propiedades físicas más relevantes se encuentran en la Tabla 1 [9].

Tabla 1. Propiedades generales PEAD.

Propiedad	Unidades	Valor promedio
Densidad	Kg/m ³	Entre 930 y 970
Punto de fusión	Celsius (°C)	130-137
Temperatura de cristalización	Celsius (°C)	111,9
Índice de fluidez (IF)	g/10 min (190°C)	0,05 - 40

Fuente: Peacock, 2000.

3.2.2. Métodos de fabricación de envases

En el procesamiento del PEAD hay varios tipos de moldeo para la producción de envases rígidos. En la industria colombiana el moldeo por soplado y el moldeo por inyección son los tipos más frecuentes y que pueden técnicamente utilizar materiales posconsumo granulados.

3.2.2.1. Moldeo por soplado

Es usado para la manufactura de productos plásticos huecos como botellas y otros contenedores. Los pasos básicos son:



Fundir el material: se alimenta una extrusora con la materia prima, donde se calienta y plastifica para formar una masa termoplástica.



Moldeo por soplado: el parisón se coloca en un molde de soplado que se cierra alrededor, se introduce aire comprimido dentro y así toma la forma externa en contacto con el molde, se enfriá y solidifica.

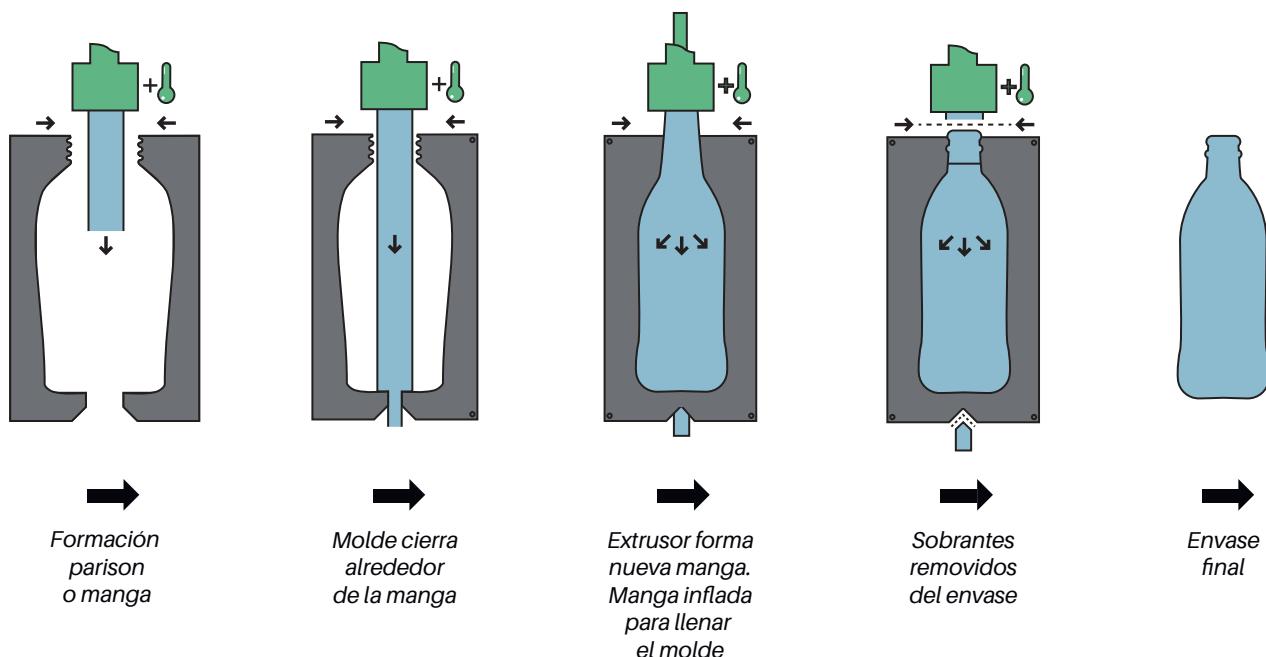


Formación del parisón: la masa fundida se extruye a través de una boquilla para formar un tubo hueco llamado parisón.



Expulsión y rebabado: la pieza se retira del molde y se retiran los sobrantes.

Ilustración 2. Disposición global del proceso de fabricación y uso de envases rígidos de PEAD.



Fuente: Thielen, 2021

Existen variaciones en el proceso para formar envases con diferentes utilidades específicas:



Coextrusión o envases multicapa: por medio de capas intermedias se logra funciones específicas en los envases. Por ejemplo, barreras contra oxígeno, **inclusión de materiales recuperados** o disminuir el uso de pigmentos.



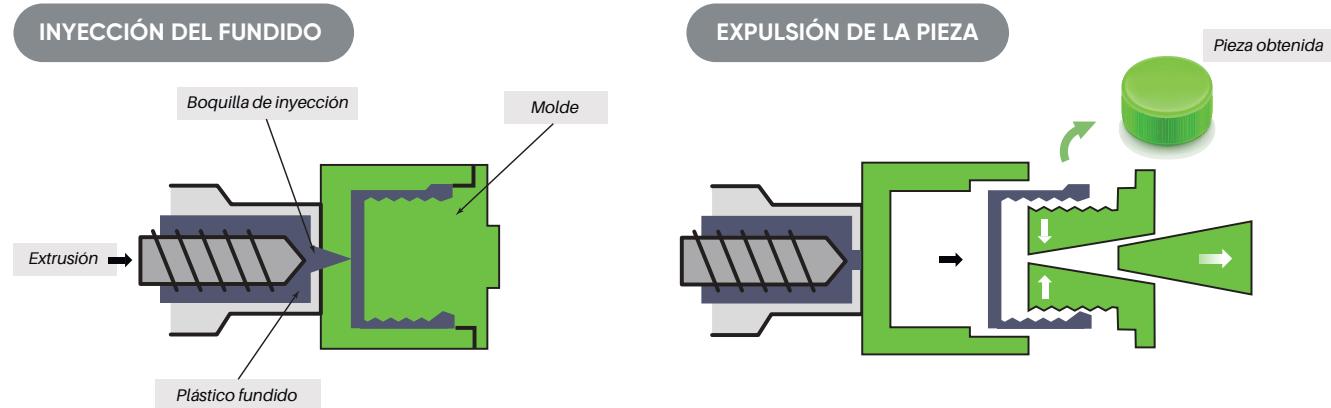
Etiquetado en molde: al utilizar un robot y aprovechar las altas temperaturas que trae el material fundido, se logra colocar la etiqueta desde el moldeo y se conserva hasta el proceso de aprovechamiento.

3.2.2.2. Moldeo por inyección

Es el proceso de transformación de termoplásticos más comúnmente utilizado, y se basa en la capacidad de estos materiales de ablandarse cuando están calientes y de endurecerse cuando se enfrián. El proceso consiste en calentar el material en una unidad de plastificación, compuesta por un cilindro y un tornillo, e inyectarlo bajo presión dentro de un molde, donde se va a enfriar y conformar (Ilustración 3).



Ilustración 3. Esquema general de una inyectora plástica.



Fuente: Chanda, 2018.

3.2.2.3. Equipos adicionales

En los procesos de fabricación de los envases se utilizan equipos para controlar con mayor eficiencia la productividad:

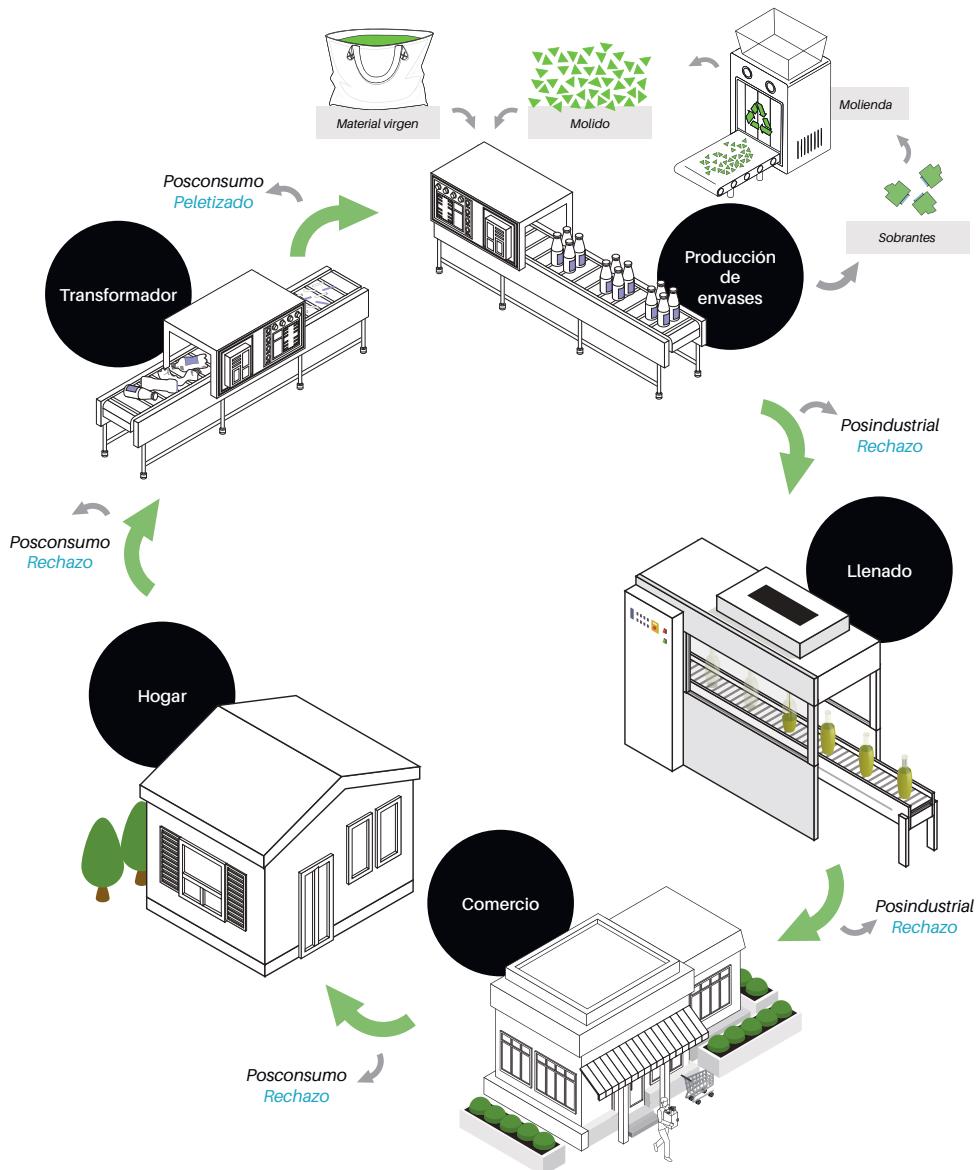
- **Molinos:** los sobrantes, tortas, coladas y otros desperdicios del proceso que por su poca manipulación se encuentran limpios, se transforman en piezas pequeñas por molienda y se dosifican a la mezcla de ingreso de material de manera gradual [2].
- **Reguladores de espesor de la pared:** el parisón puede o no tener un control de espesores en la boquilla, donde se regula la dosificación de material que se extruye, creando un parisón de espesores distintos en la vertical, generando que al soplar y estirar se conforme un envase de forma irregular con espesores similares [28].
- **Regulación gravimétrica del volumen de materia prima:** se controla la cantidad de material que ingresa a la tolva, para evitar exceso o disminución de material en el tornillo que agreguen o retiren peso a la masa fundida y que se generen variaciones en el parisón al extruir [2].
- **Sistemas de inspección automático:** implementos para controlar la estructura, apariencia, funcionalidad y uniformidad del envase de forma visual o mecánica [29].

3.3. PEAD posconsumo

Durante el procesamiento de poliolefinas en extrusores y máquinas de moldeo por inyección, la exposición de los polímeros al oxígeno, calor y fricción son preva-

lentes. Esto influye en la degradación de los materiales, causando cambios en el comportamiento de la fluidez, aumento en amarillamiento y olores fuertes [30, 31].

Ilustración 4. Disposición global del proceso de fabricación y uso de envases rígidos de PEAD.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.1. Degradación

La reducción de propiedades mecánicas, resistencia química, atributos estéticos y procesabilidad de un material por un agente determinado es llamada degradación. Incluso **un pequeño grado de reacción** puede generárla, repercutiendo en **enormemente en las propiedades físicas del material**. Después de la polimerización, las poliolefinas están sujetas a varios procesos donde se extruyen o inyectan y en este procesamiento la **temperatura y el cizallamiento** empleados causan reacciones químicas (Anexo 8.1-a). También, otras reacciones producidas por el **oxígeno y radiación** pueden ocurrir después de la disposición del consumidor final. Las reacciones más representativas que degradan el material son la reticulación, la escisión de cadena y la oxidación; cada una de ellas está relacionada al cambio en propiedades del material [8, 32].

La reticulación genera cadenas más largas y pesadas, que no necesariamente son igual de lineales al PEAD original (Anexo 8.1-b); con esto, se reduce la cristalinidad ya que disminuye el empaquetamiento de cadenas. También, la fluidez de un material tiene una relación estrecha con el peso molecular promedio y la proporcionalidad es inversa [33] [34]. Así, **la reticulación disminuye la fluidez**, variable relacionada a la procesabilidad en la fabricación [35, 36].

La escisión de cadena causa cadenas poliméricas más cortas debido a la tracción física o a las reacciones

de oxidación (Anexo 8.1-f). Estas generan moléculas que pueden reaccionar con otras y causar reticulación. Sin embargo, en presencia de oxígeno se favorece la oxidación, generando estructuras de bajo peso molecular, volátiles y oxidadas (Anexo 8.1-c, d y e). Los ácidos carboxílicos de 5 a 10 átomos generan **oleros fuertes y amarillamientos**, junto con algunos carbonilos de bajo peso molecular como el 8-nonenal (olor característico en la degradación del PEAD) [37, 38].

La oxidación también se puede dar cuando el Polietileno se encuentra en condiciones ambientales con presencia de oxidantes, en la disposición del cliente final o en rellenos sanitarios; en consecuencia, **el tiempo entre la producción del envase y el reprocesso es la variable clave para evitar la degradación y los cambios de color**. La oxidación al producir moléculas más cortas disminuye la fluidez del material, aumenta la rigidez y reduce la flexibilidad. Esto es, porque la reticulación es favorecida por encima de la oxidación durante los procesos productivos, por ello, generalmente la fluidez disminuye [39, 40].

Los malos olores por absorción también son comunes en el PEAD, debido a la **migración de sustancias de bajo peso molecular** dentro de las cadenas poliméricas cuando el plástico entra **contacto directo con productos que mantienen olores específicos**, como suavizantes, herbicidas, jabones y productos en descomposición en su disposición final [38].



3.3.2. Defectos comunes

El uso de **PEAD posconsumo** afecta de varias maneras la producción de envases rígidos y la variación de propiedades físicas devela la necesidad de modificación del proceso para acoplarse. Los defectos que más están relacionados al PEAD posconsumo son los siguientes:

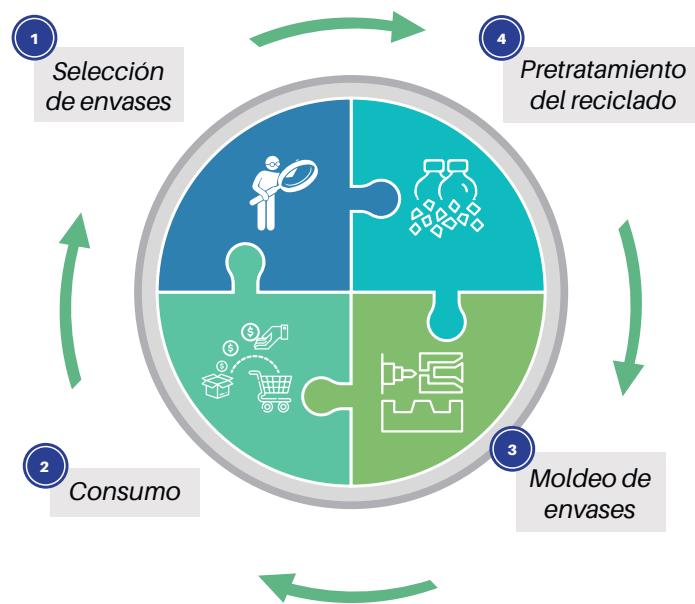
- **Contaminación:** debido al contacto que ha tenido el PEAD posconsumo con sustancias de distintos materiales durante su reprocesso para reutilizarlo, **puede contener trazas de algún otro polímero o metales** (PET, ABS, PS, PC, aluminio, acero y otros). Estos pueden quemarse y generar un “**punto negro**”; algunos materiales al no ser estirables **dificultan la expansión uniforme del parisón o manga**, generando orificios que afectan la hermeticidad del envase. Este defecto también se puede generar en el procesamiento de los molidos del mismo material, que si tienen partículas muy pequeñas (finos), **en tiempos de residencia prolongados se degradan produciendo esta coloración.**
- **Cambios en la rigidez y elasticidad:** Debido a la variación de cristalinidad por las reacciones que ocurren en el procesamiento inicial y en la cadena de disposición del mercado.
- **Amarillamiento:** Por los procesos de oxidación que ocurren en todos los pasos de la cadena.
- **Olores fuertes:** Generados por el contacto que tiene el PEAD con distintas **sustancias con olores específicos.**



3.4. Cadena de inclusión de PEAD posconsumo en Colombia

La cadena de aprovechamiento de PEAD posconsumo es emergente en Colombia y está en crecimiento. En el presente capítulo se detalla paso a paso.

