

Antes de comenzar nuestra sesión ...



INSTITUTO DE
CAPACITACIÓN
E INVESTIGACIÓN
DEL PLÁSTICO Y
DEL CAUCHO



Ubícate en un
lugar cómodo



Prepárate un café
o tu bebida favorita



Alista lápiz y papel
para tomar nota

Durante la sesión ...



Interactuar con los docentes y
demás participantes del curso
a través del chat



Q&A

Dejar tus preguntas haciendo
clic en el botón Q&A (Preguntas y
Respuestas).



No grabar la sesión.
Recuerda que no está
permitido

Programas de
formación para
INTEC



INSTITUTO DE
CAPACITACIÓN
E INVESTIGACIÓN
DEL PLÁSTICO Y
DEL CAUCHO

Familias de polímeros: usos, aplicaciones y retos para el reciclaje





Presentador:

Ph. D. Omar Augusto Estrada Ramírez

- CEO de sospol s.a.s.
- Investigador Senior en el Sistema Nacional de Tecnología de Colombia (SNCTel)
- Investigador externo del ICIPC.
- Ingeniero Químico de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Especialista en Procesos de Transformación del Plástico y del Caucho y Magíster en Ingeniería de Procesamiento de Polímeros del programa en convenio entre la Universidad EAFIT y el ICIPC.
- Doctor en Ingeniería con énfasis en Sistemas Energéticos de la Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Minas.
- Co-inventor de varias patentes otorgadas en Estados Unidos y patentes PCT.
- Coautor de software especializado del ICIPC con registros de soporte lógico ante la Dirección Nacional de Derecho de Autor en Colombia.
- Ponente en múltiples eventos y coautor de múltiples publicaciones científicas en el ámbito nacional e internacional.



Objetivos del curso

1.

Distinguir entre los principales códigos encontrados en las piezas plásticas.

2.

Conocer las diferentes familias de polímeros y su relación con los códigos.

3.

Aprender sobre las propiedades generales y aplicaciones de los polímeros.



Objetivos del curso

4.

Conocer las problemáticas comunes para el reciclaje de polímeros.

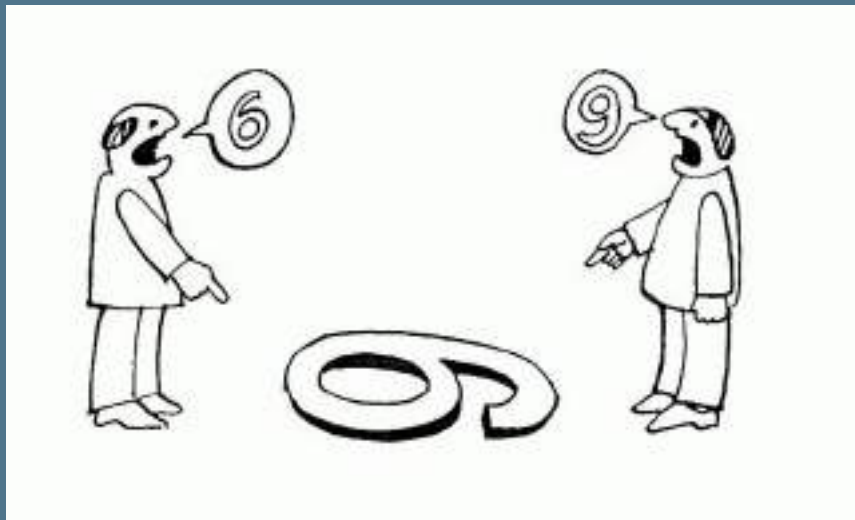
5.

Identificar de manera sencilla y rápida los materiales plásticos.



Paradigmas...

o la forma de *entender el mundo*



Tomado de: [El cartapacio de Wenceslao Arroyo Machado](#)
[El paradigma - El cartapacio de Wenceslao Arroyo Machado](#)



Tomado de: [Cómo nace un paradigma. Mujeres de empresa](#)

Otros propósitos del curso

¡No choques
con la vaca!

a.

Cambiar los
paradigmas
incorrectos

b.

Afianzar los
paradigmas
correctos

c.

Preparar la
mente para el
adecuado
entendimiento
de los
materiales
plásticos



¿Por qué muchas veces los materiales plásticos son la mejor alternativa?