Ilustración 5. Esquema general de cadena de aprovechamiento de PEAD



Fuente: Elaboración propia.

3.4.1. Selección de envases

En el proceso de inclusión de PEAD posconsumo en envases rígidos, la recolección e identificación del material en el mercado es realizada en varias fases y es ejecutada por el cliente final, recicladores de oficio, asociaciones, bodegas de reciclaje o transformadores.

Para llevar a cabo la selección y separación, se tiene en cuenta: la **codificación del material** que puede tener el envase, reconocer las características propias del material, identificar el tipo de procesos de producción y entrenar al personal seleccionador respecto a marcas o etiquetado. En el caso de la identificación por parte del fabricante, es utilizada la **codificación de plásticos** estándar (ASTM D7611) por medio del triángulo de Möbius, que representa el PEAD con el **número 2** y puede estar en relieve o sobre el etiquetado.





Las características propias del material también pueden otorgar la información para segregarlo; el PEAD en su estado natural, es un material **traslucido, lechoso** y con **alta rigidez**. Es fácilmente pigmentable y se utiliza en su mayoría para envases de artículos de aseo, contenedores de lácteos, químicos de uso doméstico, productos de cuidado personal y cosméticos. Además, al ser menos denso que el agua se puede diferenciar de otros plásticos (como el PS, PVC, PET y otros) a través de métodos de separación por flotación.

Cada proceso de fabricación de envases de PEAD requiere propiedades diferentes de su materia prima; por ello, se encuentran distintos grados de este material en

el mercado [41]. Para diferenciarlos a macro escala, se tienen en cuenta características según el proceso.

Los productos de **inyección** suelen tener paredes más gruesas y una apariencia más robusta y siempre cuentan con un **punto de inyección en la superficie** (canecas de pintura, botellas de alcohol pequeñas, entre otros); los envases producidos por **extrusión-soplado** suelen ser flexibles, deformables fácilmente y cuentan con **líneas verticales del cierre de moldes** (botellas de blanqueador, detergente y suavizantes); mientras que el rotomoldeo suele producir envases muy grandes y huecos, con la superficie más suave y uniforme (tanques industriales).

Ilustración 6. Características atributivas de los envases que determinan el tipo de proceso realizado para su producción.



Fuente: Elaboración propia.

Actualmente, la técnica de clasificación más utilizada es la **separación manual**, donde el personal debe conocer los envases y materiales del mercado. Inicialmente se separa visualmente por color, grado de PEAD y rechazo. La **merma** de este proceso **puede ser mayor a un 20%** del material que ingresa y se refiere a:

- Envases de otras resinas plásticas (PVC, PP, PET y otros).
- Envases de pintura, silicona y pegantes muy contaminados para ser procesados.
- Presencia de otros materiales y piezas multimaterial o con materiales contaminantes para el proceso (atomizadores, metales o láminas de aluminio, desodorante con roll-on).
- Envases con cargas/fillers de materiales diferentes no compatibles con la cadena de reciclaje (CaCO₃, talco y otros).

3.4.2. Pretratamiento del reciclado

Las condiciones de los envases en la recolección y separación no cumplen con los estándares de los fabricantes; por ello, es necesario realizar unos procesos de transformación que van a asegurar que los materiales tengan características similares a los materiales vírgenes. Para lo cual, es necesario cumplir, como mínimo, con las siguientes etapas: trituración, lavado, secado y peletizado.

3.4.2.1. Trituración

La **reducción de tamaño** se realiza inicialmente en **molinos**, donde ingresan envases completos y salen hojuelas de un tamaño menor, con una **distribución de tamaños entre 3 mm y 8 mm**. Su forma es irregular, como se muestra en la Ilustración 7, lo cual **disminuye su densidad aparente**.

Ilustración 7. Hojuela de PEAD color blanco, azul y multicolor.



Fuente: Biocirculo, 2024.

La densidad teórica de este material se encuentra entre 940 y 960 Kg/m³. En la práctica, al usar material en las tolvas, bolsas o big bags, la densidad aparente disminuye debido a la tasa de compactación en el empaquetado. **El material molido tiene una tasa de compactación o densidad aparente entre 300 y 500 kg/m³**, con distribuciones amplias dentro de los mismos lotes.

Dentro de estas distribuciones de tamaño se encuentran partículas muy pequeñas, llamados **finos** (menores a 2 mm). Estas partículas de tamaños y masas menores a los esperados en el proceso se pueden eliminar durante el lavado o mediante el uso de un separador de finos. También se pueden encontrar **hojuelas de gran tamaño** (superiores a 12 mm en alguna de sus dimensiones) que van a afectar su procesabilidad, ya que pueden atascar la entrada al tornillo o disminuir la tasa de compactación. En general, **tener hojuelas con una amplia de distribución de tamaño dificulta el procesamiento**, ya que la relación entre área superficial y volumen de cada una de las partículas determina qué tan rápido se funde. Además, las hojuelas de diferente tamaño suelen obstaculizar la alimentación.

El material molido aún tiene contaminantes críticos para los procesos siguientes, por ello es necesario el lavado.

3.4.2.2. Lavado

El material que se recupera contiene trazas del producto para el cual fue usado; también se encuentra contaminado con **productos orgánicos** (restos de comida, vegetales, desechos varios) e **inorgánicos** (piezas de metales, gomas y otros plásticos) con los que pudo tener **contacto antes de recuperarse**. Para controlar la mayoría de los contaminantes se utilizan procesos de limpieza para garantizar las propiedades del material.

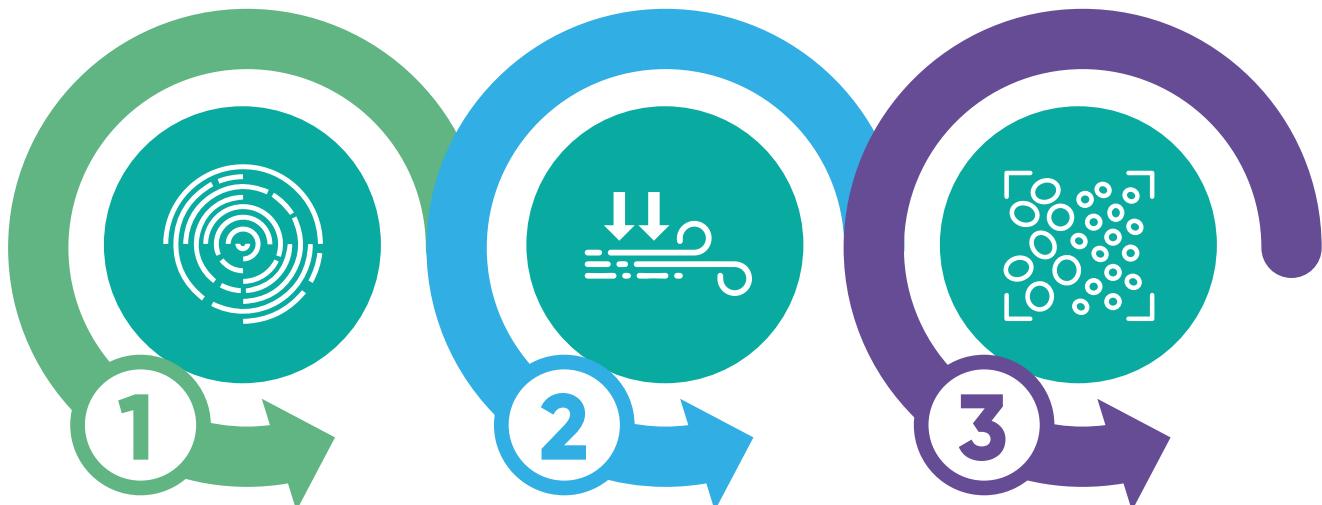
El lavado se realiza en tanques con agua y se separan la mayoría de los contaminantes por densidad. La densidad del PEAD y PP los hace flotar en el agua y los plásticos más densos como PVC, PET y otros se depositan en el fondo de estos tanques. En la mayoría de los casos, para realizar el lavado, se utiliza Hidróxido de Sodio (NaOH) y detergente en un tanque con alta temperatura. Los porcentajes de su dosificación pueden variar según recomendaciones del proveedor; sin embargo, se mantienen en rangos entre 0,05% y 2% de ambos componentes. En diferentes estudios se ha determinado que **el aumento de la dosificación de NaOH** en estos tanques **aumenta la tasa de oxidación** y disminuye la resistencia del material a la degradación térmica [42].





3.4.2.3. Secado

Las poliolefinas son materiales no **higroscópicos** por lo que no absorben humedad, por ello, los procesos de secado para el PEAD consisten en la **separación mecánica**, basadas en 3 pasos:



Centrifugado, donde el agua y materiales muy pequeños, van a ser expulsados por la matriz

Flujo de aire caliente a presión

Separación de finos y etiquetas, con sistemas de succión por vacío o corrientes de aire transversales a la caída en cascada del material

3.4.2.4. Peletizado

En los procesos de fabricación del envase es importante garantizar la dosificación constante de la materia prima sin que varíe en gran medida su tasa de flujo durante un proceso continuo; además, **el material molido no es óptimo para ingresar directamente en la tolva** de los procesos de fabricación en dosificaciones mayores al 40%. En cambio, el proceso de peletizado garantiza **la densidad aparente en tolerancias menores que el material molido**, con valores entre 500 y 600 kg/m³. La peletización facilita tanto la dosificación en la tolva como el procesamiento en el tornillo de plastificación, debido a que los tornillos convencionales están

diseñados para generar las funciones de alimentación, transporte y compresión a partir de **partículas de forma granular**.

El proceso de peletizado consiste en fundir el material por medio de un tornillo de calentamiento, con salidas de gases que garanticen una disminución en los olores fuertes y la humedad. Después de que se funde, se fuerza el material a través de una matriz y se corta. El corte de estos se puede dar en frío o en caliente; también es conocido como **corte en filamentos** (*pellet*) o **corte a la cabeza** (*lenteja*), respectivamente (Ilustración 8).

Ilustración 8. Tipos de corte del material PEAD fundido.



a. corte en filamentos (pellet)



b. corte a la cabeza

Fuente: Elaboración propia

El color de estos materiales depende principalmente de la materia prima utilizada para su producción; **los colores que más se encuentran** en el mercado son **natural, blanco, azul, multicolor y negro**. El color varía según la corriente de recolección y tiende a presentar tonalidades amarillas (degradación que se presenta por su uso y transformación) o grises (por la mezcla de múltiples pigmentos). El material multicolor es una mezcla de los distintos colores presentes en los envases que se encuentran en el mercado y que se presentan en proporciones pequeñas, que, si son separados indivi-

dualmente, aumentaría el costo sin beneficio inmediato por factores logísticos y comerciales. Adicionando, el material negro es multicolor con pigmentación aplicada durante el proceso de peletizado.

Posteriormente, el material pasa por una **criba o malla** que separa cualquier residuo o partícula no deseadas; esto garantiza que los gránulos sean uniformes y de alta calidad. Se finaliza con el empaque; en Colombia se comercializa usualmente en presentaciones por bulto (25-30 kg) o big bags (500 - 1000 kg).

3.4.3. Moldeo de envases

Durante el proceso de moldeo se deben considerar 5 variables que van a afectar la procesabilidad de un material posconsumo y que va a repercutir en el producto final: (1) **la calidad del PEAD posconsumo** que, dependiendo de su procedencia y procesos realizados anteriormente, va a desencadenar las características para su uso; (2) **proceso de moldeo**, al controlar las condiciones específicas según la variación en la propiedades mecánicas y reológicas que ofrece el material posconsumo; (3) **diseño de molde**, donde se refuercen o cambien zonas de tensión críticas en los envases; (4) **aditivos y mezclas**, al presentarse variaciones de propiedades mecánicas, químicas y térmicas de gran impacto que no se puedan controlar totalmente en el proceso y (5) **control de calidad**, al identificar y controlar las variables que más afectan a los envases fabricados con PEAD posconsumo.

3.4.3.1. Calidad de la materia prima PEAD posconsumo

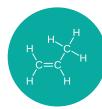
El valor generado al utilizar materia prima posconsumo puede verse opacado por la variación que tiene en sus propiedades; por esto, **es necesario que el proveedor garantice características óptimas para el proceso**. Un proveedor de material recuperado que entrega una ficha técnica con **valores que sean reproducibles** y dentro de rangos aceptables dentro del proceso, incrementa el valor del material procesado. Existen metodologías de caracterización de PEAD posconsumo (EN 15344/15347); las variables de mayor impacto son:



Índice de fluidez: identificando que el material va a fluir de la forma indicada, extruyendo el parisón de la forma y velocidad adecuada en el caso del soplado o que llene la cavidad en tiempos razonables en el caso de la inyección (ASTM D1238, ISO 1133).



Humedad: aunque el PEAD es un plástico no higroscópico, puede encontrarse trazas de agua por mal manejo del material. El comportamiento funcional y atributivo se ve bastante afectado, ya que genera piel de naranja, burbujas o formación no uniforme del parisón (ASTM D6980/7191).



Contenido de Polipropileno (PP): aumentar la dosificación del PP en el PEAD disminuye las propiedades mecánicas del material, por lo que se debe controlar en valores usualmente menores al 5%, a menos que se usen agentes estabilizantes (PE-g-mah) [43].



Densidad aparente: para que la dosificación del material sea óptima, la densidad aparente debe permanecer en valores que la máquina pueda dosificar, usualmente por encima de 500 kg/m³ (ASTM D1895).



Nivel de filtración: Indica el tamaño de la apertura de las mallas o filtros utilizados para eliminar los contaminantes del material en procesos de peletizado.

Adicionalmente, existen variables relacionadas al comportamiento mecánico y térmico del material como: impacto izod (ASTM D256), propiedades de tensión (ASTM D638) y flexión (ASTM D790) y determinación de polímeros foráneos (ISO 11357-3). Las variables atributivas se tienen en cuenta según los acuerdos que se hayan realizado con el área de mercadeo para su aceptación; **principalmente se basan en la variación de tono acordada con el proveedor** y la cantidad de puntos negros que se observan en la superficie del envase (Ilustración 9). En el numeral 4.1 se describen las estrategias para controlar variables inesperadas en los envases.

Ilustración 9. Envase de PEAD con contaminación o puntos negros.

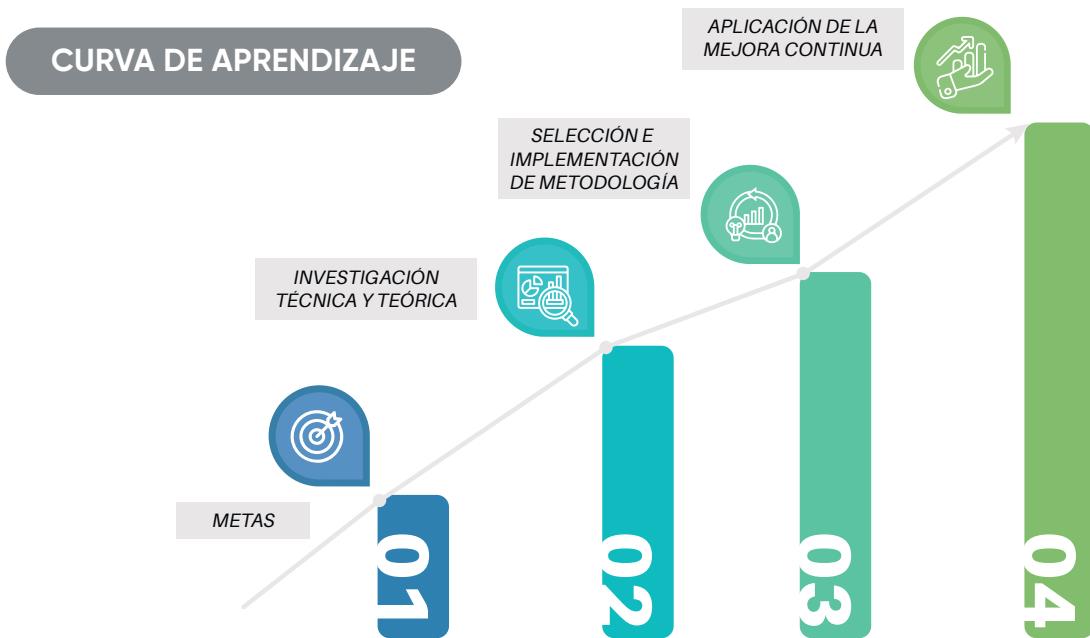


Fuente: Elaboración propia

3.4.3.2. Proceso de moldeo

El material posconsumo varía sus propiedades mecánicas, químicas y térmicas en comparación a un material virgen; sin embargo, **la implementación puede llegar a realizarse hasta en un 100% de material recuperado**. Si bien sus propiedades son distintas, los procesos de fabricación tienen la versatilidad para usarlo. Si de parte del proveedor se garantiza una calidad continua del material, es posible crear nuevos procedimientos de procesamiento, teniendo en cuenta la curva de aprendizaje que representan (Ilustración 10).

Ilustración 10. Curva de aprendizaje en la inclusión de PEAD posconsumo en envases rígidos.



Fuente: Elaboración propia

Las variables de mayor impacto en la degradación de la resina son: **la temperatura, el tiempo de residencia, el cizallamiento y la cantidad de reprocessos** que tenga el material. Para realizar la inclusión de PEAD posconsumo es importante basarse en una metodología funcional, como la descrita en el numeral 4, donde se definen variables de interés para el proceso de inclusión del PCR. Además, las estrategias específicas por proceso que genera la inclusión de este material se describen en el numeral 4.

3.4.3.3. Diseño de molde

El molde cumple un rol imperativo en la producción de envases rígidos; por ello, las variables que lo afectan también repercuten en el producto final. **La temperatura del molde, el tiempo de inyección, la presión y el tiempo de sostenimiento** están directamente **relacionados con propiedades mecánicas** del producto final [44].

Los puntos de tensión en el diseño del envase también inciden en sus propiedades finales; las curvaturas pronunciadas (con radios agudos) o las acumulaciones de material van a generar distribuciones de energía no uniformes en las pruebas de impacto y deformación vertical u horizontal. En el numeral 4.2 se describen las alternativas relacionadas al proceso productivo.

El molde debe estar preparado para el uso de PEAD posconsumo, empezando con la **mejora en los materiales usados para su fabricación**, ya que un molde convencional sufre desgaste acelerado y podría no garantizar las especificaciones dimensionales del producto. También, dependiendo del diseño, se pueden acordar variaciones máximas en un molde convencional

3.4.3.4. Aditivos y mezclas de material

Actualmente **la cadena del PEAD posconsumo en Colombia es en su mayoría lineal**, es decir, los envases que se recuperan son fabricados principalmente con material virgen, por lo que las propiedades no se han visto afectadas a gran escala hasta el momento. No obstante, debido a las regulaciones nacionales y las estrategias que se están implementando, el porcentaje de material posconsumo con varios ciclos de transformación aumentará y, con ello, el deterioro constante de las propiedades mecánicas, térmicas y químicas. Para ese punto, será necesario el aumento de uso de aditivos para estabilizarlo y encontrar un punto de equilibrio en la industria.

Existen aditivos de uso especial según la necesidad, los que más se integran en estos nuevos procesos en busca de la circularidad, son los orientados a **evitar degradaciones del material** (aditivos estabilizantes y antioxidantes).

Por otro lado, **la variación de color en el envase final** es un defecto de alto interés en la industria actual, esto debido a que los materiales posconsumo usualmente no aseguran un color específico o variaciones, como es usual en el manejo de resinas vírgenes. Para ello, **existen alternativas ofrecidas por los proveedores de los pigmentos**, quienes estudian las capacidades de color de la materia prima posconsumo para desarrollar el pigmento específico del envase.

3.4.3.5. Control de calidad en proceso

La implementación de procesos con PEAD posconsumo impacta de manera significativa el aseguramiento de la calidad, debido a que algunos defectos van a aparecer en los envases. Para suplir esto, es necesario **conformar un buen equipo con el área de mercadeo** y el cliente final, para llegar a acuerdos teniendo en cuenta las capacidades propias de la resina recuperada.

Los defectos que atributivamente pueden verse afectados por el uso de resinas posconsumo son los siguientes:



Puntos negros o contaminación: idealmente el proveedor de la resina utiliza mallas para filtrar el material de partículas con tamaños mayores a 200 micrómetros. Los menores a esto se pueden notar a simple vista, pero no afectan la funcionalidad del envase si el espesor de las paredes es el suficiente, por lo que es un problema de apariencia. Algunas estrategias de control se describen en el numeral 4.1.



Color: los procesos productivos que incluyen este material poseen la particularidad de la variación de tono, que se puede mejorar en gran medida según las recomendaciones del numeral 4.1. Igualmente, las variaciones también existen dentro de los procesos de material virgen; por ello **es necesario concientizar al área de mercadeo y al cliente final respecto a las desviaciones** que puede tener el envase o, si el material lo permite, manejar las variacio-



nes de color con metodologías dimensionales, como el uso de espectrodensitómetros y espectrofotómetros que determinan las dimensiones de color.

Respecto a defectos relacionados a la funcionalidad, se han investigado los siguientes:



Perforaciones: Las contaminaciones o puntos negros no son estirables en la extrusión de la manga, por ello, al presentarse en tamaños cercanos o superiores al espesor del envase, van a generar un orificio que perjudica la hermeticidad y, por ende, puede fugar el producto final en el proceso de envasado. Para manejar esto, es necesario el control de materiales al ingreso, asegurar una buena calidad del material y tener un proceso de identificación de fallos de hermeticidad en los envases como probadores de fuga. Estos deben ser evaluados constantemente con base en orificios mayores a 0.5mm o el límite de detección específico de cada equipo de detección de fugas.



Propiedades mecánicas: La flexibilidad tiende a aumentar con el uso de PEAD pos-consumo, por lo tanto, la rigidez disminuye. Esto puede afectar pruebas funcionales, como las de impacto o de deformación vertical-horizontal. Al aumentar la flexibilidad, la difusión de la energía en los impactos es más uniforme; sin embargo, la deformación vertical-horizontal de los envases es mayor, con lo que pueden presentar compresiones inesperadas en los procesos de llenado y transporte. Se pueden mantener estas variables controladas, mediante una inclusión progresiva del material para identificar los puntos críticos del envase y determinar el diseño adecuado de molde. De este modo, la misma estructura del envase controla la deformación, con el uso de refuerzos o eliminando puntos críticos, como curvaturas pronunciadas o zonas de bajo espesor. Adicional a esto, el uso de aditivos es ampliamente aceptado, por su capacidad para mejorar propiedades mecánicas en los envases.

3.4.4. Consumo

El cliente intermedio o final puede alterar o verse alterado por la cadena, por la forma en que su proveedor comunique la información o por el manejo que le pueda dar al envase como consumidor final.

3.4.4.1. Comunicación

Las compañías pueden elegir distintas estrategias para entregar la información a sus consumidores intermedios o finales: el uso de campañas publicitarias es el más conocido por el cliente final, pero **la práctica del “greenwashing” puede confundir o engañar a su público.**

Greenwashing

Dentro de las mayores problemáticas al divulgar procesos de **responsabilidad social corporativa** enfocados en el impacto ambiental se encuentran diferentes mensajes que por su tergiversación o juego de palabras podrían tender a engañar o presentarse de manera errónea para influir en la decisión de compra o consumo del consumidor. Sin embargo, estos mensajes al no contar con un soporte pueden considerarse como **“Greenwashing”** o **“Lavado verde”**, término acuñado en 1986 por Jay Westerveld para describir el tinte ecologista que algunos hoteles daban a sus campañas [45]. Las prácticas más comunes son:

- **Mercadeo “verde”:** En las campañas de los medios de comunicación se suelen utilizar colores verdes y entornos o imágenes relacionados a espacio naturales que dan a entender que la empresa conserva buenas prácticas medioambientales.
- **Marcas o sellos no certificados:** Uso de sellos o leyendas que dan la impresión de certificación externa de alguna práctica ambiental.
- **Resultados no verificados:** Referencia de resultados de pruebas que no se hicieron o que no se comprobaron para un

producto específico. Un ejemplo de esto es el uso de una materia prima que el proveedor asegura es biodegradable y decir lo mismo de su producto final, aunque contengan más elementos que afectan sus procesos de degradación.

- **Mostrar estudios incompletos o con cifras parciales:** La empresa realiza estudios internos y entrega resultados aparentemente favorables que fueron presentados para su beneficio. También, acoge un estudio de un externo y extralimita las conclusiones para que den a entender variables ambientales positivas para la compañía.

Ilustración 11. Algunos sellos usados para promover campañas como práctica de greenwashing.



Fuente: Elaboración propia

Una forma de evitar el greenwashing es el uso de metodologías organizacionales formales que entreguen información en **esquemas organizados y parametrizados**, para evitar suministrarla sin contexto. Algunos ejemplos son los **informes de avance, los mecanismos gremiales o las certificaciones de tercera parte**.

Informes de avance

El uso de herramientas específicas para mostrar la gestión sobre las variables de interés ambiental a los grupos de interés es variado y puede apegarse a estándares externos o estructuras enfocadas al objetivo de la entrega. Algunas de las herramientas son:



Informes de sostenibilidad: Un consolidado de los reportes internos que relaciona la gestión de la compañía con las variables del triple impacto (social, ambiental y económico).



Boletines ambientales: Con el uso de revistas, periódicos, redes sociales y otros se entregan algunas variables de interés a grupos de interés focalizados; como proveedores, clientes, recicladores, cliente final, empresas interesadas y otros.



Blogs o páginas web: Espacios en línea dedicados a entregar los resultados de los estudios medioambientales y los avances relacionados en el sector.

Mecanismos gremiales

Las compañías pueden pertenecer a gremios con intereses y objetivos enfocados en el uso de material reciclado que cuentan con medios de comunicación específicos para entregar información sectorial y no por compañía. Usualmente, circulan boletines en sus medios de comunicación o programan seminarios web de divulgación; además cuentan con mayor focalización en el grupo de interés.



Certificaciones de tercera parte

La alternativa más eficiente y controlada para entregar los estudios que hace la compañía son las certificaciones por tercera parte, que pueden estar relacionadas a variables ambientales generales o específicas.

En Colombia, algunas compañías asumen compromisos de mejora continua desde sus objetivos socioambientales

Este tipo de compromisos se pueden gestionar con algunas certificaciones específicas como



Para la certificación de variables ambientales específicas se encuentran casos como: (1) **certificado de circularidad**: donde se demuestra el adecuado cierre de ciclo de la compañía; (2) **contenido mínimo de reciclado**: donde se evalúa toda la trazabilidad, uso y variables técnicas de uso de materiales posconsumo y se asegura un porcentaje específico de material reciclado en los envases; y (3) **ecodiseño**: por medio de elementos específicos evaluados se encuentra que los envases cumplen con las características técnicas más idóneas para el cierre de ciclo. Algunas organizaciones que entregan estas certificaciones nacional e internacionalmente son el **ICIPC, Recyclass, Association of Plastic Recyclers (APR)** y **muchos más**.

En Colombia, de acuerdo con el artículo 31 del Decreto 3466 de 1982, **la responsabilidad de lo que se comunica aplica para quienes ofrecen el producto o servicio**; particularmente, la propaganda comercial como marcas y leyendas exhibidas son responsabilidad del productor y controlada por la Superintendencia de Industria y Comercio.

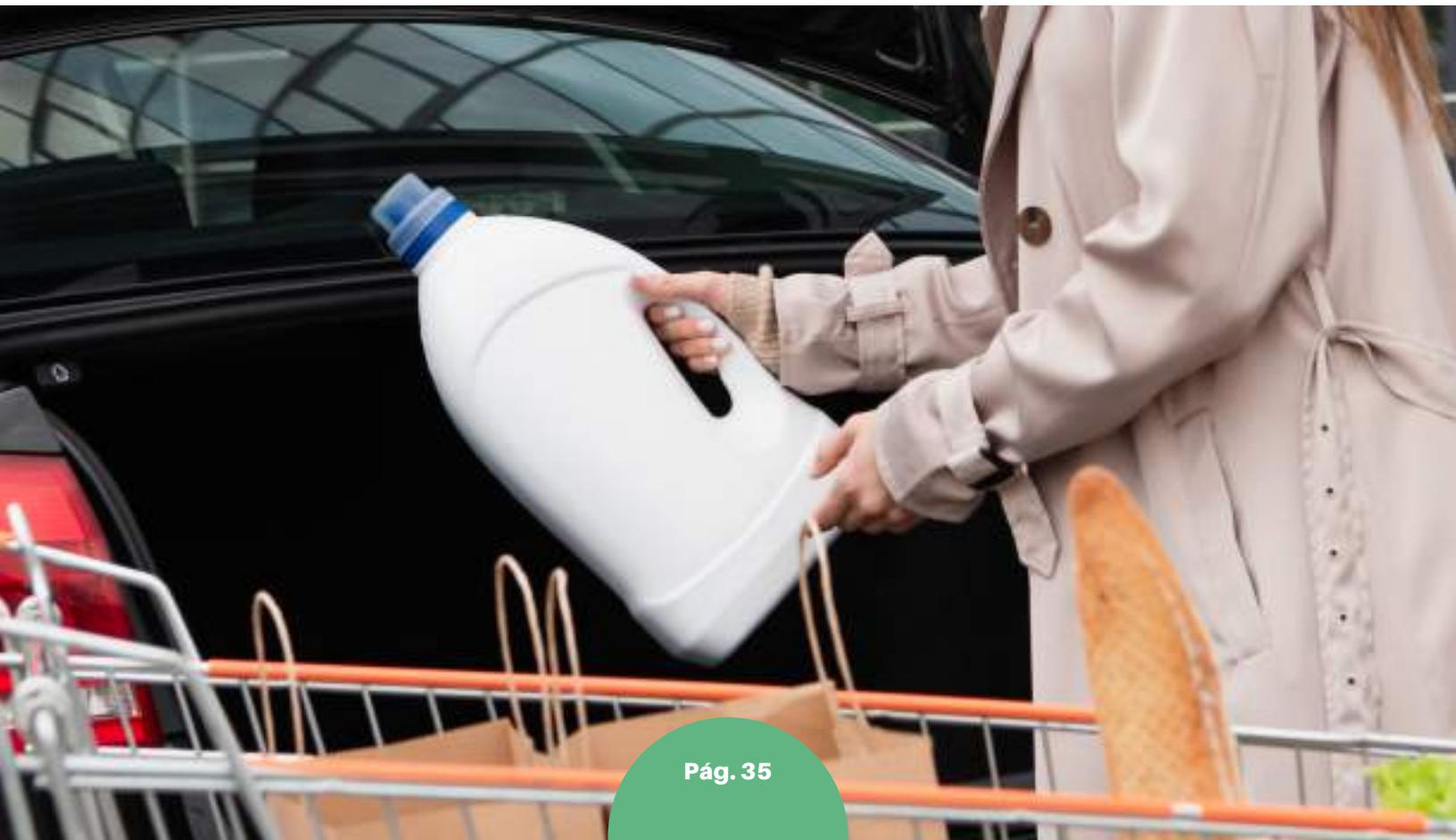
3.4.4.2. Consumo final

Dependiendo el uso final del envase, **puede sufrir reacciones que degraden y deterioren la capacidad de utilizarlo como materia prima en la misma cadena**. Estos envases se utilizan en su mayoría

para almacenar químicos del hogar, que pueden ser corrosivos y reaccionar directamente con el PEAD; con ello, el contacto continuo en períodos prolongados va a degradar el material y afectar sus propiedades mecánicas, térmicas y químicas.