Hablemos sobre la “realidad” de los plásticos

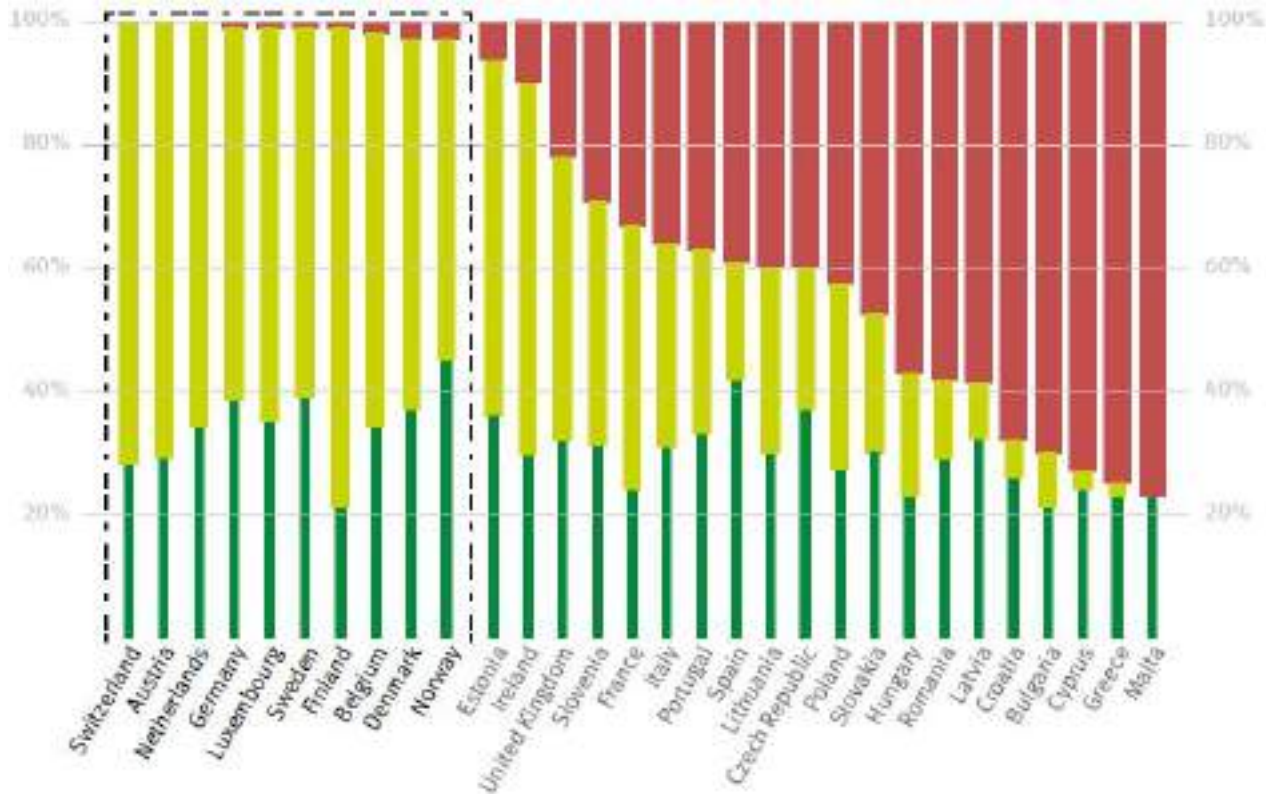


Hablemos sobre la “realidad” de los plásticos



Consumo de
petróleo asociado a
la producción de
plásticos

Hablemos sobre la “realidad” de los plásticos



Reciclaje



Recuperación Energética

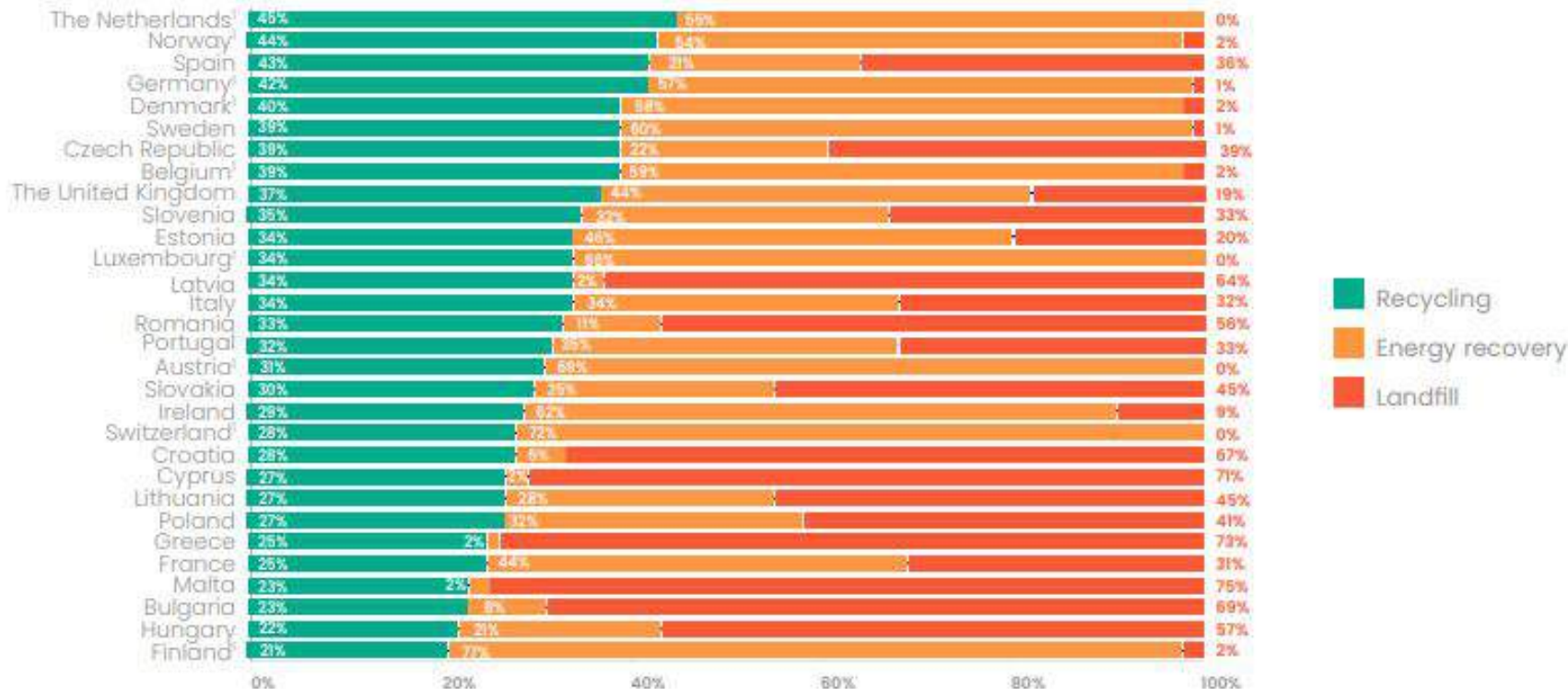


Relleno sanitario

Países que aplican restricciones al depósito en rellenos sanitarios



Hablemos sobre la “realidad” de los plásticos



¿Qué pasa con el desperdicio de alimentos?

Según la FAO, se pierden 1300 millones de toneladas de comida producida para el consumo humano: $\frac{1}{3}$ del total, suficientes para alimentar a 3.000 millones de personas



Es 21x más potente como GEI que el CO_2

CAMBIO CLIMÁTICO



Gases de Relleno sanitario:
 CH_4 (50-55%) y CO_2 (40-45%)



¿Cómo aportan los plásticos?

7g visibles de Polietileno

=

15g CO₂ equiv.

500g visibles de pan

=

200g invisibles CO₂ equiv.



80g pérdida

=

32g CO₂ equiv.

10 g visibles de Polietileno

=

20 g CO₂ equiv.



Envases de 250g más adecuado a familias pequeñas,
evitando desperdicios

- 10g de plástico protegen 500g de pan.
- Se aportan 5g más de CO₂ por el empaque plástico pero se protegen 80g de pan que equivaldrían a 32g de CO₂
- El balance neto es un ahorro de 27g de CO₂

¿Cómo aportan los plásticos?

<https://www.lavanguardia.com/>



60 Libras Producto



50 Libras vidrio



30 Libras Aluminio



6 Libras PET



1.5 Libras plástico flexible



26 Camiones de botellas de vidrio llenas de salsa



Un camión de bolsas plásticas llenas de salsa



Menor consumo de combustible y menos emisiones



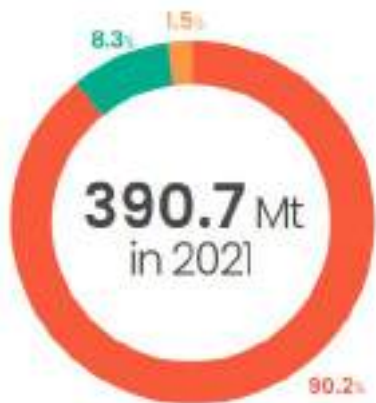
GENERALIDADES E INTRODUCCIÓN A LOS POLÍMEROS

Producción y consumo de plásticos en el mundo



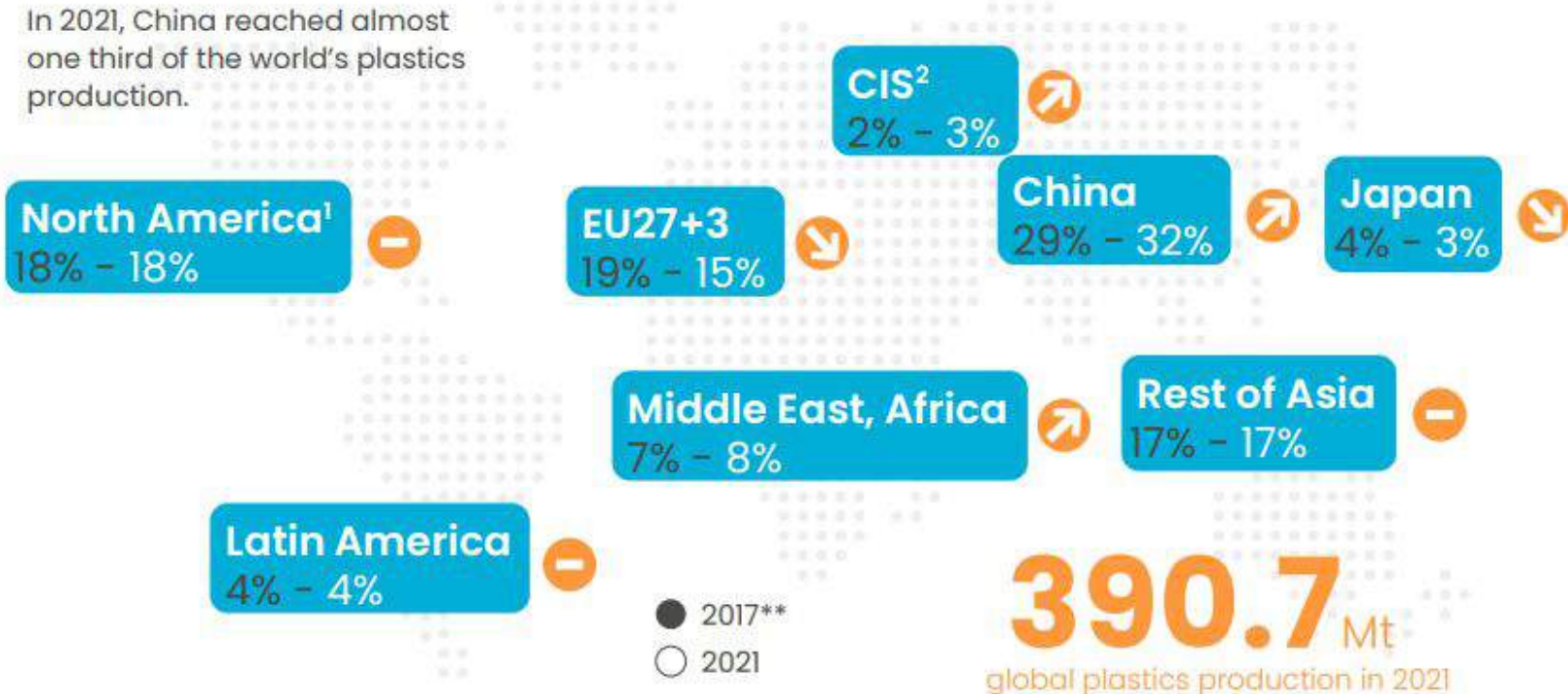
Producción y consumo de plásticos en el mundo