La exposición a radiación de diferentes energías aumenta la descomposición de las moléculas y acelera reacciones de degradación. Por ejemplo, si el envase llega a un botadero de cielo abierto o a un cuerpo de agua, la radiación ultravioleta y la visible junto con el aire o agua van a oxidar el material, generando carbonilos que aumentan el amarillamiento, los olores y la fluidez del material a largo plazo.

El tiempo de vida útil del envase luego de su fabricación debe ocurrir en el menor tiempo posible. Lapso que va desde el abastecimiento en los mercados, con la motivación para la correcta separación en la fuente del cliente final, teniendo en cuenta el triángulo de Möbius y la identificación para su disposición. Luego, por parte del consumidor es necesario utilizar el envase para el uso previsto y disponerlo de la manera correcta, evitando que se filtre fuera de la cadena de reciclaje [46].





4.

Retos en la inclusión de PEAD posconsumo

En la implementación de la metodología de inclusión para PEAD posconsumo en envases rígidos se van a generar algunos cambios debido a la variación en los procesos que se presentan. A continuación, se develan algunas de las situaciones más frecuentes, haciendo énfasis en los procesos de calidad y producción.

4.1. Defectos del envase

En este apartado se describen las variables más mencionadas en los procesos ya implementados con PEAD posconsumo, relacionadas a las características atributivas, dimensionales y funcionales del envase.

ENVASE

El color del material no concuerda con el esperado



Departamentos impactados



Compras



Mercadeo



Logística



Calidad



Causas comunes

- El proveedor de la materia prima posconsumo no puede garantizar estabilidad en el color.
- Fallas en el control de calidad del proveedor, se presenta mezclas de envases del color requerido con otros durante su transformación en hojuela.
- Degradación de los pellets por la exposición prolongada a oxígeno y radiación (escisión de cadena).



Alternativas

- Generar acuerdos de calidad con el proveedor y el cliente donde se concientice acerca de la inestabilidad del color por el uso de posconsumo y se determinen unos márgenes de normales de color.
- Desarrollar el color junto con el proveedor de pigmentos en donde se tenga en cuenta la variación máxima definida desde el proveedor del pellet.
- Solicitar en la ficha técnica y los certificados de calidad el control de las dimensiones de color de cada lote.
- Evaluación continua de proveedores en búsqueda de determinar la compañía que presente menor variación y mejor efectividad en los productos.
- Usar aditivos antioxidantes que reduzcan la degradación por oxidación y así se recuperen el color y propiedades mecánicas de fluidez.
- Caracterización de focos de degradación en las zonas de almacenamiento, acceso directo del material a la luz solar, tiempos prolongados de almacenamiento o humedad excesiva.
- Utilizar sistemas de coextrusión con capa externa de material virgen coloreado según los límites determinados.
- Aditivar nuevamente con color para mejorar el tono.



Referencias

[47] [48] [49] [2]

ENVASE

No soporta pruebas de carga vertical u horizontal



Departamentos impactados



Planeación



Producción



Diseño



Recepción materias primas



Mantenimiento



Causas comunes

- Uso de PEAD posconsumo en envases con zonas de bajo espesor en puntos críticos.
- Falla en la parametrización o calibración del equipo de ensayos.
- Parisón no uniforme por material rígido en el cabezal de extrusión.
- Material con propiedades mecánicas deficientes, módulo de elasticidad bajo, rigidez alta.



Alternativas

- Identificar zonas de bajo espesor y reforzarlas aumentando el material con controles de salida de fundido de la boquilla (control de espesor de parisón).
- Cambiar el diseño inicial del molde a uno con menores puntos críticos, teniendo en cuenta que las curvaturas pronunciadas van a ser más susceptibles a distribuir de manera no uniforme la carga mecánica.
- Plan de calibración y/o mantenimiento de equipo de medición, con especial énfasis en el control de la curva de aumento de energía.
- Definir el molde con los puntos más críticos para realizar pruebas del material en la recepción, a partir de la toma de una muestra significativa y con ella establecer si es viable o no su uso según las variables críticas de calidad y el plan de inspección que se maneje.
- Limpiar el material degradado endurecido del cabezal de extrusión, que puede generar cizallamientos al paso del fundido y zonas de baja resistencia mecánica.
- Identificar piezas que atraviesen el material fundido antes de la extrusión y que se mantengan en zonas críticas (líneas de molde, punto de tensión del material, curvaturas pronunciadas) como los cabezales tipo araña, y realizar un análisis para determinar la disposición o diseño correcto para evitar la degradación.



Referencias

[50] [51] [52] [53] [54] [55]

ENVASE

El envase falla en pruebas de impacto



Departamentos impactados



Producción



Mantenimiento



Dispensación



Planeación



Causas comunes

- Variación excesiva en el peso del envase y el espesor en las zonas de impacto.
- Aumento de rigidez del material por mayores temperaturas de cristalización y nucleación.
- Degradación excesiva de material en el tornillo por tiempos de residencia prolongados a temperaturas elevadas.
- Material con propiedades mecánicas deficientes, módulo de elasticidad bajo y rigidez alta.



Alternativas

- Disminuir el porcentaje de materiales en la tolva con baja densidad aparente (hojuela con exceso de finos) que genera que el tornillo no acumule de manera uniforme material y varíe en la formación del parisón.
- Implementar sistemas de detección de largo del parisón, que garanticen el corte en la misma posición y se mantengan parejos los espesores.
- Usar equipos o aditivos antiestáticos para evitar movimientos horizontales inesperados del parisón que afecten la distribución del material al cerrar el molde.
- Determinar una temperatura de entrada del material y tenerla en cuenta para evitar que el tiempo de residencia sea mayor a 10 minutos en zonas superiores a 190°C y así evitar degradación térmico - oxidativa.
- Uso de modificadores de impacto que aumentan la elasticidad del material y evitan que la propagación de energía en el impacto sea crítica para el envase.
- Determinar posibles mezclas del PEAD posconsumo con PP y evaluar la posibilidad de disminuir su porcentaje a niveles menores de 5% o de ser necesario utilizar aditivos que mejoren las propiedades mecánicas de la mezcla.



Referencias

[31] [2] [47] [9] [56] [57] [58] [59] [60] [61] [62] [63] [64]

ENVASE

Fallas en la hermeticidad por perforaciones



Departamentos impactados



Proveedor



Dispensación



Calidad materia prima



Producción



Mantenimiento



Diseño



Causas comunes

- Hay zonas con espesores bajos donde se depositan impurezas que en el enfriamiento van a perforar el envase y permitir el flujo.
- Las impurezas son mayores a 200 micrómetros debido a que la malla utilizada para filtrar no fue la correcta, sufrió rotura durante su uso o el material se contaminó luego del peletizado.
- Degradación excesiva de material en el tornillo por tiempos de residencia prolongados a temperaturas elevadas.



Alternativas

- Identificar las zonas de los envases que contienen menor cantidad de material y optimizarlos con espesores superiores, para que en la cristalización del PEAD se "envuelvan" estas contaminaciones y no se generen orificios.
- Realizar pruebas en máquina al ingresar cada lote de PEAD posconsumo, donde se determine el porcentaje de envases que presenta perforaciones y conformar planes de mejora con proveedores.
- Acordar, desde el desarrollo, el máximo tamaño de partículas indeseadas, determinando también el tamaño de malla de trabajo y controles a esta.
- Determinar una temperatura de entrada del material y tenerla en cuenta para evitar la degradación térmico - oxidativa.
- Identificar zonas del proceso de alta degradación del material por tiempos de residencia y temperaturas elevadas y generar controles de ingeniería para evitarlos.
- Colocar mallas en la salida del tornillo en el flujo del material para garantizar que las impurezas que vengan en el material no superen los tamaños críticos. Introducir sensores de presión en caso de que las mallas de filtrado se rompan.
- Sistemas de atrapamiento de metales ferrosos y no ferrosos.
- Sistemas de inspección que verifiquen la hermeticidad de cada envase.



Referencias

[31] [2] [47] [9] [56] [57] [58] [59] [60] [61] [62] [63] [64]

ENVASE

Líneas de colores no características o superficie distorsionada



Departamentos impactados



Mantenimiento



Calidad



Producción



Proveedor pigmento



Diseño máquina



Causas comunes

- Contaminaciones rígidas en el recorrido del fundido que lo deforman y generan menores espesores, y con ello, colores más claros.
- Los cilindros de paso del material tienen líneas que moldean el fundido porque las piezas rígidas la han deformado.
- Inestabilidad del pigmento que genera líneas con orientaciones aleatorias debido a baja integración de ambos.
- Degradación excesiva de material: El material degradado varía sus colores y al mezclarse con material sin degradar, genera estas líneas no características.
- PEAD posconsumo transformado a partir de polietileno de diferentes métodos de polimerización que afectan la formación del parisón.



Alternativas

- Identificar zonas de alta degradación del material por tiempos de residencia y temperaturas elevadas y generar controles de ingeniería para evitarlos.
- Mantenimiento preventivo y correctivo al rectificar las piezas por donde fluye el material fundido.
- Implementar sistemas de atrapamiento de metales ferrosos y no ferrosos que se pueden encontrar en el material, como imanes de alta intensidad.
- Usar aditivos para mejorar la integración de los materiales que conformen los pigmentos.
- Implementar sistemas de inspección automática que verifiquen envase a envase los errores frecuentes en la apariencia y los rechacen en línea.
- Identificar, junto con el proveedor, si hay envases específicos con diferente comportamiento del extruido y extraerlos de la cadena.



Referencias

[44] [65] [56] [58] [29] [66] [67] [68] [69] [70] [71]

ENVASE

Amarillamiento crítico y olores a plástico "quemado"



Departamentos impactados



Mantenimiento



Producción



Compras



Proveedor PEAD



Proveedor pigmento



Aditivos



Causas comunes

- PEAD posconsumo con degradación oxidativa por varios reprocesos o exposición continua por un largo periodo a oxígeno, agua y radiación que generan acortamiento de cadena y oxidación.
- Falta de control en los procesos de transformación del material en la empresa proveedora, con temperaturas muy altas y falta de liberación de gases.
- Altas temperaturas de trabajo en la formación del envase o acumulaciones de oxígeno en el tornillo que promueven la degradación.
- Procesos de limpieza del material ineficiente de parte del transformador, usando cantidades incorrectas de detergente y NaOH. Exceso de degradación del material en la rotación por el mercado o en la transformación.



Alternativas

- Identificar proveedores con calidad de material no variable por sus volúmenes de compra de envases a transformar y su trabajo de fortalecimiento con las bodegas de reciclaje que van a mantener continuidad en sus entregas.
- Usar aditivos que disminuyen la degradación por radiación u oxidación, evitando reacciones de material no esperadas.
- Desarrollo con el proveedor de pigmentos, entonadores o masterbatch específicos para eliminar los colores no deseados.
- Trabajo conjunto con el proveedor para identificar faltas de controles o variables en proceso que están afectando la degradación del material.
- Regular el perfil de temperatura en la máquina fabricante del envase. Además, para mejorar la eficiencia, existen lubricantes que reducen la fricción del fundido.
- Seguir las recomendaciones técnicas del proveedor del detergente y NaOH para evitar oxidación excesiva sin disminuir su potencial de limpieza.



Referencias

[38] [36] [42] [47] [48] [42]

4.2. Procesos de fabricación

El impacto relacionado al procesamiento del material es relevante en el uso de PEAD posconsumo; por lo cual, para desarrollarlo e integrarlo satisfactoriamente, se describen alternativas en condiciones de máquina y equipos auxiliares.

PROCESO PRODUCTIVO

Inestabilidad en la formación del envase por mal corte de la cuchilla



Departamentos impactados



Mantenimiento



Producción



Diseño de máquina



Compras



Proveedor PEAD



Causas comunes

- Material PEAD posconsumo con mayor rigidez que se pega a la cuchilla de corte en caliente y que deforma la boca de los nuevos envases a medida que avanza el proceso.
- Proveedor de PEAD posconsumo con variación crítica en índice de fluidez, que genera rigidez aleatoria del material.
- Cuchilla de corte en caliente no óptima para el proceso y con deformaciones que pueden aportar estructuras donde el material resida y afecte los siguientes envases.
- Rigidez excesiva en el material que promueve la incorrecta homogeneización del fundido y variación en la elasticidad del parisón.



Alternativas

- Limpiar la cuchilla caliente cada 2 horas de producción continua para evitar acumulaciones innecesarias de material degradado y rígido.
- Junto con el proveedor Identificar posibles contaminantes del material con otros de menor fluidez, como el polietileno de ultra alto peso molecular.
- Mantenimiento correctivo y preventivo a cuchillas de corte en caliente, rectificando zonas con deformaciones críticas.
- Mejorar la fluidez del fundido en su recorrido por el tornillo con aditivos o variación de propiedades de proceso, como: la velocidad del tornillo, la temperatura de fundido y la del material al ingresar a la tolva.



Referencias [59] [2]

PROCESO PRODUCTIVO

Aumento de rigidez que genera rampas de temperatura de trabajo mayores



Departamentos impactados



Mantenimiento



Producción



Diseño de máquina



Compras



Proveedor PEAD



Causas comunes

- PEAD posconsumo con variación de rigidez entre proveedores debido a que los envases a transformar recibidos varían según la zona donde se recolecten y falta fortalecimiento con las asociaciones.
- PEAD posconsumo con baja degradación oxidativa y que genera un entrecruzamiento entre cadenas aumentando la fluidez, debido a ningún tipo de contacto prolongado con oxígeno, agua o radiación.



Alternativas

- Identificar proveedores que validen y garanticen bajas tolerancias en la fluidez de los materiales por su compra constante a proveedores de material reciclado específicos.
- Usar aditivos que optimicen la fluidez, ya sea evitando el entrecruzamiento de cadenas o que otorgan propiedades mecánicas específicas al mezclarlos. También, existen aditivos lubricantes que disminuyen la fricción interna durante el proceso de calentamiento, lo cual optimiza velocidades de tornillo y, por tanto, gasto energético.
- Disminuir el porcentaje de materiales con baja densidad aparente (hojuelas con exceso de finos) que no van a mantener la uniformidad en el fundido.
- Implementar metodologías de manejo de energía en procesamiento de plástico, como el uso de aislantes térmicos para calor y frío.

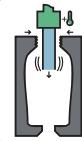


Referencias

[59] [60] [61] [72]

PROCESO PRODUCTIVO

Parisón/ manga varía la velocidad de extrusión aleatoriamente



Departamentos impactados



Mantenimiento



Producción



Dispensación



Planeación



Diseño de máquina



Proveedor PEAD posconsumo



Proveedor pigmentos y aditivos



Causas comunes

- Variación excesiva en las propiedades elásticas del material al extruir.
- Aumento de rigidez del material por mayores temperaturas de cristalización y nucleación.
- Degrado excesivo de material en el tornillo por tiempos de residencia prolongados a temperaturas elevadas.
- Variación de condiciones de calentamiento del PEAD posconsumo debido a cambios de temperatura de entrada del material a la tolva durante producciones continuas.



Alternativas

- Disminuir el porcentaje de materiales en la tolva con baja densidad aparente (hojuela con exceso de finos) que el tornillo no acumula de manera uniforme y varía en la formación del parisón.
- Implementar sistemas de detección de largo del parisón, para que se realicen los cortes en la misma posición y se mantengan parejos los espesores.
- Usar equipos o aditivos antiestáticos para evitar movimientos inesperados del parisón que afecten la distribución del material al cerrar el molde.
- Definir la temperatura de entrada del material para evitar que el tiempo de residencia y temperaturas generen degradación térmico - oxidativa.
- Disminuir la velocidad del tornillo para no generar fluido de baja densidad por ingreso de aire al cilindro que provoquen zonas más delgadas en la extrusión y así mantener la elasticidad uniforme.



Referencias

[44] [65] [2]

4.3. Selección de materias primas

Con el uso de PEAD posconsumo se encuentran desafíos financieros, logísticos y administrativos que no se presentan en material virgen. Aquí, se describirán algunos de estos y cuáles son las alternativas para abarcarlos.

MATERIAS PRIMAS

Cantidad de proveedores de PEAD posconsumo insuficientes



Departamentos impactados



Compras



Calidad



Causas comunes

- El mercado del PEAD posconsumo en Colombia no tiene muchos actores que puedan presentar un material de calidad, ya que no se ha generado competitividad por el bajo consumo de este producto.
- Criterios de exigencia similares al PEAD virgen en atributos y olor. El PEAD posconsumo tiene propiedades similares, pero no iguales al material virgen.
- Falta de desarrollo y mejoramiento continuo entre transformador local con la empresa fabricante para entender las necesidades del cliente final y generar metodologías de trabajo.
- No controlar de manera dimensional las variables que más afectan el material.



Alternativas

- Iniciar desarrollo de proveedores en conjunto, donde se den apoyos técnicos y teóricos que aumenten la confiabilidad del material.
- Determinar exigencias de materia prima posconsumo consistente con la capacidad propia de un material que ha pasado ya por el mercado.
- Exigir al proveedor un sistema de gestión de la calidad robusto que entregue certificados de calidad de acuerdo con los requerimientos mínimos del fabricante. Colocar principal énfasis en la creación de variables medibles como porcentaje de PP, cantidad y tamaño de contaminación (puntos negros), índice de fluidez, densidad aparente y otros.



Referencias [59] [2]

MATERIAS PRIMAS

Valor de resina PEAD posconsumo con alta volatilidad



Departamentos impactados



Compras



Sostenibilidad



Cliente



Proveedor



Causas comunes

- El proveedor de PEAD posconsumo genera costos mayores debido a las inversiones relacionadas a fortalecimientos sociales y ambientales que hacen parte de la necesidad para asegurar una cadena de reciclaje efectiva.
- El PEAD virgen está íntimamente ligado al mercado del petróleo y derivados; con el aumento de la legislación que disminuye la demanda de estos materiales vírgenes, se genera una oferta competitiva que llega a valores menores del usual.



Alternativas

- Generar algoritmos de manejo de precio con los proveedores de material, donde se determinen las variables de entrada, para que por mutuo acuerdo se indique la variación del precio del material.
- Crear políticas de uso de PEAD posconsumo e integrar al comercializador, para generar conciencia respecto a que un producto más sostenible no necesariamente es más económico.



Referencias [73]



4.4. Mercadeo

El mayor desafío de la inclusión de PEAD posconsumo se encuentra en integrar al comercializador y al cliente final respecto a las variaciones que van a presentar estos productos. Para ello, el trabajo más grande tiene que estar dirigido a generar conciencia social y sostenible sobre el uso de estos materiales.

MERCADEO

El cliente no acepta variaciones de color



Departamentos impactados



Compras



Ventas



Calidad



Proveedor PEAD posconsumo



Diseño de máquina



Causas comunes

- Ausencia de conocimiento del cliente en variaciones de proceso usuales por uso de materiales posconsumo y falta de responsabilidad de su parte para aumentar la circularidad de los materiales e impacto social y ambiental.
- No acordar con el cliente máximos y mínimos del color coherentes con la variación que otorga su proveedor al material y su propio proceso.
- Utilizar pigmentación en concentraciones menores a las recomendadas por el proveedor, que genera una baja mezcla de material fluido en el tornillo, y variación entre envases.



Alternativas

- Conectar al cliente con empresas especializadas en sostenibilidad, legislación relacionada, beneficios y plásticos posconsumo que expliquen cuales son las variables que afectan a la cadena y al material.
- Realizar acuerdos de calidad teniendo en cuenta las capacidades propias de color del material posconsumo, usando equipos de medición dimensional y condiciones específicas que garanticen que no haya desacuerdos futuros.
- Utilizar tecnología multicapa con capa externa en material virgen que garantice siempre uniformidad en el color externo.
- Realizar desarrollo y uso de los pigmentos en los porcentajes recomendados por el proveedor, evitando variación por malas mezclas en la tolva.
- Desarrollar campañas de inclusión de PEAD posconsumo con publicidad explicativa al respecto de los beneficios ecológicos, económicos y sociales.
- Implementar sistemas de inspección automática que verifiquen, envase a envase, los errores frecuentes en la apariencia y los rechace en línea.



Referencias

[2] [29] [66] [67] [68] [69] [70]

MERCADEO

El cliente no acepta olores extraños en los envases



Departamentos impactados



Mercadeo



Compras



Calidad



Proveedor PEAD



Diseño de máquina



Causas comunes

- Falta de conocimiento del cliente en variables químicas que afectan el PEAD posconsumo y sus repercusiones en el olor. Falta de responsabilidad de parte del cliente en la circularidad de los materiales e impacto social y ambiental.
- No realizar buenos procesos de limpieza del material de entrada de parte del transformador, usando cantidades deficientes o excesivas de detergente y NaOH.
- Exceso de degradación del material en la rotación por el mercado o en los procesos de transformación posteriores.
- No acordar con el cliente un análisis cuantitativo de compuestos químicos que generan olores fuertes.



Alternativas

- Conectar al cliente con empresas especializadas en sostenibilidad, legislación relacionada, beneficios y plásticos posconsumo que expliquen cuales son las variables que afectan a la cadena y al material.
- Realizar acuerdos de calidad teniendo en cuenta que, en su mayoría, el propio olor del producto envasado va a predominar por encima del envase.
- Utilizar tecnología multicapa con capa interna en material virgen que garantice que el producto no va a tener contacto con el material posconsumo.
- Definir con el proveedor del material los máximos y variaciones aceptables de olor. Se puede determinar el compuesto que genera el mal olor y acordar dimensionalmente su cuantificación con el proveedor.
- Desarrollar campañas de inclusión de PEAD posconsumo con publicidad explicativa al respecto de los beneficios ecológicos, económicos y sociales.



Referencias

[42] [2] [38]



5.

Metodología de inclusión de PEAD posconsumo

Para realizar una correcta inclusión de PEAD posconsumo en nuevos envases rígidos es necesaria una estructura de proyecto que tenga en cuenta las variables que afectan a estos productos y los antecedentes y propiedades del material a usar. **Esta metodología inicia su aplicación con la decisión de las compañías de implementar nuevos procesos en sus envases con objetivos específicos de uso de materiales posconsumo**, involucrando a proveedores, clientes y demás actores de la cadena.

5.1. Introducción a la metodología

5.1.1. Etapas metodológicas

Cada etapa comprende las competencias necesarias para el avance del proyecto, que inicia con la **construcción de bases** estratégicas y su ejecución, basados en conocimientos técnicos internos y ensayos que lleven a la fabricación del envase con el PEAD posconsumo. Esto debe hacerse con la verificación de las variables de control priorizadas de acuerdo con un diagnóstico inicial.

Luego, se debe evaluar el cumplimiento del objetivo inicial o asignar nuevos retos organizacionales que contemplen su alcance y la **mejora continua**. Entre tanto, la divulgación de los estudios y avances realizados aumenta el valor de los productos y muestra el avance organizacional de la compañía en economía circular. Las etapas que conforman la metodología son:



1. Cimienta: Conformar desde la dirección estratégica las bases conceptuales del proyecto, las políticas que lo orientarán, los equipos encargados de su ejecución y la priorización del envase objeto de la evaluación.



2. Diseña: Desarrollar un plan de trabajo estructurado a partir del diagnóstico técnico del envase objetivo para la formulación de las características deseables.



3. Prueba: Parametrizar variables de inclusión críticas según los retos que presente cada proceso y ejecutar las actividades para cumplir con la implementación del plan de trabajo.

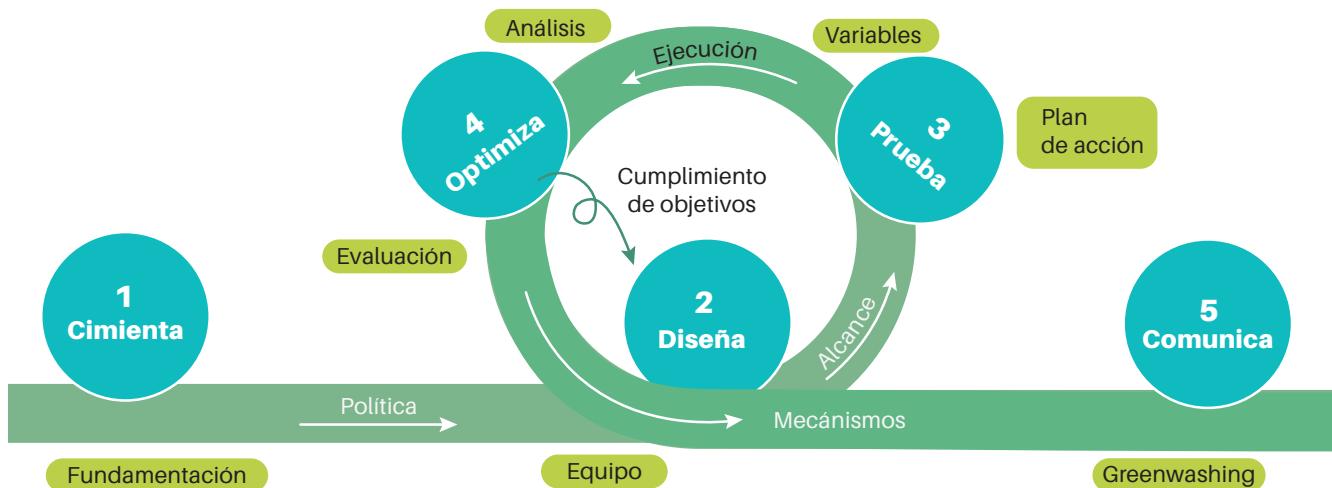


4. Optimiza: Validar el alcance de los objetivos por medio de los indicadores de gestión y las variables críticas de proceso para identificar posibles mejoras al proceso ejecutado.



5. Comunica: Difundir información por medios de alto impacto que incluyan certificados de inclusión de materiales reciclados, informes de sostenibilidad y otros, con la precaución de no caer en Greenwashing.

Ilustración 12. Etapas de la metodología de inclusión de PEAD posconsumo



Fuente: Elaboración propia

Dentro del proceso de inclusión descrito en el apartado 3.4 se identifican que **los principales actores que generan impacto** en la metodología son los **transformadores, fabricantes y productores** que, según su rol, pueden aplicar las etapas desde distintas perspectivas.

- **Transformador** (proveedor de PEAD posconsumo): Se integra en los procesos de diseño, optimización y comunicación constantemente al ser el ente con **mayores conocimientos técnicos del material** y ser la variable crítica de calidad respecto a propiedades y atributos del producto final.
- **Fabricante:** Con el rol más inmerso en el diseño del envase, el fabricante es partícipe de todas las fases de la metodología, apoyado por los productores en

las fases “Cimienta”, “Optimiza” y “Comunica”. En estas fases se crean las bases y necesidades según los impactos económicos, sociales y ambientales; junto con la retroalimentación a los agentes más cercanos al mercado y el apoyo en la correcta divulgación de los estudios y certificaciones obtenidas.

- **Productor:** Si bien puede tener doble rol como productor y fabricante, el enfoque del primero es **integrar las necesidades del consumidor** en la fabricación del envase, así como responder a necesidades legislativas y costos en el mercado, desde la perspectiva de las variables de calidad de un envase fabricado con PEAD posconsumo y las exigencias comerciales posteriores.

5.2. Cimienta

En el proceso de implementación de una metodología para incluir PEAD posconsumo en envases rígidos **son necesarios trabajos estratégicos robustos**, donde participen los directivos de la compañía y los actores externos que interactúan directamente en el proceso. En este camino se debe entender que los procesos misionales y de apoyo, junto con las relaciones con los clientes y proveedores van a cambiar; por lo cual es ideal instaurar políticas relacionadas a la inclusión de PEAD posconsumo con metas específicas, en búsqueda de generar la conciencia colectiva con una justificación determinada.

5.2.1. Crear la política de uso de PEAD posconsumo

Las características de la política se relacionan con el propio alcance de la organización, y esta debe estructurarse con objetivos, metas, responsabilidades y revisiones.

Es necesario definir los objetivos de acuerdo con el alcance de la política establecida por la dirección estratégica de la compañía, a partir de las necesidades organizacionales, la legislación aplicable, solicitudes de clientes o ideología organizacional. Asimismo, tener presente para su formulación los principios de sosteni-

bilidad y responsabilidad al fomentar el uso responsable y eficiente de PEAD posconsumo en la fabricación de envases.

A partir de los objetivos, se fijan unas metas que describan los resultados específicos que se buscan lograr; estas deben ser cuantificables y medibles, con el detalle del porcentaje de material virgen que se proyecta reemplazar por material posconsumo en todos los envases o en uno específico. También, definir metas de apoyo para aumentar el uso de PEAD posconsumo.

Las **responsabilidades** se asignan a los actores claves y explican que se espera de ellos para cumplir con la política; para esto, es **necesario establecer un comité** con organigrama, que **controle las variables de impacto**, la relevancia organizacional y el alcance.

Dentro del alcance de la política se debe definir cómo se evaluará y ajustará; esto implica **revisiones** de los resultados parciales de la ejecución, de las nuevas variables que se encuentren en la implementación y de los agentes externos que la impactan (legislación, clientes, presupuesto, proveedores, entre otros).

5.2.2. Conformar el equipo y definir sus responsabilidades

La formulación de la política impacta varios departamentos de la compañía y puede generar conmoción en su implementación sin un equipo humano que controle el paso a paso del proyecto. **La creación de un comité para implementar la política es crucial para asegurar su efectividad y seguimiento.**

Para ello, se deberá conformar un grupo diverso de personas con conocimientos de distintas áreas. Se pueden incluir **5 o 6 personas de distintos departa-**

mentos (producción, compras, calidad, sostenibilidad, mercadeo) y **partes interesadas externas** (proveedores, clientes, organizaciones ambientales, asesores técnicos). Debido a la necesidad de la toma de decisiones de impacto organizacional, se deben incluir miembros de la dirección estratégica con capacidad de toma de decisiones.

Al crear el comité, se debe determinar su estructura, los roles y las responsabilidades; también establecer la frecuencia de las reuniones y determinar cómo se tomarán las decisiones y cómo se comunicarán. El uso de matrices de asignación de responsabilidades es recomendable.

5.3. Diseña

En esta segunda etapa se define la visión del envase con PEAD posconsumo y las actividades para su producción e integración en la metodología existente de trabajo, con las variables a controlar según los objetivos específicos definidos.

5.3.1. Diagnóstico

Como línea base se deben evaluar los escenarios no negociables del envase, con énfasis en cumplir con sus **funciones** básicas como son: la protección del producto ante agentes externos, diseño útil y comunicación a distintos actores.

También, se deben caracterizar los **requisitos** que debe cumplir el envase para participar eficientemente en los procesos productivos, la logística relacionada, el uso y el cumplimiento legislativo.

Para esto se debe contar con información de varias fuentes de **investigación aplicada** basada en el contexto técnico y tecnológico de la producción y uso de estos envases (publicaciones científicas, consultorías a expertos, socialización con fabricantes de envases). También se puede tener en cuenta una **evaluación recursiva** de los envases de la empresa, de la competencia y de otros sectores industriales con envases y/o productos similares. Para este apartado **se recomienda utilizar la información del presente documento** como referente técnico.



5.3.2. Evaluar el nivel de preparación de la compañía

A partir del rol de cada actor, se debe considerar una línea base de trabajo, que establezca cuales variables importantes para la inclusión ya se controlan y así **determinar el nivel de preparación de la compañía para la inclusión**. Para plantear el diagnóstico se puede usar la lista de chequeo descrita en la Tabla 2.