- Fossil-based plastics¹
- Post-consumer recycled plastics²
- Bio-based plastics (including bio-attributed plastics in 2021 data)³



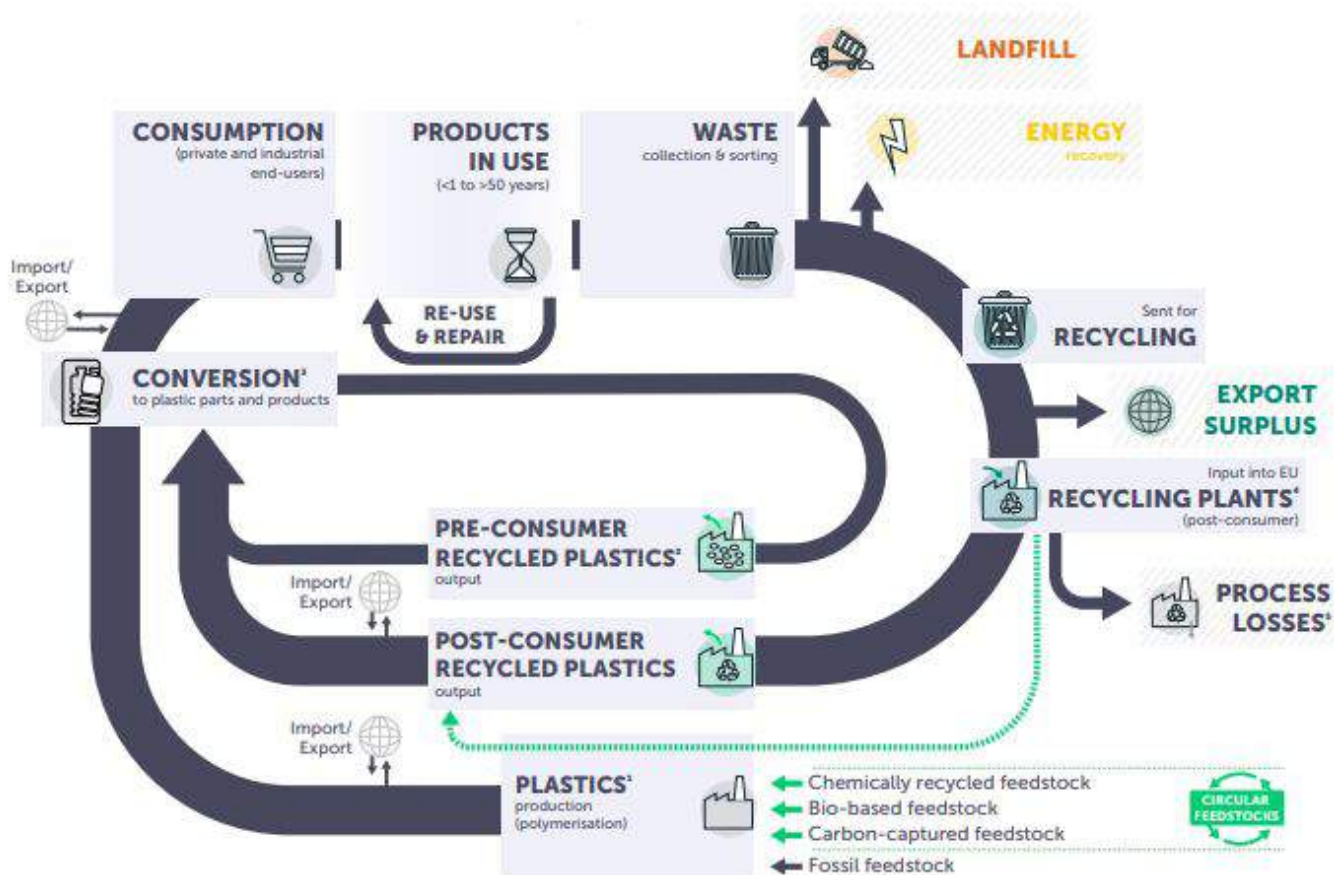
Producción y consumo de plásticos en el mundo

In 2021, China reached almost one third of the world's plastics production.



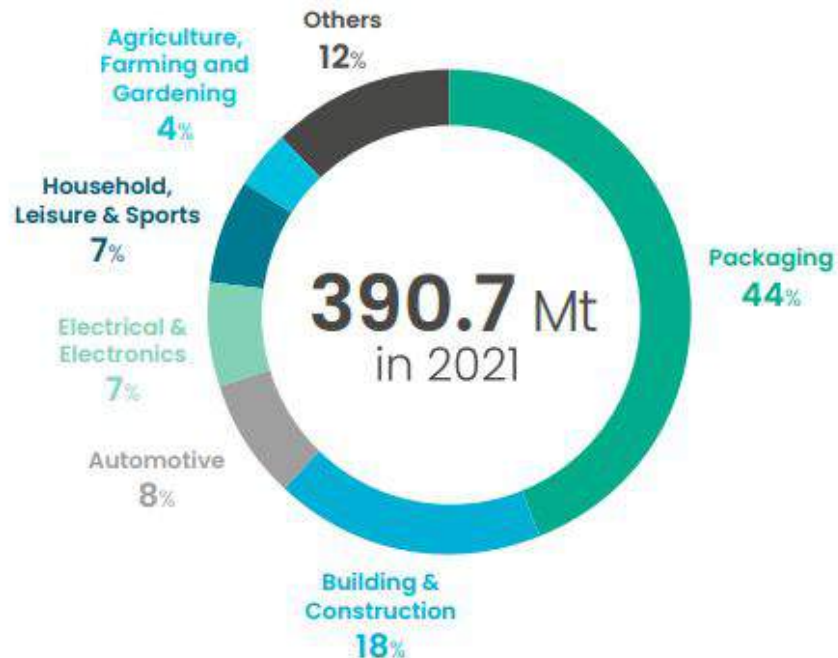
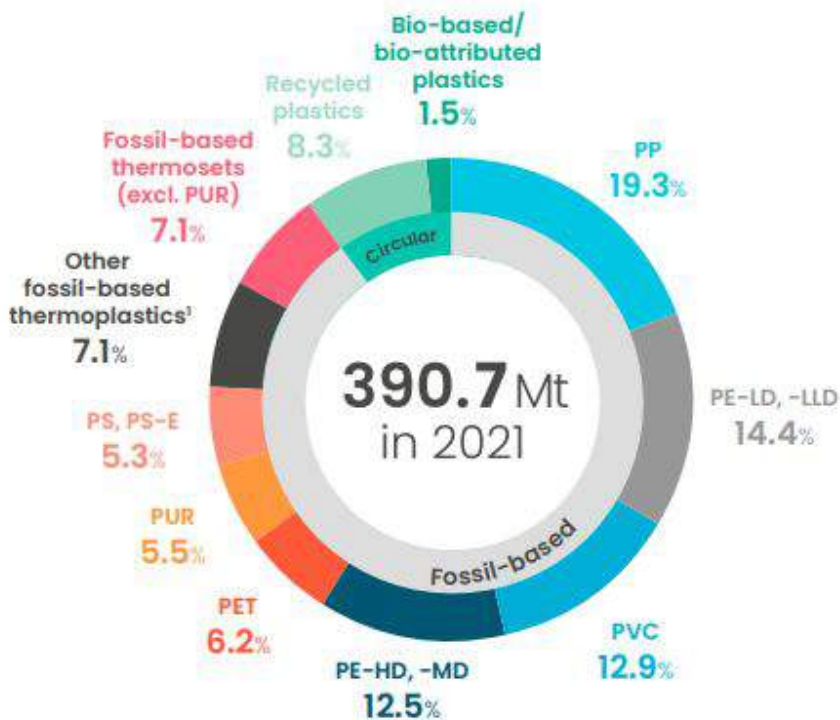
Esquema de economía circular