Tabla 2. Lista de chequeo de diagnóstico para inclusión de PEAD posconsumo de distintos actores

Proceso	Actividad	Si/No/En proceso (EP)
Transformador		
Compras	Se cuenta con flujo constante de botellas PEAD posconsumo de colores específicos con características controlables de contaminación.	✓ - X - EP
Compras	Cuenta con programas de fortalecimiento de la cadena de valor.	✓ - X - EP
Logística	Almacenamiento de botellas PEAD posconsumo en condiciones controladas de humedad y radiación solar.	✓ - X - EP
Calidad	Sistemas de gestión que logran mantener propiedades físicas, mecánicas, reológicas y ópticas dentro de rangos aceptables.	✓ - X - EP
Calidad	Certificación validada de las propiedades del material por lote para el cliente final.	✓ - X - EP
Producción	Control de contaminantes en el flujo del material a menos de 200 micrómetros en el producto final.	✓ - X - EP
Producción	Sistemas de dosificación de colorantes o aditivos para mejorar la homogeneización de color y mejorar propiedades del material.	✓ - X - EP
Comercial	Se cuenta con espacios de capacitación a sus clientes.	✓ - X - EP
Fabricante		
Compras	Compara y selecciona al menos 3 proveedores de PEAD posconsumo con base a la garantía de calidad de su material (certificados de calidad) y capacidad de entrega (volumen).	✓ - X - EP
Recepción de materiales	Realiza pruebas de contenido de impurezas y contaminados a proveedores priorizados.	✓ - X - EP
Recepción de materiales	Realiza pruebas preliminares en máquina por lote en la recepción de la materia prima.	✓ - X - EP
Logística	Sistema de almacenamiento en condiciones controladas de humedad y radiación solar.	✓ - X - EP
Calidad	Procedimiento de control de trazabilidad de materiales posconsumo y porcentajes de mezcla por lote.	✓ - X - EP
Calidad	Verificación de variables funcionales del envase por un sistema de muestreo (impacto, carga vertical, hermeticidad, otros).	✓ - X - EP
Calidad	Vigilancia constante de las dimensiones del envase que afectan los requisitos pactados con el cliente (espesores, peso, encogimiento, otros).	✓ - X - EP
Calidad	Inspección periódica de los atributos del envase (color, líneas no características, formación homogénea, otros).	✓ - X - EP

Fabricante continuación		
Producción	Disponibilidad de tecnología para consumo de PEAD posconsumo (mallas, trampa de metales, sistemas de coextrusión).	✓ - X - EP
Producción	Sistemas de inspección automático de variables funcionales, atributivas y dimensionales (probadores de fuga, sistemas de visión).	✓ - X - EP
Producción	Plan de mantenimiento preventivo de maquinaria productiva en rangos de tiempo razonables.	✓ - X - EP
Producción	Cuenta con procedimientos internos para evaluar cambios en la materia prima.	✓ - X - EP
Producción	Documenta las variaciones críticas del proceso que se relacionan a la materia prima (temperaturas, presión, velocidades).	✓ - X - EP
Comercial	Genera espacios con sus clientes para evaluar la posibilidad de inclusión de PEAD posconsumo.	✓ - X - EP
Comercial	Se capacita en cumplimiento legislativo y beneficios de uso de materiales posconsumo (legislación, etiquetado, greenwashing, otros).	✓ - X - EP
Comercial	Capacita a sus clientes en cumplimiento legislativo y variables de impacto por uso de PEAD posconsumo.	✓ - X - EP
Productor/llenador		
Compras	Compara y selecciona mínimo 3 proveedores de envases priorizando el sistema de trazabilidad, las capacidades (volumen) y la calidad constante.	✓ - X - EP
Recepción de envases	Evalúa las características funcionales de los envases.	✓ - X - EP
Logística	Almacenamiento en condiciones controladas de humedad y radiación solar.	✓ - X - EP
Calidad	Control de trazabilidad de materiales posconsumo y porcentajes de mezcla por lote.	✓ - X - EP
Calidad	Identifica si la legislación relacionada a su producto no tiene restricciones por uso del PEAD posconsumo (restricciones para uso en medicamentos y alimentos).	✓ - X - EP
Calidad	Ha evaluado el alcance de las variables organolépticas (atributos) que van a afectar el sistema envase/producto por el uso de PEAD posconsumo.	✓ - X - EP
Producción	Cuenta con procedimientos internos para evaluar cambios en la materia prima.	✓ - X - EP
Comercial	Genera espacios con sus clientes para evaluar la posibilidad de inclusión de PEAD posconsumo.	✓ - X - EP
Comercial	Se capacita en cumplimiento legislativo y beneficios de uso de materiales posconsumo (legislación, etiquetado, greenwashing, otros).	✓ - X - EP
Comercial	Capacita a sus clientes en cumplimiento legislativo y variables de impacto por uso de PEAD posconsumo.	✓ - X - EP

El nivel de preparación para la inclusión con base a la Tabla 2 se calcula en porcentaje de acuerdo con la Ecuación 1:

$$\text{Preparación para la inclusión} = \frac{(\text{Total de actividades que se controlan})}{(\text{Total de actividades que aplican})} \times 100\%$$

Ecuación 1

Esta preparación se evalúa respecto a la Tabla 3 y de acuerdo con las características empresariales necesarias para el uso de PEAD posconsumo se conceptualiza la fluidez de los procesos de inclusión.

Tabla 3. Relación del % de preparación de las compañías con la fluidez de los procesos de inclusión de PEAD posconsumo

Control de actividades	Preparación para la inclusión
100%	Proceso de inclusión fluido y sin problemas de fondo.
75%	Inclusión uniforme, pero con falta de controles.
50%	Inclusión no controlada con variaciones críticas en el producto.
25%	Inclusión no controlada con fallas críticas en producto y proceso.
0%	Inclusión no controlada, diseño deficiente, producto y/o proceso no cumple necesidades.

5.3.3. Formulación de ideas

A partir de los resultados del diagnóstico y determinación del nivel de preparación (numerales 5.3.1 y 5.3.2) se formulan las ideas de métodos de inclusión; para lo cual se requiere un **ambiente positivo de creatividad** para los **miembros del comité** que propicie la generación de **lluvias de ideas**. Si no se identifican acciones que satisfagan al equipo se recomienda asesoría externa.

El esquema para la ejecución depende del objetivo de la prueba y debe estar alineado consecuentemente con las metas del numeral 5.2.1. Las aristas de trabajo para el desarrollo son: (1) funcionalidad del envase; (2) compatibilidad del proceso productivo; (3) validación de la materia prima y (4) uso y puesta en mercado.

El foco puede abarcar una o varias aristas al mismo tiempo, según el nivel de preparación en que se encuentre la compañía.

5.3.4. Delimitar variables de control

Para valorar las estrategias de los escenarios que intervienen en el envase es importante alinear las necesidades de la política con la factibilidad, mediante la revisión de las necesidades técnicas, el impacto económico, el cumplimiento normativo y la percepción externa de las modificaciones.

Luego de filtrar las ideas respecto a su factibilidad se deben considerar las variables de control en el proceso a aplicar y plantearlas a partir del alcance del objetivo definido.



Objetivo: Funcionalidad del envase



Objeto de estudio: Envases fabricados con PEAD posconsumo

Evaluación

Variable	Parámetro de evaluación	Nota
Hermeticidad	Cumple	Según NTC 5511
Torque	Cumple	Según NTC 5511
Espesores	Según perfil de la compañía	Mayores a 0,4 mm para evitar que la contaminación cause perforaciones
Estabilidad dimensional	No presenta alabeos	Enfoque funcional
Prueba de impacto	Cumple	Según NTC 5511
Carga vertical u horizontal	Según resistencia necesaria para su transporte y uso	Disminuye la resistencia respecto al material virgen (numeral 6.1.3)



Objetivo: Compatibilidad del proceso productivo



Objeto de estudio: Sopladora/Inyectora de PEAD posconsumo

Evaluación

Variable	Parámetro de evaluación	Nota
Temperatura de tornillo	Según perfil de línea con material virgen	Evitar tiempos de residencia elevados a más de 190°C (numeral 3.4.3.2)
Presión de aire	Según perfil de línea con material virgen	
Variación de flujo de corriente	Según perfil de línea con material virgen	Si la dureza del material aumenta puede variar el flujo de corriente
Estabilidad de la manga	No desplazamientos horizontales o verticales	Ocurre si el material causa mucha estática o la mezcla no es homogénea (numeral 4.2)



Objetivo: Validación de materia prima



Objeto de estudio: Peletizado u hojuela de PEAD posconsumo

Evaluación

Variable	Parámetro de evaluación	Nota
Contaminación	No mayor a 200 micrómetros	Numeral 3.4.3.1
Humedad	Menor a 1%	Numeral 3.4.3.1
Granulometría	Entre 3 y 10 mm	Numeral 3.4.2.1
Índice de flujo de fusión	0,25 a 0,55 g/10 min* Mayor a 5 g/10 min**	* Recomendable soplado ** Recomendable inyección
Composición	Polipropileno no mayor a 5%	Numeral 3.4.3.1



Objetivo: Uso y puesta en mercado



Objeto de estudio: Producto final con todos los elementos (envase, tapa, producto y otros)

Evaluación

Variable	Parámetro de evaluación	Nota
Diseño	Reducidas zonas con curvas pronunciadas o bajo espesor	Numeral 3.4.3.3
Espectroscopia de color	Diferencias de color menor a 10	Numeral 6.1.5
Volumen	De acuerdo con la necesidad del cliente final	Diámetros entre 5 y 30 cm aumentan su reciclabilidad
Migración de sustancias	Según necesidades legislativas	Numeral 3.1

5.4. Prueba

5.4.1. Desarrollar las ideas

Una vez concretadas y evaluadas las ideas, se implementan en los objetos de estudio. En el caso de los procesos de fabricación, la secuencia de ejecución se describe según la Ilustración 13. Con esto se construye el nuevo conocimiento relacionado al cambio de material y la curva de aprendizaje inicia.

Ilustración 13. Secuencia de ejecución de ideas para la fabricación de envases con PEAD posconsumo



5.4.2. Evaluar los resultados de la prueba

En esta etapa se **presentan retos técnicos que afectan los procesos**; el presente documento mapea y detalla algunos de estos ampliamente en el capítulo 4. Allí se **indican las posibles causas, las alternativas y referentes técnicos**: desde las variaciones técnicas que presentan los envases (color, resistencia mecánica, olor y más) hasta estrategias de trabajo con clientes que quieren iniciar con la inclusión.

El comité encargado evalúa los resultados a partir de las variables de control seleccionadas, el objetivo de la propuesta que se quiere alcanzar y la viabilidad para llevarlo a procesos de inclusión a gran escala. Las conclusiones de la prueba deben responder preguntas de acuerdo con el objetivo y la arista de trabajo seleccionado:

- ¿El envase cumple con todos los parámetros funcionales? Si/No
- ¿El proceso es compatible con el uso de PEAD posconsumo en las condiciones evaluadas? Si/No
- ¿Se puede usar el PEAD posconsumo de este proveedor en las condiciones en las que fue entregado? Si/No
- ¿El cliente final estará satisfecho con el envase? Si/No
- ¿El envase tiene una utilidad competitiva? Si/No

El informe de entrega al comité debe contar con supuestos y esperados de los beneficios, así como retos que se relacionan a las variables de control seleccionadas en el diseño.

5.5. Optimiza

Para llevar a cabo esta etapa es **necesario alinear el análisis de resultados** del numeral 5.4.2 **con las futuras decisiones**.

Para ello, las conclusiones extraídas de las pruebas pueden generar dos líneas de trabajo: (1) las variables de control cumplen con los parámetros establecidos y se puede generar una inclusión de PEAD posconsumo sin traumatismo o (2) se detectó una ineeficiencia durante la prueba o se hallaron nuevas variables que son consideradas de importancia.

Al concluir que es posible la inclusión, se continúa con la evaluación de los objetivos y metas desde la dirección estratégica. En el caso de detectar alguna irregularidad se debe continuar con un nuevo diagnóstico.

5.5.1. Cumplimiento de objetivos y metas

Desde la dirección estratégica se evalúan los objetivos y metas planteados en la política que el comité tiene el compromiso de implementar en sus procesos. A partir de esta comparación, se evalúa la estrategia inicial y se identifican las nuevas variables de interés a controlar,

también se continúa con la divulgación de la información a los actores externos.

5.5.2. Nuevo diagnóstico

Las metas planteadas se basan en el alcance organizacional, sin embargo, si no se vieron implementadas satisfactoriamente, **la mejora continua dentro de sus procesos propone nuevos retos en busca de la economía circular**. Estos pueden ser utilizados por la compañía para mostrar avances, y seguir el ritmo a la economía emergente en ascenso.

En el caso que no se alineen completamente, se debe **reiniciar la búsqueda de soluciones, cambiar las metas** teniendo como premisa el alcance organizacional o **evaluar el correcto diseño de las pruebas**.

Para ambos casos se recomienda volver al diseño de la propuesta (capítulo 5.2) e iniciar con el diagnóstico. Si el alcance del equipo creativo no logra encontrar alternativas eficientes para el proceso interno de la compañía, **se recomienda buscar consultoría con equipos o empresas que hayan implementado satisfactoriamente el uso de PEAD posconsumo en envases**.



5.6. Comunica

La divulgación de la información recolectada para socializar los avances en los mecanismos internos de inclusión de PEAD posconsumo deben tener enfoques específicos según el rol de la compañía:



Transformador: Propiedades de su PCR, sistema de trazabilidad, certificaciones de la resina, fortalecimiento de su cadena de abastecimiento, otros.



Fabricante: Variaciones específicas del producto, impacto social-ambiental-económico, justificación y beneficios. Perspectiva técnica.



Productor: Beneficios sociales-ambientales, procesos diferenciales, cumplimiento normativo. Perspectiva ambiental y social.

Con la información recolectada que se quiera divulgar, se puede determinar un plan de comunicaciones efectivo que defina la audiencia, el mensaje, los canales de comunicación y el plan de retroalimentación.

5.6.1. Seleccionar el público

Inicialmente es necesario definir un objetivo del plan de comunicaciones, determinar si se quiere informar a algún actor específico, destacar beneficios o ambos. La segmentación de la audiencia asegura que el mensaje esté adaptado según las necesidades del actor.

5.6.2. Definir el mensaje y los medios para informar

El mensaje debe ser claro y conciso y resaltar la alineación de los objetivos de la política con el resultado de las pruebas y los avances continuos de la compañía.

Esto se puede realizar definiendo una parrilla de contenidos y trabajando de la mano con especialistas en diseño que entreguen la información de forma llamativa. También es recomendable divulgar por medios de interés y opinión empresarial más especializados, como informes de avance, mecanismos gremiales o certificaciones de tercera parte (Numeral 3.4.4.1).

Adicionalmente, la información que se divulga debe ser auditada y contar con los soportes respectivos para evitar caer en el *greenwashing* (Numeral 3.4.4.1.) y sesgar incorrectamente a la audiencia.

5.6.3. Retroalimentación

La implementación de un cronograma de la parrilla organiza la entrega de información. Este debe incluir la retroalimentación continua y focalizada del público objetivo. La información resultante se evalúa con el uso de indicadores clave de rendimiento para determinar el éxito del plan o definir posibles ajustes, según sea necesario para mejorar la efectividad.

Además, es necesaria la implementación de un sistema de revisión continua para asegurar la relevancia y efectividad a medida que evolucionan las necesidades de la empresa y las audiencias.



6.

Casos prácticos

6.1. Caracterización de PEAD posconsumo nacional

Dentro del proyecto que dio lugar al presente documento, se desarrollaron ensayos de laboratorio específicos con 3 proveedores de PEAD posconsumo en Colombia (rPEAD 1, rPEAD 2 y rPEAD 3) y 1 proveedor de material virgen. Para dar un panorama dimensional de los materiales, se analizaron algunas propiedades físicas, reológicas, mecánicas, químicas y ópticas, cuyos resultados se presentan en el presente numeral.

Estas pruebas fueron desarrolladas por el Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caúcho (ICIPC).

6.1.1. Propiedades físicas

Algunas de las propiedades físicas que se evalúan en estos materiales son la **densidad aparente** y la **humedad** (ASTM D1895 y D7191), que afectan integralmente en el proceso productivo. La variación de den-

sidad aparente puede generar distintos flujos de entrada a los equipos de fabricación por diferencias de compactación en la tolva.

En las muestras evaluadas no se observan diferencias estadísticamente significativas respecto al material virgen, aunque este último presenta valores ligeramente superiores (560 a 580 kg/m³) respecto a las muestras de PEAD evaluadas (500 a 540 kg/m³).

El exceso de humedad puede dar lugar a la formación de defectos superficiales como: burbujas, rayas, manchas o rugosidad (piel de naranja). El rPEAD 2 y 3 se mantuvieron en valores menores a 250ppm junto con el material virgen, dentro de los límites normales de procesamiento. Sin embargo, el material rPEAD 3 reportó valores de hasta 350 ppm, esto impulsa la necesidad de controlar las condiciones ambientales del material.

Ensayo	Material virgen	rPEAD1	rPEAD2	rPEAD3
 Humedad (ppm)	215	328	190	187
 Densidad aparente (g/cm³)	0,57	0,54	0,52	0,53

6.1.2. Propiedades reológicas

El índice de fluidez (MFI por sus siglas en inglés "Melt Flow Index") es una medida de la viscosidad del fundido a tasas de cizallamiento bajas. **Se utiliza como parámetro de control de calidad en los termoplásticos y determina la consistencia del comportamiento lote a lote** (ASTM D1238 o ISO 1133). Adicionalmente, tiene una relación inversamente proporcional con el peso molecular promedio del material. Para procesos de extrusión se consideran adecuados valores menores a 2 g/10min (190°C/2,16kg). En las muestras de rPEAD se identifica una ligera tendencia a mantenerse en valores superiores al material virgen, confirmando que la degradación reológica es baja o nula.