Basado en la experiencia Europea

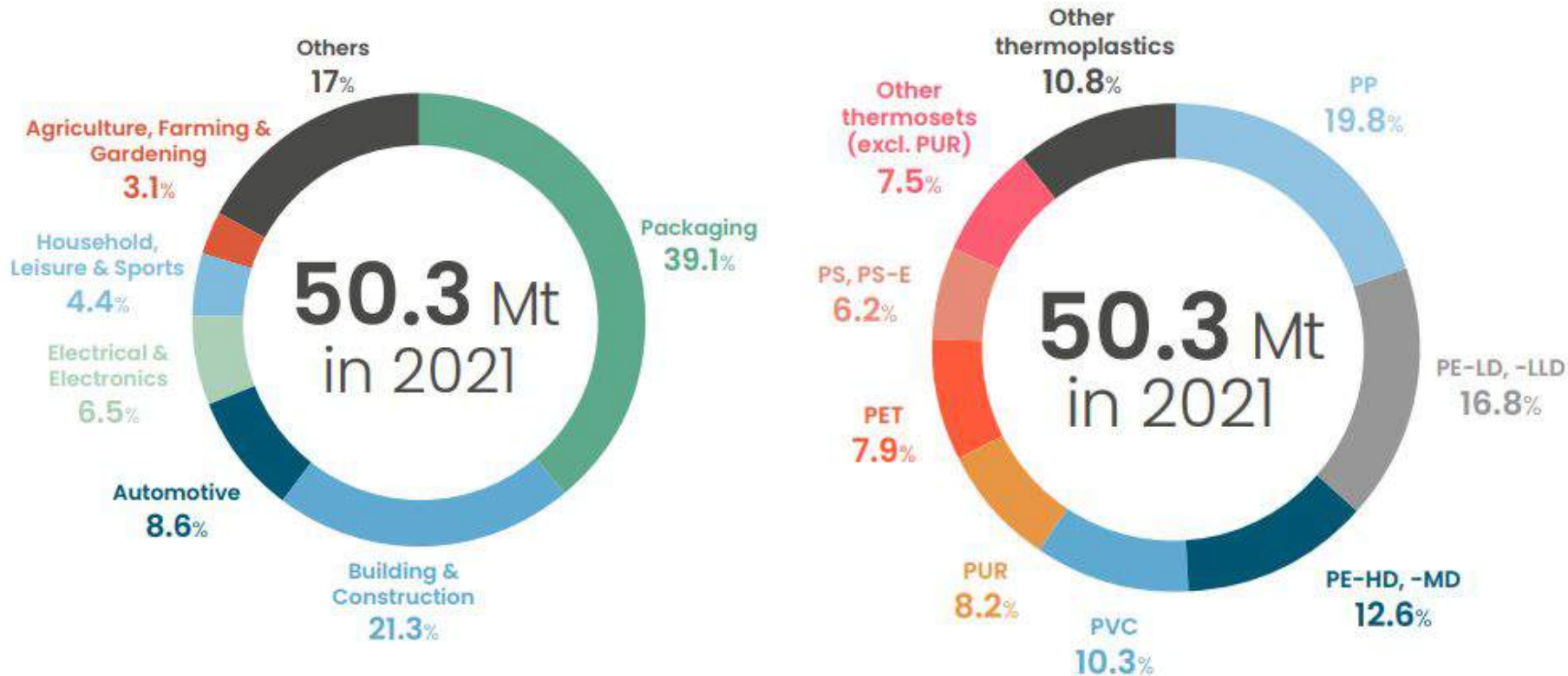




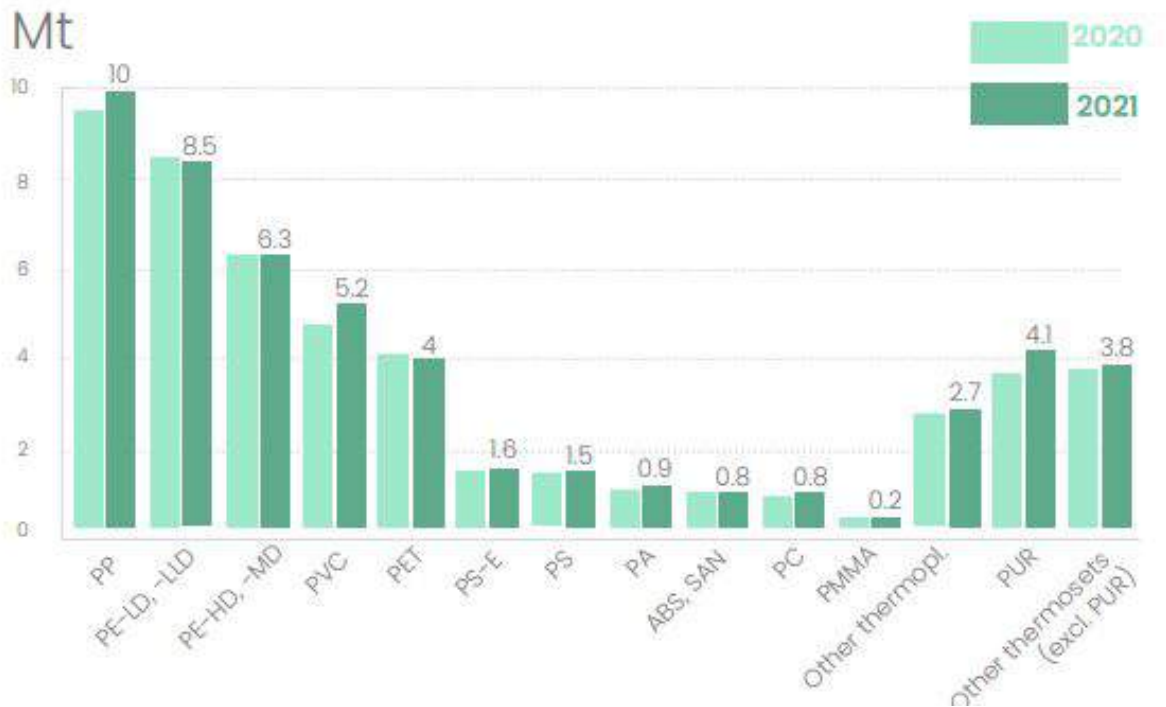
Producción y consumo de plásticos en el mundo



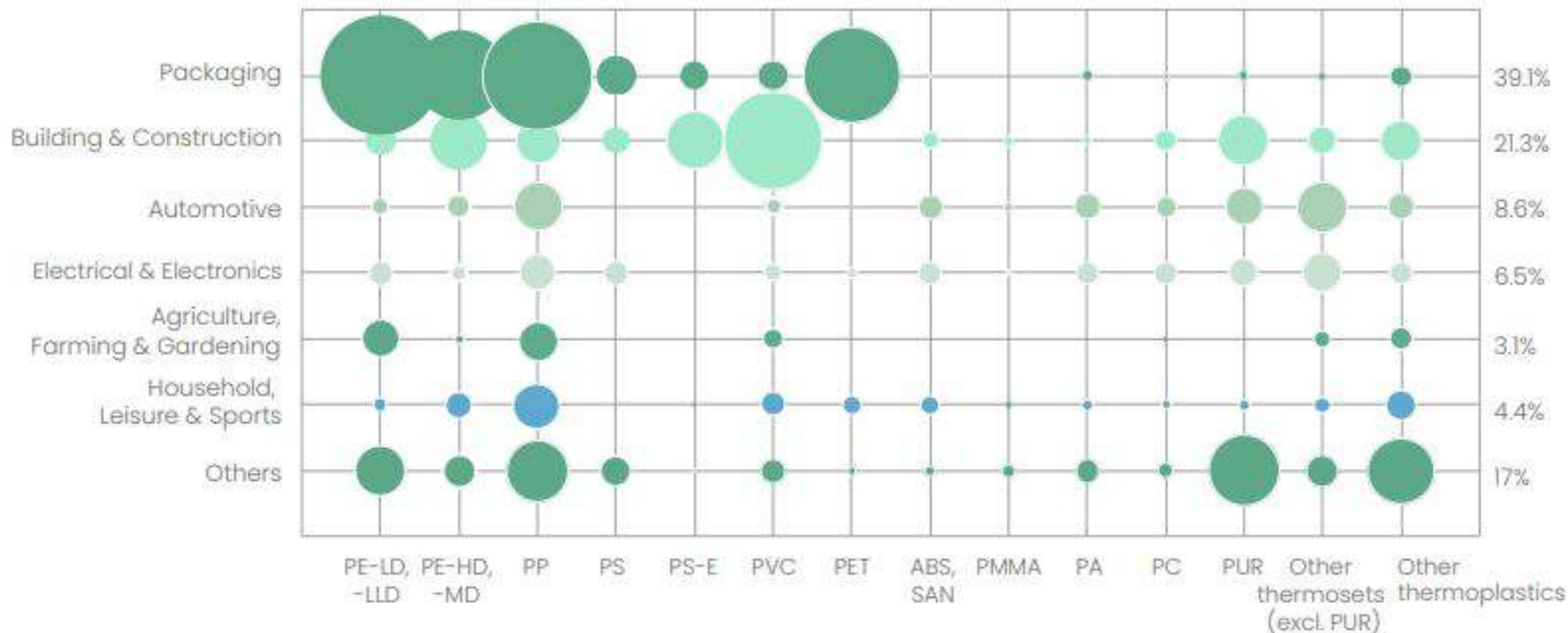
Producción y consumo de plásticos en Europa



Producción y consumo de plásticos en el Europa



Producción y consumo de plásticos en Europa





Evolución del reciclaje en Europa

RECYCLED CONTENT IN NEW PRODUCTS

7.2% (4 Mt)



8.5% (4.6 Mt)



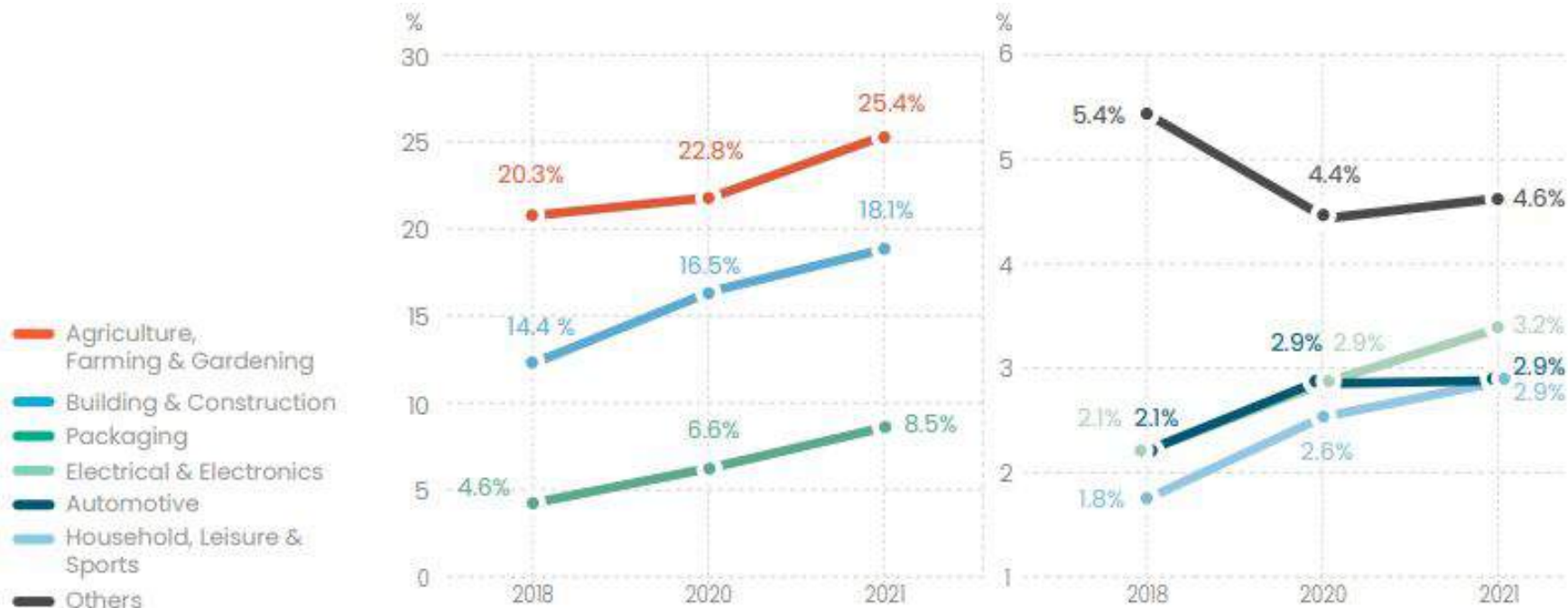
9.9% (5.5 Mt)