1	2	3	4	
Ensayo	Material virgen	rPEAD1	rPEAD2	rPEAD3
 Índice de fluidez (g/10min)	0,39 I: \pm 0,02	0,38 I: \pm 0,03	0,40 I: \pm 0,02	0,43 I: \pm 0,02

6.1.3. Propiedades mecánicas

Los componentes plásticos se implementan en los procesos según su capacidad de soportar esfuerzos mecánicos, descritos por propiedades como: (1) **la resistencia**, que mide la capacidad de resistir esfuerzos externos, y se mide a través de parámetros como la resistencia a la cedencia o la resistencia última a la tensión; (2) **la rigidez**, que determina la resistencia a la deformación y se mide a través del módulo de elasticidad o módulo de flexión; (3) **la tenacidad**, que mide la capacidad de absorber energía de un material durante impactos. Pueden caracterizarse al realizar los ensayos de propiedades de tensión, flexión y pruebas de impacto Izod (ASTM D638, ASTM D256, ASTM D790, respectivamente).

Los ensayos de tensión muestran una similitud estadística entre las 3 muestras de rPEAD, pero sus valores son diferentes respecto al material virgen, lo que demuestra que son **menos rígidos y resistentes en tensión**. En cambio, las propiedades de flexión que se relacionan con la elasticidad o resistencia, que opone el material a ser doblado, en donde se revelan similitudes en todas las muestras.

En la resistencia al impacto Izod el rPEAD 1 presenta valores mayores que el material virgen; sin embargo, los rPEAD 2 y 3 son menores y pueden presentar menor resistencia.

Los resultados mecánicos indican la tendencia de los materiales de variar ligeramente sus propiedades, aumentando la elasticidad, disminuyendo su rigidez y con una tenacidad variable entre proveedores.

 Resistencia a la tensión (MPa)	21,9 I: \pm 0,2	25,9 I: \pm 0,3	24,4 I: \pm 0,3	25,0 I: \pm 0,5
 Módulo de elasticidad en tensión (MPa)	716 I: \pm 16	819 I: \pm 29	825 I: \pm 31	822 I: \pm 18
 Resistencia a la flexión (MPa)	22,6 I: \pm 0,6	21,9 I: \pm 0,4	21,9 I: \pm 0,6	23,4 I: \pm 0,6
 Módulo de elasticidad en flexión (Mpa)	681 I: \pm 30	694 I: \pm 12	663 I: \pm 30	731 I: \pm 25
 Resistencia al impacto izod (J/m)	395 I: \pm 9	561 I: \pm 8	663 I: \pm 30	225 I: \pm 7

6.1.4. Pruebas químicas

Una de las pruebas más utilizadas para **determinar la degradación** en poliolefinas es la cuantificación de grupos oxidados, que se dan por **el rompimiento de enlaces en los monómeros como consecuencia de degradación térmica**, mecánica o química. Para medirla, se realizan análisis de espectrometría infrarroja (FTIR) que determina los materiales y su composición (ASTM E1252). El valor del índice de carbonilo

revela la cantidad de estos grupos; este se compara considerando que, a mayor índice de carbonilo, mayor es la cantidad de oxígeno en la muestra y, por tanto, mayor es su degradación oxidativa.

Aunque el rPEAD 2 obtuvo valores de índice de carbonilo superiores al material virgen, no se considera que sea una degradación mayor. Por el contrario, los materiales rPEAD 1 y 3 señalan valores aún menores, **lo que demuestra la poca o nula degradación química de estos materiales.**

Ensayo	1	2	3	4
Índice de carbonilo	0,05	0,12	0,04	0,0
Material virgen	rPEAD1	rPEAD2	rPEAD3	

6.1.5. Pruebas ópticas

Existen equipos que miden los componentes de color de una pieza plástica; por medio de la caracterización del espectro se puede determinar la diferencia de color (ASTM D2244). Para este tipo de piezas se usa como referencia los siguientes estándares de percepción de color:

- ≤ 1: Imperceptible para el ojo humano,
- entre 1-2: Perceptible al fijarse detenidamente,
- entre 2-10: Perceptible a primera vista,
- entre 11-49: Colores son más similares a los opuestos,
- 100: Colores son exactamente lo opuesto.

Las muestras de rPEAD para las pruebas fueron adquiridas en color blanco, ya que es el color más demandado por los fabricantes y productores por su versatilidad para uso en diversos colores. Debido a esto, los ΔE respecto al material virgen varían en rangos de 3 a 9, los cuales son perceptibles a la vista y muy variados entre ellos. Los ΔE entre los materiales posconsumo varían en valores cercanos a 5. **El uso de distintos materiales durante la misma producción generará variaciones de color perceptibles a simple vista;** por lo tanto, para lograr estandarizar un color **no se recomienda el uso de rPEAD de diversos proveedores en un mismo lote.**



Tabla 4. Diferencias de color (ΔE) entre material virgen, rPEAD 1, rPEAD 2 y rPEAD 3.

	rPEAD3	rPEAD2	rPEAD1	Material virgen
Material virgen	3,1	5,8	9,2	0
rPEAD1	5,0	5,4	0	
rPEAD2	4,7	0		
rPEAD3	0			

6.1.6. Pruebas a envases con contenido de rPEAD

Dentro del proyecto también fueron evaluados envases del mismo diseño con contenidos de PEAD posconsumo en diferentes porcentajes (0%, 50% y 100%), en donde se determinó una de sus variables de funcionalidad. Dentro de las pruebas de desempeño a envases plásticos, **la resistencia al impacto por caída libre es un indicador directo en el diseño y funcionalidad.** Se usa para determinar si el envase puede soportar impactos vertical u horizontalmente a una altura definida, según la cantidad de producto en su interior (NTC 5511).

Tipo de prueba de impacto	Envase PEAD 100% virgen	Envase PEAD 50% virgen / 50% posconsumo	Envase PEAD 100% posconsumo
Horizontal	Cumple	Cumple	Cumple
Vertical	Cumple	Cumple	Cumple

En las muestras evaluadas no se evidenció incumplimiento en las pruebas de impacto, determinando que **es posible realizar la inclusión de PEAD posconsumo a altas dosificaciones sin afectar las propiedades funcionales del envase.**

6.1.7. Conclusiones

Las propiedades físicas y reológicas (humedad, densidad aparente, índice de fluidez) son las que más pueden afectar en los procesos de fabricación de envases con PEAD posconsumo. Sin embargo, los resultados de los materiales rPEAD develan similitudes al material virgen, por lo cual, **la maquinaria y procesos utilizados en materiales vírgenes funcionan para fabricar envases con estas características en porcentajes de hasta 100% PEAD posconsumo.**

Las propiedades mecánicas presentan variaciones en rigidez, elasticidad y tenacidad según el proveedor del material que se esté trabajando. No obstante, las pruebas que se realizan para el control de calidad de los envases demuestran que, con el cambio de estas propiedades, aún siguen siendo funcionales.

Las propiedades ópticas presentan variaciones significativas entre proveedores del material y respecto al material virgen. Por ello, **es necesario generar mesas de trabajo entre proveedores de material, proveedor de pigmento y fabricantes**, donde se determine una corriente específica de entrada que garantice la menor variación de color posible.

Desde el punto de vista químico, **la degradación oxidativa determinada por el índice de carbonilos es baja o nula**, pero pueden presentarse otros tipos de degradación relacionadas a la variación en el peso molecular o rompimiento y entrelazamiento de cadenas [74] [75].

6.2. Algunos ejemplos de validación

6.2.1. Estrés al craqueo para envases con alta exigencia a resistencia química

Hipótesis: El tiempo de estrés al craqueo medioambiental disminuye con el aumento de dosificación de PEAD posconsumo en la fabricación del envase.



<h2>Posibles causas</h2>	Reacciones de oxidación excesiva por contacto de moléculas de PEAD cortas generadas en los reprocessos al fabricar material posconsumo con productos oxidantes o corrosivos como el hipoclorito de sodio.		
	Estrés al craqueo medioambiental aumenta por variación en delaminado y permeabilidad del material [76].		
	Cizallamientos excesivos en la formación del parisón por zonas de alta tensión, que inducen zonas del envase con baja resistencia mecánica.		
<h2>Pruebas priorizadas</h2>	<p>1 Identificar la proporción máxima de PEAD posconsumo para que las propiedades relacionadas con el estrés al craqueo medioambiental se mantengan en valores funcionales aceptables para su uso en hipoclorito de sodio concentrado.</p>		
	<p>2 Uso de aditivos en la producción del envase con antioxidantes, que mantengan las tasas de oxidación bajas y no disminuya propiedades mecánicas. Identificar la relación entre el uso de PEAD posconsumo y la resistencia química en condiciones específicas.</p>		
<h2>Metodología</h2>	<p>1 Realizar ensayos de estrés al craqueo medioambiental por la norma ASTM D1693 para resinas de polietileno en el laboratorio del ICIPC y compararlo con valores de ficha técnica en material virgen.</p>		
	<p>2 Evaluar con metodologías organizacionales el estrés al craqueo medioambiental.</p>		
<p>1</p>	<h2>Resultados</h2>		
PEAD virgen	PEAD posconsumo	Fallan en 366 horas	Inicio fractura
100%	—	0%	No se presentó
50%	50%	20%	120 h
—	100%	40%	96 h
—	95%+5% antioxidante	30%	96 h

Inicial



Final



2

Resultados

PEAD virgen	PEAD posconsumo	Fallan en 366 horas	Inicio fractura
100%	—	0%	No se presentó
75%	25%	0%	No se presentó
50%	50%	50%	120 h
25%	75%	75%	72 h
—	100%	37,5%	72 h
—	95%+5% antioxidante	62,5%	96 h



Imágenes de fracturas en los envases por estrés químico-ambiental

Conclusiones

- Todas las muestras cumplen con los requerimientos que aseguran usualmente las empresas de material virgen en sus fichas técnicas (entre 20 y 60 horas).
 - Se evidencia una disminución de resistencia química en el tiempo con el aumento de uso de PEAD posconsumo.
 - El uso de antioxidantes retrasa el número de muestras que presentan fractura por estrés químico.
-
- La referencia fabricada con 25% PEAD posconsumo y 75% resina virgen, llenada con NaOCl es conforme de acuerdo con la metodología de evaluación.
 - Se identifica una relación entre la disminución de resistencia química del envase y el aumento de dosificación de PEAD posconsumo a la mezcla que lo compone.
 - El uso de antioxidantes podría retrasar el inicio de fracturas por estrés químico

6.2.2. Evaluación de la variación de color según PEAD posconsumo base (blanco o multicolor)

Hipótesis: Los nuevos clientes no aceptan variaciones de color en sus envases producidos con PEAD posconsumo, por que asumen que el polietileno debe llegar a los mismos tonos, sea virgen o posconsumo.

Posibles causas

Falta de conocimiento del cliente en variaciones de proceso usuales por uso de PEAD posconsumo.

No acordar con el cliente máximos y mínimos de color dependiendo la variación que otorga su proveedor de material y su propio proceso.

Utilizar pigmentación en concentraciones diferentes a las recomendadas por el proveedor.

Prueba priorizada

Comparar atributivamente las variaciones de uso de PCR de PEAD según su color de base (blanco, multicolor y virgen) en colores críticos para el proceso.

Metodología

Fabricar y comparar muestras de colores blanco, azul y rojo utilizando 5 resinas de base: (1) 100 % material virgen, (2) 50% PEAD posconsumo multicolor, (3) 50% PEAD posconsumo blanco, (4) 100% PEAD posconsumo multicolor y (5) 100% PEAD posconsumo blanco.

Resultados

PEAD base	Pigmento blanco	Pigmento azul	Pigmento rojo	Observaciones
100% posconsumo multicolor				Otorga colores oscuros, el brillo disminuye respecto al virgen y se logran colores grises y marrones interesantes.
50% posconsumo multicolor + 50% virgen				El brillo mejora, la tonalidad azul es muy similar al material virgen y el marrón formado por el rojo es más vivo.
100% virgen				El brillo es el más alto de todas las muestras y se ven colores planos y parejos.
50% posconsumo blanco + 50% virgen				El brillo se mantiene por la coloración de base blanca, se aviva el color en el azul y rojo.
100% posconsumo blanco				El blanco se mantiene similar en brillo y color, el azul se torna claro y el rojo tiende a rosa.
Conclusiones	El uso de PEAD posconsumo multicolor para el uso en colores oscuros es óptimo, mejorando en la gama de grises y azules. Los envases color blanco generan variaciones perceptibles, pero menores cuando se incluye hasta un 100% PEAD posconsumo blanco.			

6.2.3. Homogenización de color en fabricación de envases

Hipótesis: La falta de homogeneización de las materias primas usadas en la fabricación generan líneas no características en la superficie del envase de distintos tonos.

Posibles causas	Zonas de retención en el recorrido del fundido que generan degradación del material. Por la naturaleza química de los pigmentos no permite la correcta homogeneización o se degrada fácilmente a temperaturas de trabajo, cambiando su coloración. Degradación excesiva del material que cambia condiciones de fluidez dentro del fundido.			
Prueba priorizada	Identificar variaciones de color debido a la composición del PEAD posconsumo y el pigmento, cambiando los proveedores y caracterizando los defectos.			
Metodología	Fabricar 4 muestras de envases donde se utilicen 2 proveedores de PEAD posconsumo y 2 proveedores de pigmento y se crucen las mezclas, para identificar si existe alguna mezcla que sin el cambio de condiciones de proceso elimine las líneas.			
Resultados				
Muestra 1	PEAD posconsumo	Masterbach	Detección visual de línea coloreada	Referencia
Proveedor # 1	Proveedor # 3	100% - Se destaca a simple vista		

Muestra 2

**PEAD
posconsumo**

Masterbach

**Detección visual
de línea coloreada**

Referencia

Proveedor # 2

Proveedor # 3

75% - Contraste menor,
coloración más pareja



Muestra 3

**PEAD
posconsumo**

Masterbach

**Detección visual
de línea coloreada**

Referencia

Proveedor # 2

Proveedor # 4

10% - No se observa
a simple vista



Muestra 4

**PEAD
posconsumo**

Masterbach

**Detección visual
de línea coloreada**

Referencia

Proveedor # 1

Proveedor # 4

30% - Se identifica si se
observa detenidamente



Conclusiones

- Existe relación entre la composición del masterbach que se utiliza y las líneas no características, debido a que pueden degradarse y cambiar su color a altas temperaturas.
- La homogeneización entre el masterbach y el PEAD usado elimina variaciones menores de coloraciones rojizas en toda la superficie del envase.



7.

Recursos

7.1. Empresas

Para la redacción del presente documento se recibió apoyo en detalles técnicos de dos tipos de empresas productoras especializadas en fabricación de envases con PEAD posconsumo: empresas aliadas y empresas de referencia.

Las empresas aliadas cumplieron un rol de consolidación técnica al proponer cambios en la redacción de la guía justificados en sus conocimientos del proceso; también socializaron problemas comunes que han

identificado y la manera como los han abordado. Adicionalmente, se realizaron las pruebas descritas en el numeral 6.2, a partir de problemáticas internas que están resolviendo relacionados al uso de PEAD posconsumo.

Por otro lado, las empresas de referencia brindaron apoyo en la descripción inicial de la industria y una amplia perspectiva respecto al uso actual de este material y sus desafíos.