 Post-consumer recycled plastics

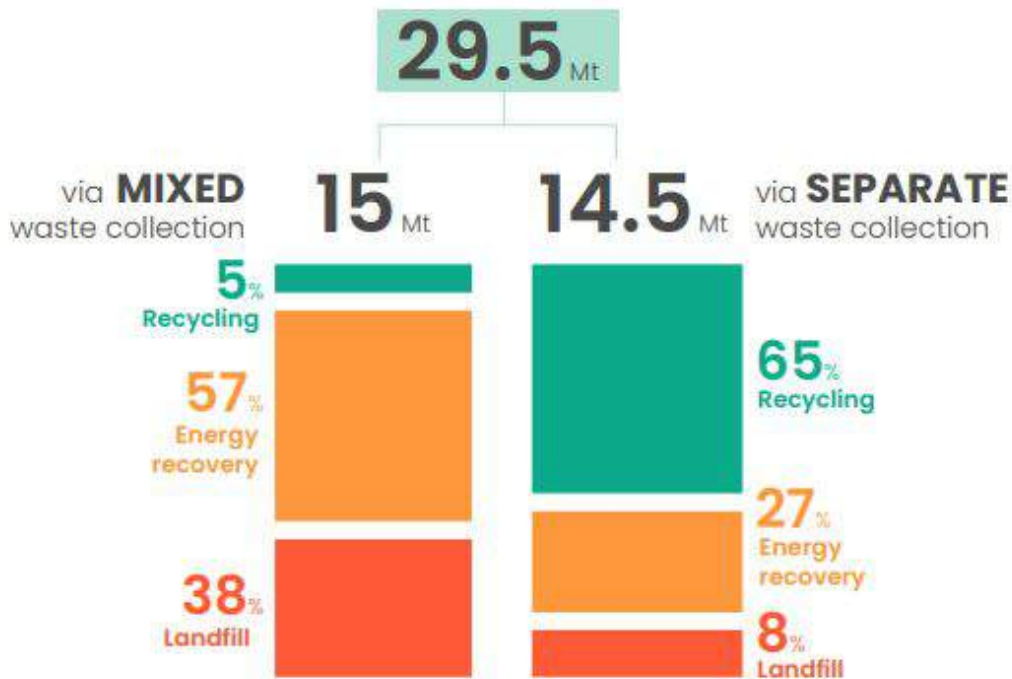


Evolución del reciclaje en Europa

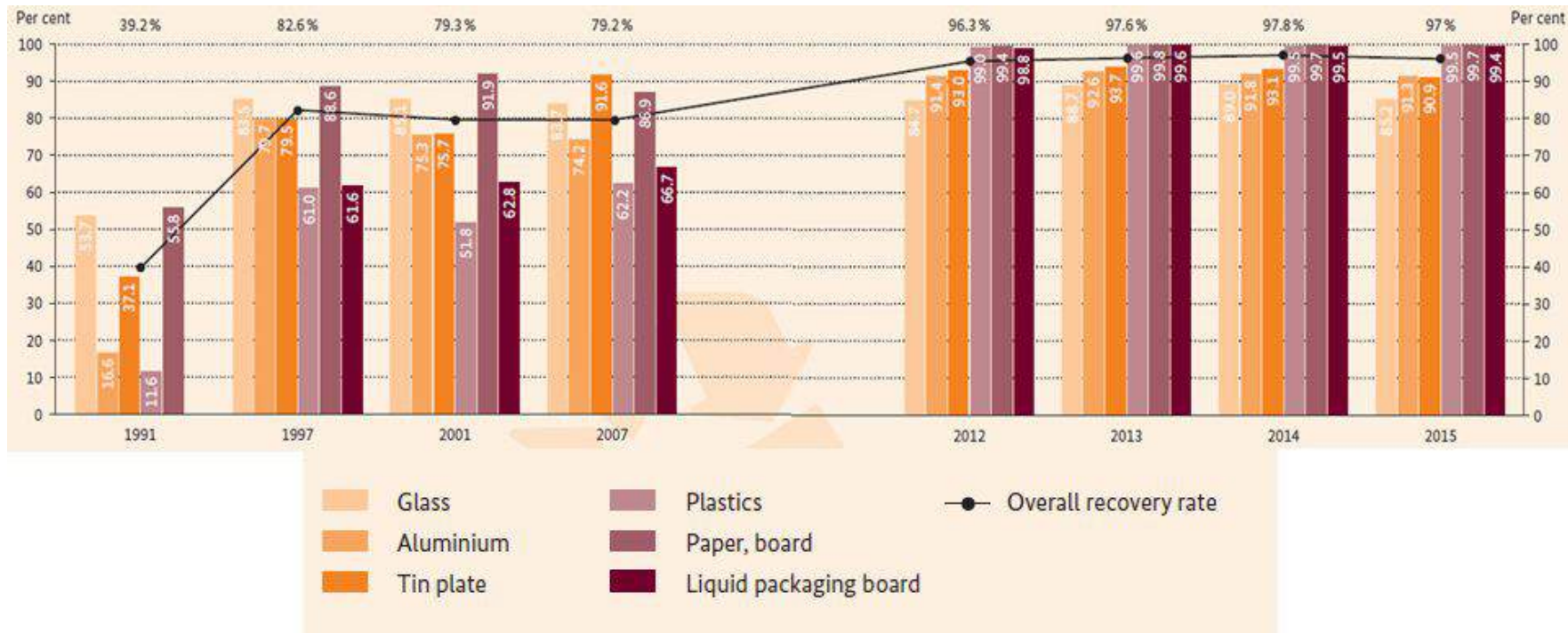


Evolución del reciclaje en Europa

¡Cuando se separa adecuadamente en la fuente se mejora la efectividad del reciclaje 13 veces!



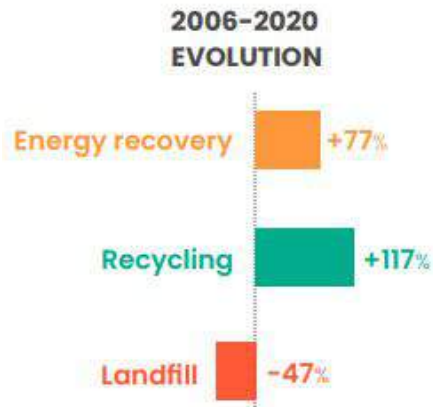
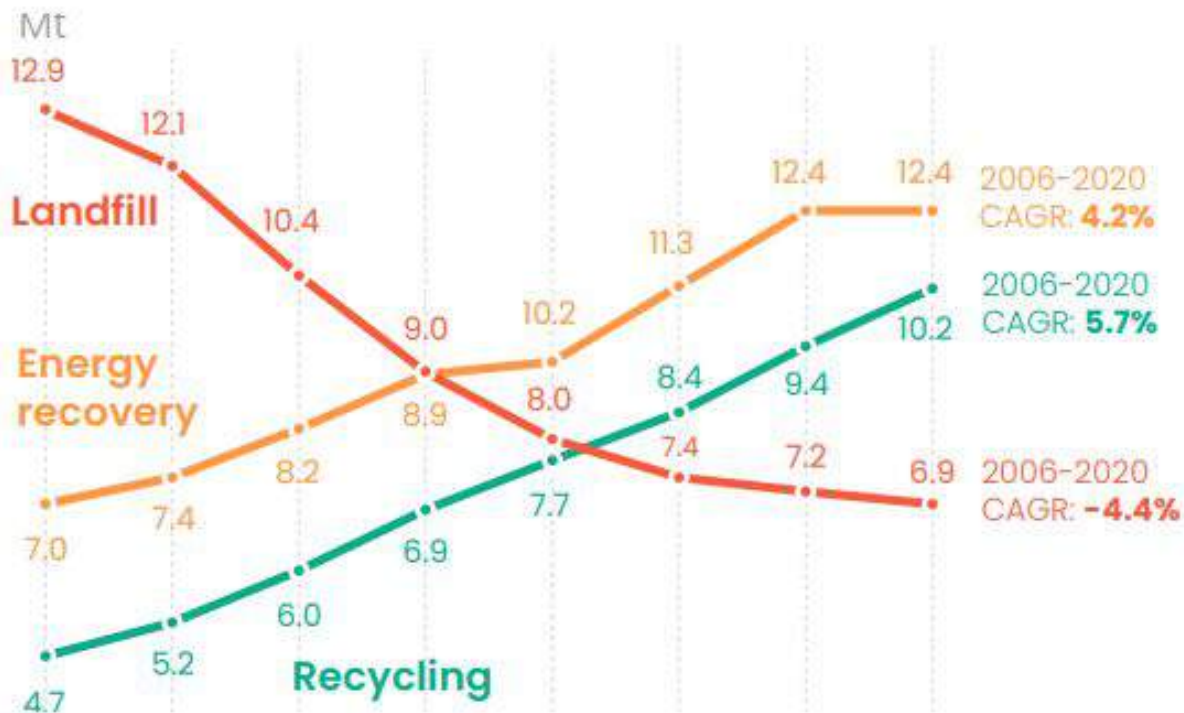
Separación en la fuente - Impacto en el Sistema de reciclaje alemán



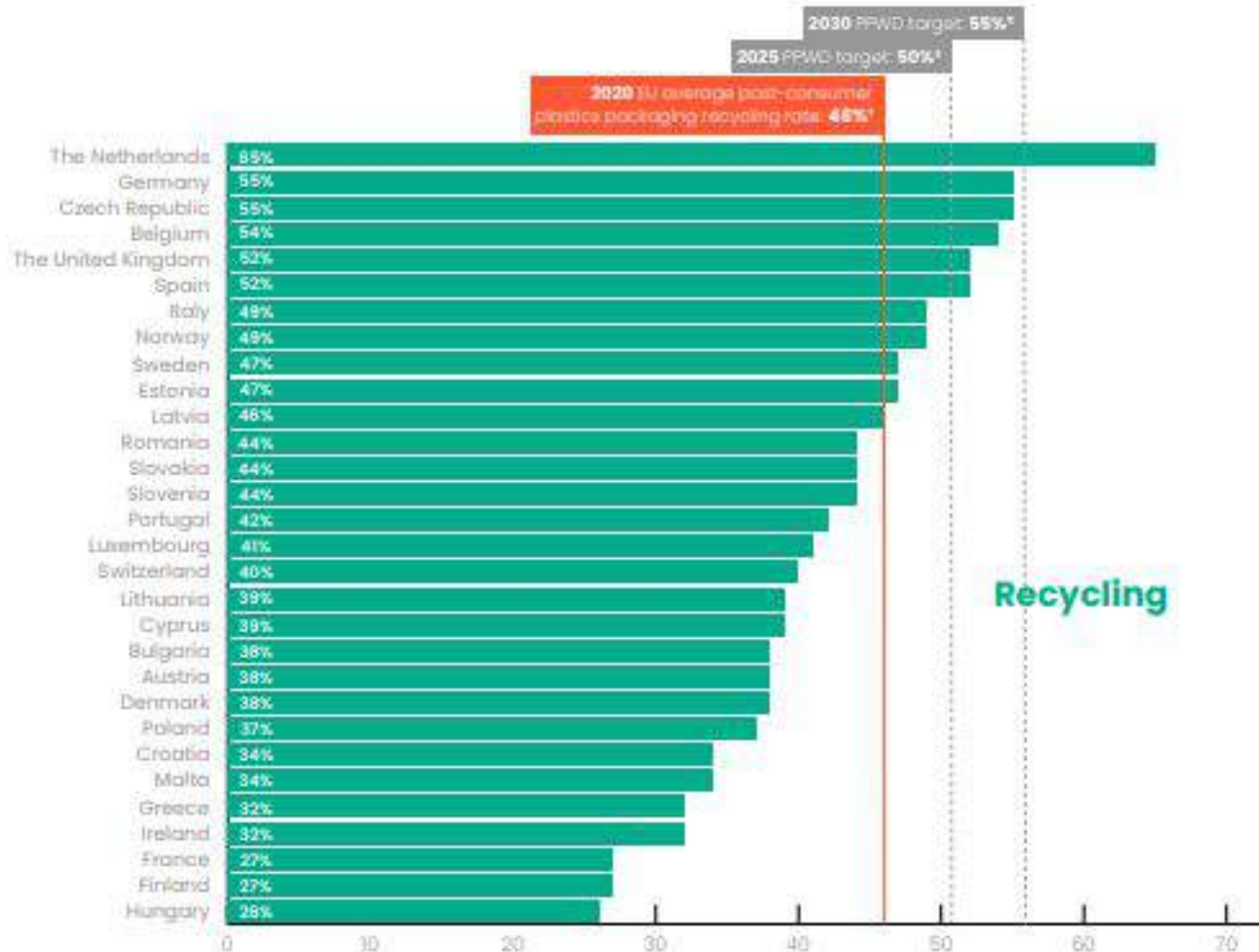
Fuente:



Evolución del reciclaje en Europa

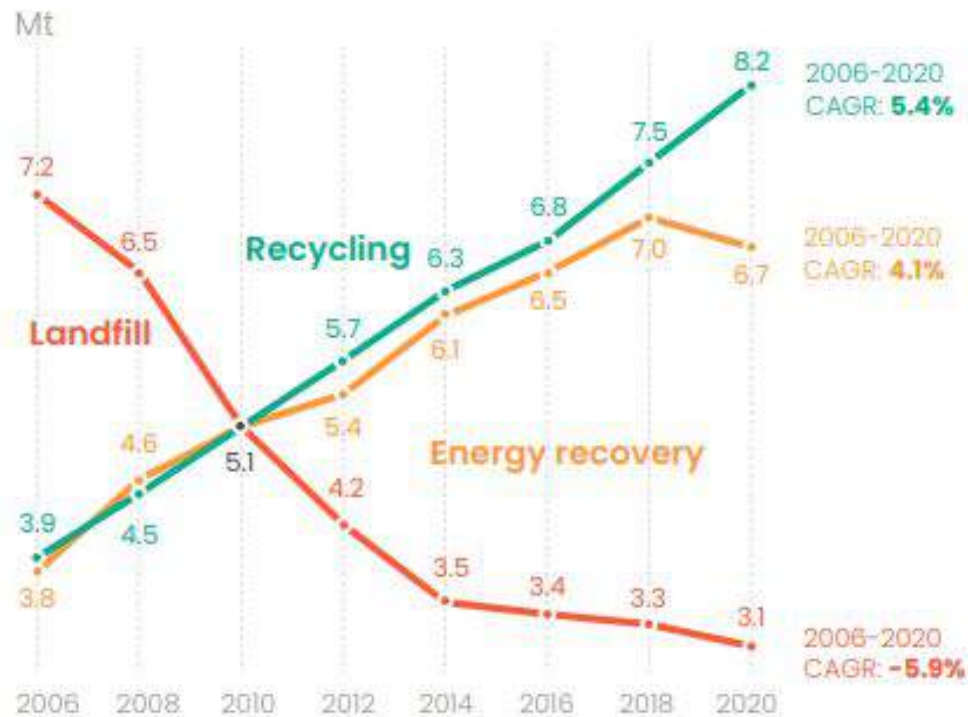


El reciclaje en el sector de empaques



El reciclaje en el sector de empaques

2006-2020 EVOLUTION



¿Cómo se forman los polímeros?

Son “cadenas” macromoleculares

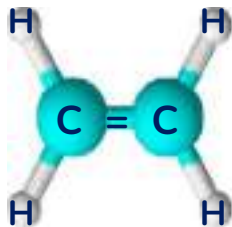


Eslabón

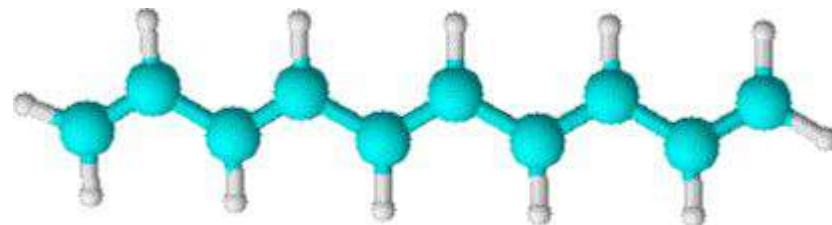


<https://www.pngocean.com/>

Cadena



Monómero: Etileno



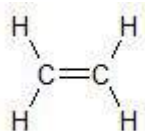
Polímero: Polietileno

¿Cómo se forman los polímeros?

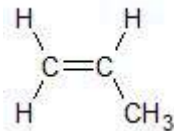
Algunos ejemplos

Monómero

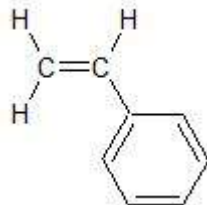
Etileno



Propileno

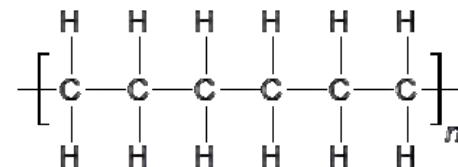


Estireno

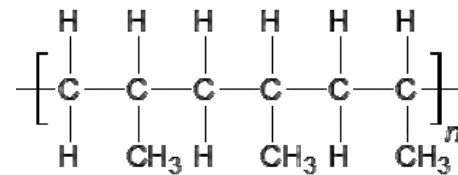


Polímero

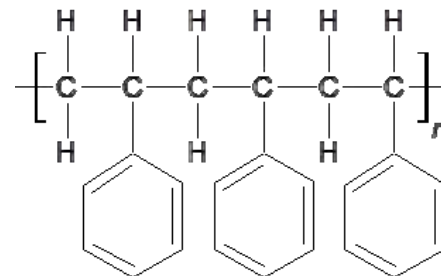
Polietileno



Polipropileno



Poliestireno



Clasificación de los polímeros

De acuerdo con el ordenamiento molecular



Pregunta 3



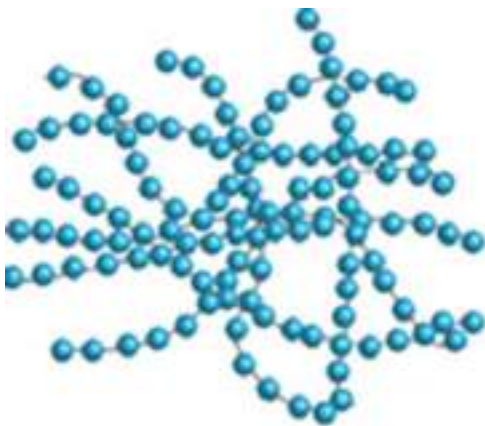
Por el ordenamiento molecular los materiales se clasifican en amorfos y semicristalinos