7.2. Bibliografía

- [1] E. R. Pereira, L. Del, P. Fajardo, C. De Lima, C. Linck, A. Luiz, A. Soares, R. Marlene y C. Santana, «Estudio de las alteraciones en el índice de fluidez en muestras de PEAD reciclado de residuos plásticos inyectados, sometidas a envejecimiento natural», 2016.
- [2] M. Thielen, Extrusion Blow Molding, Hanser Publications, 2021.
- [3] L. Parker, «U.S. generates more plastic trash than any other nation, report finds», National Geographic, 10 2020.
- [4] News Eupean Parliament, «How the EU wants to achieve a circular economy by 2050», 2023.
- [5] CVN, «Variación en importación y exportación del sector de plásticos», 2014. [En línea]. Disponible en: <https://cvn.com.co/variacion-en-importacion-y-exportacion-del-sector-de-plasticos/>.
- [6] Quimica.es, «Craqueo,» [En línea]. Disponible en: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Craqueo.html>. [Último acceso: 2024].
- [7] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Resolución 1407 de 2018», 2018.
- [8] H. Hinsken, S. Moss, J.-R. Pauquet y Zweifela, «Degradation of Polyolefins during Melt Processing The late», 1991.
- [9] A. Peacock, Handbook of Polyethylene, 2000.
- [10] E. contributors, «Higroscopicidad,» Enciclopedia, De la Enciclopedia Libre Universal en Español, 2004. [En línea]. Disponible en: <http://enciclopedia.us.es/index.php?title=Especial:Citar&page=Higroscopicidad&id=321195>. [Último acceso: 2024].
- [11] material-properties.org, «¿Qué es el módulo de elasticidad de Young? Definición», 2023. [En línea]. [Último acceso: 2024].
- [12] ISO copyright office, «ISO 15270. Plastics - Guidelines for the recovery and recycling of plastics waste», 2008.
- [13] material-properties.org, «¿Qué es la tenacidad? Definición,» 2023. [En línea]. Disponible en: <https://material-properties.org/es/que-es-la-tenacidad-definicion/>.
- [14] Parlamento Europeo, «Directiva (UE) 2019-904 - reducción de plástico», 2019.

- [15] O. d. p. U.S., «U.S. Actions to Address Plastic Pollution», 2022.
- [16] EPA, «National Strategy to Prevent Plastic Pollution: Part of a Series on Building a Circular Economy for All», 2023.
- [17] M. d. m. a.- Chile, «Ley 21368 - Regula la entrega de plásticos de un solo uso y las botellas plásticas, y modifica los cuerpos legales que indica», 2021.
- [18] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Resolución 1342 de 2020», 2020.
- [19] Congreso de la República de Colombia, «Ley 2232 de 2022», 2022.
- [20] Congreso de la República de Colombia, «Ley 2277 de 2022», 2022.
- [21] Comisión de la Comunidad Andina, «Decisión 833 - Armonización de Legislaciones en materia de Productos Cosméticos», 2018.
- [22] Comisión de la Comunidad Andina, «Decisión 706 - Armonización de legislaciones en materia de productos de higiene doméstica y productos absorbentes de higiene personal», 2008.
- [23] Ministerio de Salud y Protección Social, «Resolución 4143 de 2012», 2012.
- [24] Presidencia de la república, «Decreto 677», 1995.
- [25] Plasticruz, «Plasticruz», 29 Mayo 2018. [En línea]. Disponible en: <https://plasticruz.com/2018/05/29/polietileno-de-alta-densidad-que-es-y-para-que-sirve/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20el%20polietileno%20de%20alta%20densidad%20%28PEAD%29%3F,de%20refiner%C3%ADa%20o%20a%20partir%20de%20gas%20natural..> [Último acceso: 2024].
- [26] F. Hannay, Rigid Plastics Packaging - Materials, Processes and Applications, Nampak Group Research & Development, 2000.
- [27] T. científicos, «Textoscientíficos», 19 Enero 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.textoscientificos.com/polimeros/estado-físico-y-cristalinidad-de-los-polimeros>. [Último acceso: 2024].
- [28] L. V. Pico Viviescas, «Efectos de variables de proceso en extrusión», 2013.
- [29] qubbervision, «Pioneering vision system for HDPE bottle inspection», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://qubbervision.com/new-system-viewmax/>.
- [30] C. Fernando, «Evaluación de propiedades reológicas y mecánicas», 2009.
- [31] F. Mitterhofer, Processing Stability of Polyolefins, 1980.
- [32] F. Tüdös y M. Iring, Polyolefine oxidation: Rates and products, vol. 39, 1988, pp. 19-26.
- [33] T. Bremner y A. Rudin, «Melt Flow Index Values and Molecular Weight Distributions of Commercial Thermoplastics», 1990.
- [34] T. D. Bremner G Cook A Rudin, T. Bremner, D. G. Cook, A. Rudin y J. Appl Polym, «NOTES Further Comments on the Relations between Melt Flow Index Values and Molecular Weight Distributions of Commercial Plastics», John Wiley & Sons, Inc. CCC Sci, 1991.
- [35] M. Zahedi, M. Ahmadi y M. Nekoomanesh, Influence of molecular weight distribution on flow properties of commercial polyolefins, vol. 108, 2008, pp. 3565-3571.
- [36] E. Strömberg y S. Karlsson, The design of a test protocol to model the degradation of polyolefins during recycling and service life, vol. 112, 2009, pp. 1835-1844.
- [37] LibreTextos, Propiedades físicas de los ácidos carboxílicos, 2023.
- [38] G. Wypych, «Handbook of Odors in Plastic Materials», 2013.
- [39] S. Dalai y C. Wenxiu, Radiation effects on HDPE/EVA blends, vol. 86, 2002, pp. 553-558.
- [40] M. Erdmann, U. Niebergall, V. Wachtendorf y M. Böhning, Evaluation of UV-induced embrittlement of PE-HD by Charpy impact test, vol. 137, John Wiley and Sons Inc., 2020.
- [41] M. S. Abbas-Abadi, M. N. Haghghi y H. Yeganeh, «Effect of the melt flow index and melt flow rate on the thermal degradation kinetics of commercial polyolefins», Journal of Applied Polymer Science, vol. 126, n° 5, pp. 1739-1745, 12 2012.
- [42] R. M. Santana y G. Gondim, «Influence of cleaning conditions on the degradation of recycled HDPE», Journal of Applied Polymer Science, vol. 112, n°3, pp. 1454-1460, 5 2009.
- [43] R. M. Santos, A. R. Costa, Y. M. Almeida, L. H. Carvalho, J. M. Delgado, E. S. Lima, H. L. Magalhães, R. S. Gomez, B. E. Leite, F. D. Rolim, M. J. Figueiredo y A. G. Lima, «Thermal and Rheological Cha-

- racterization of Recycled PET/Virgin HDPE Blend Compatibilized with PE-g-MA and an Epoxy Chain Extender,» *Polymers*, vol. 14, n°6, 3 2022.
- [44] M. J. Lodeiro, P. E. Tomlins y A. Pearce, «The Influence of Pigments on the Mechanical Properties of High Density Polyethylene (HDPE),» NPL Report CMMT(A) 258, 2000.
- [45] B. Blanca, «LaNueva,» 03 10 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.lanueva.com/nota/2022-10-3-14-0-12-greenwashing-que-es-y-como-evitar-ser-enganados-por-esta-practica>. [Último acceso: 19 07 2024].
- [46] NatGeo, «Reutilizar plásticos en casa: por qué es importante y cómo hacerlo», 2023.
- [47] M. Chanda, «Plastics Technology Handbook Fifth Edition», 2018.
- [48] S. Moss y H. Zweifel, «Degradation and stabilization of high density polyethylene during multiple extrusions,» *Polymer Degradation and Stability*, vol. 25, n°2-4, pp. 217-245, 1989.
- [49] M. Trejo, J. Sánchez y A. Müller, «Efecto del Peso Molecular sobre el Comportamiento a Desgarre a Bajas Velocidades de Muestras Isotrópicas de PEAD», 2009.
- [50] A. P. Markopoulos, D. Manolakos, G. N. Kouzilos y D. E. Manolakos, «Manufacturing and Modeling of an Extrusion Die Spider Head for the Production of HDPE Tubes,» Article in *Journal of Manufacturing Technology Research*, vol. 6, n° 2, pp. 1-15, 2015.
- [51] Y. Huang y P. Prentice, «Experimental Study and Computer Simulation of the Effect of Spider Shape on the Weld-Lines in Extruded Plastic Pipe», 1998.
- [52] A. G. Mamalis, G. Kouzilos y A. K. Vortselas, «Design feature sensitivity analysis in a numerical model of an extrusion spider die,» *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 122, n° 6, pp. 3537-3543, 12 2011.
- [53] L. Jarecki, A. Ziabicki, Z. Lewandowski y A. Blim, «Dynamics of air drawing in the melt blowing of nonwovens from isotactic polypropylene by computer modeling», *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 119, n°1, pp. 53-65, 1 2011.
- [54] M. Yamaguchi y K. I. Suzuki, «Enhanced strain hardening in elongational viscosity for HDPE/crosslinked HDPE blend. II. Processability of thermoforming», *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 86, n° 1, pp. 79-83, 10 2002.
- [55] D. Vargas Díaz, «Simulación y validación del proceso de moldeo por extrusión soplado para polietileno de alta densidad», 2011.
- [56] H. Xia, H. Gao, Q. Sun, F. Wu, T. Ge, K. Sui, Z. Wang, L. Song, X. Huang y Q. Yu, «Puerarin, an efficient natural stabilizer for both polyethylene and polypropylene», *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 137, n° 48, 12 2020.
- [57] E. Karaagac, T. Koch y V. M. Archodoulaki, «The effect of PP contamination in recycled high-density polyethylene (rPE-HD) from post-consumer bottle waste and their compatibilization with olefin block copolymer (OBC)», *Waste Management*, vol. 119, pp. 285-294, 1 2021.
- [58] T. Lu, H. Ye, A. Zheng, X. Xu, C. Xu, H. Wang, L. Sun y L. Xu, «Hybrid modification of high-density polyethylene with hyperbranched polyethylene-functionalized multiwalled carbon nanotubes and few-layered graphene», *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 134, n°27, 7 2017.
- [59] C. N. Kartalis, C. D. Papaspyrides, R. Pfaendner, K. Hoffmann y H. Herbst, «Mechanical Recycling of Postused High-Density Polyethylene Crates Using the Restabilization Technique. I. Influence of Reprocessing», 1999.
- [60] C. Tsengoglou, C. N. Kartalis, C. D. Papaspyrides y R. Pfaendner, «Modeling the Role of Stabilizing Additives During Melt Recycling of High-Density Polyethylene», 2001.
- [61] J. Kubo, «Inhibition of Deterioration of Plastics by Hydroaromatics».
- [62] E. Ramírez-Vargas, Z. Sandoval-Arellano, J. S. Hernández-Valdez, J. G. Martínez-Colunga y S. Sánchez-Valdés, «Compatibility of HDPE/postconsumer HDPE blends using compatibilizing agents,» *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 100, n° 5, pp. 3696-3706, 6 2006.
- [63] F. Yao, Q. Wu, H. Liu, Y. Lei y D. Zhou, «Rice straw fiber reinforced high density polyethylene composite: Effect of coupled compatibilizing and toughening treatment», *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 119, n° 4, pp. 2214-2222, 2 2011.

- [64] L. Dehne, C. Vila, B. Saake y K. U. Schwarz, «Esterification of Kraft lignin as a method to improve structural and mechanical properties of lignin-polyethylene blends», *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 134, nº 11, 3 2017.
- [65] M. J. Lodeiro y P. E. Tomlins, «Influence of Pigments and Processing on the Dimensions and Appearance of HDPE Injection-Moulded Bottle Caps», 2002.
- [66] Aisvision, «Control de envases», [En línea]. Disponible en: <https://aisvision.com/es/soluciones/vision-artificial/control-de-envases/>. [Último acceso: 2023].
- [67] J. Jiang, X. Zhan, Y. Liu, C. Tang, J. Wang y J. Liu, «Quality Analysis of high-density polyethylene based on Intelligent Vision Detection», 2022 4th International Conference on Industrial Artificial Intelligence (IAI), pp. 1-6, 2022.
- [68] Q. Sun, D. Zhang, B. Chen y L. C. Wadsworth, «Application of Neural Networks to Meltblown Process Control», 1996.
- [69] C. Cifuentes, C. López y J. González, «Sistema de inspección automatizado supervisado en boca de envase Pead», *Repositorio Universidad Liberdadores*, 1 2023.
- [70] J. Stoner, «¿Qué es la Ley de Moore y cómo afecta a la IA?», UNITE.AI, 2023.
- [71] M. Ansari, S. G. Hatzikiriakos, A. M. Sukhadia y D. C. Rohlfing, «Melt fracture of two broad molecular weight distribution high-density polyethylenes», *Polymer Engineering and Science*, vol. 52, nº 4, pp. 795-804, 4 2012.
- [72] R. Kent, *Energy Management in Plastics Processing* (Third Edition), Elsevier, 2018.
- [73] dmccol, «La relación entre el petróleo y el plástico: ¿Cómo influye uno en la producción de bolsas plásticas?», DIMAC Plásticos, [En línea]. Disponible en: <https://fabricadebolsasplasticas.com/que-tiene-que-ver-el-petroleo-con-el-plastico/>. [Último acceso: 2024].
- [74] ASTM, «Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer 1», 2007.
- [75] ASTM, «Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement 1», 2010.
- [76] J. W. D. R. M. K. Byoung-Ho Choi, «Modeling of the Fracture Mechanism of HDPE Subjected to Environmental Stress Crack Resistance Test», *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*, 2009.
- [77] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, «Informe sectorial de la actividad de aprovechamiento 2021», 2023.

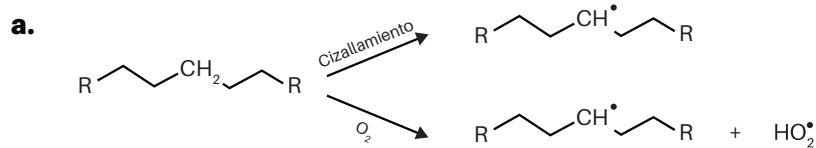


8.

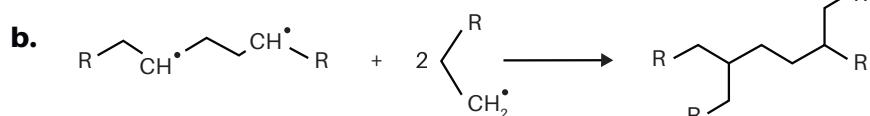
Anexos

8.1. Algunas reacciones de degradación PEAD posconsumo

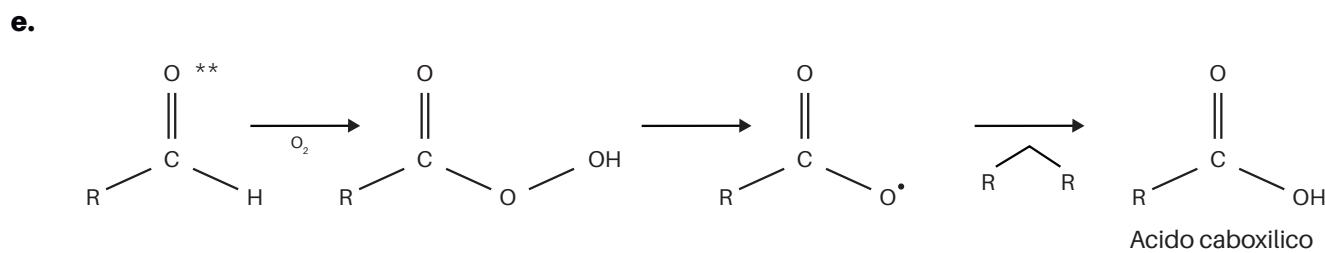
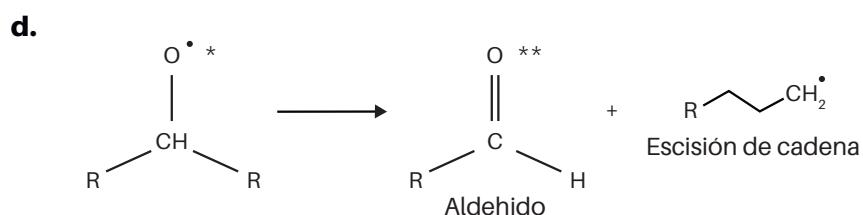
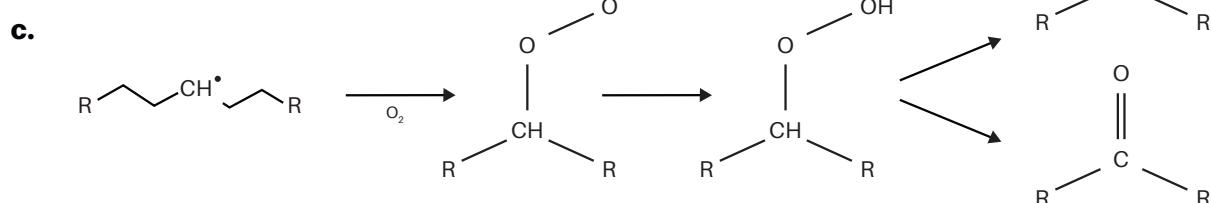
Formación radical



Reticulación



Oxidación



Escisión de cadena