Clasificación de los polímeros

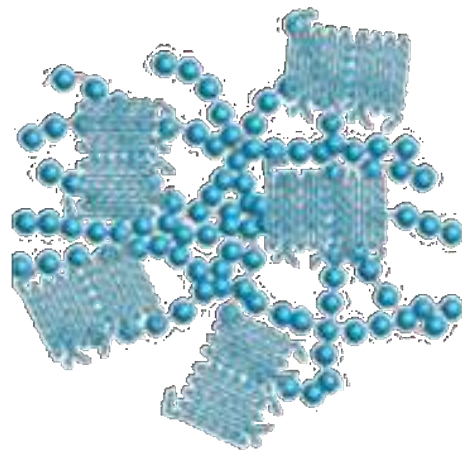
De acuerdo con el ordenamiento molecular

Amorfos



Presentan “Desorden Molecular”

Semicristalinos



Las moléculas se encuentran ordenadas tridimensionalmente



Cristalización - Cinética



Tiene dos fases básicas:

- Nucleación
- Crecimiento

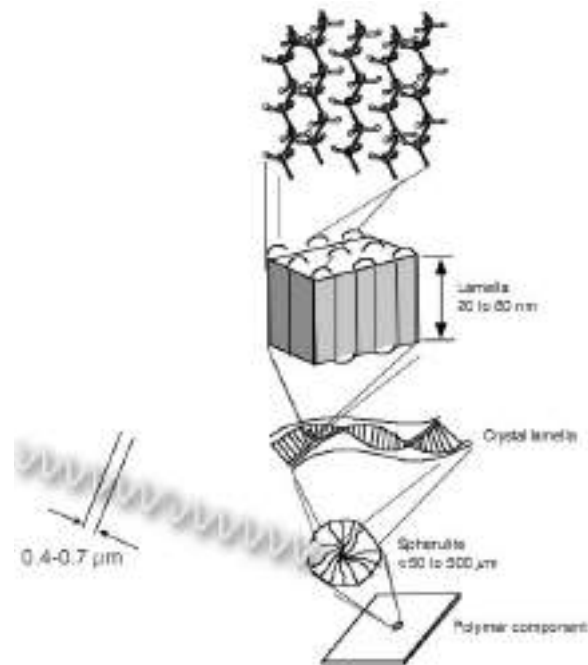
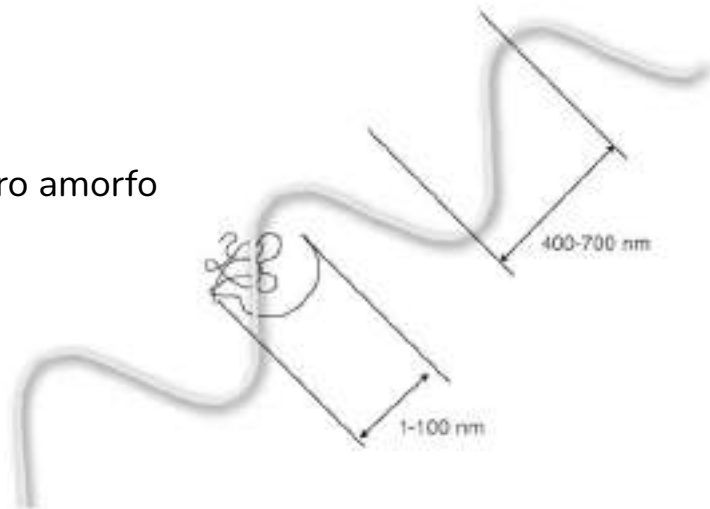
Los cristales tienen:

- Tamaño
- Número
- Configuración

Cuando se encuentran dos esferulitas en crecimiento se forman planos lábiles

¿Por qué generalmente los polímeros semicristalinos son opacos?

Polímero amorfo



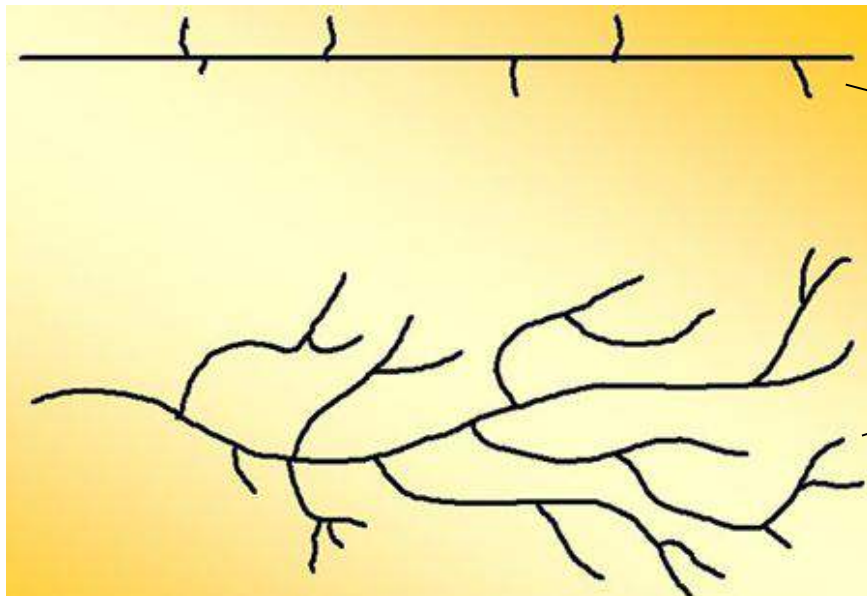
Porque la longitud de onda de la luz es mayor que el tamaño de las moléculas y por ende estas interfieren en su propagación



Cristalización

Factores que la afectan

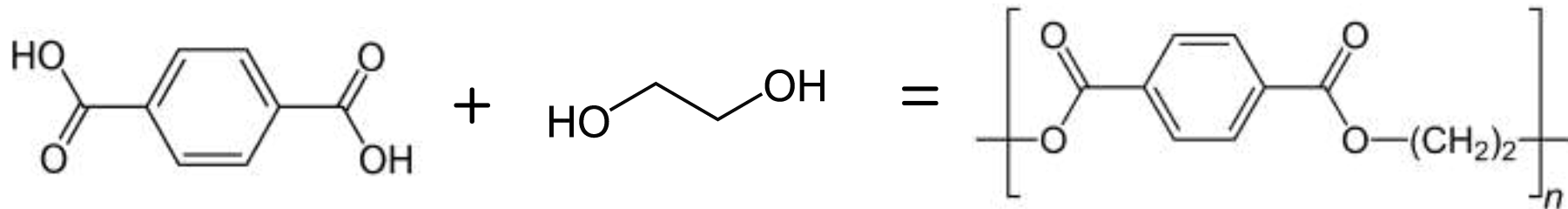
LINEALIDAD: Grandes ramificaciones dificultan más la cristalización que las pequeñas



HDPE: 4 a 10 cadenas cortas por cada 1000 C
80% de CRISTALINIDAD

LDPE:
50% de CRISTALINIDAD

Unidad Estructural



Ácido
tereftálico

Etilenglicol

Polietilentereftalato (PET)

Monómero A

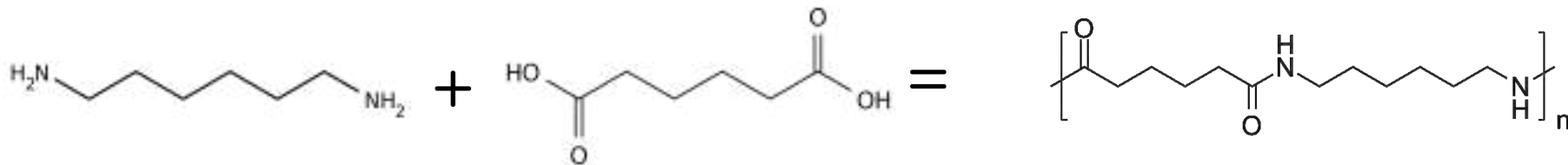
+

Monómero B

=

Unidad estructural que se repite n veces

Unidad Estructural



1,6-hexanodiamina
O hexametildiamina

Ácido adípico

Poliamida 66 (PA 66 o Nylon 66)

Monómero A

+

Monómero B

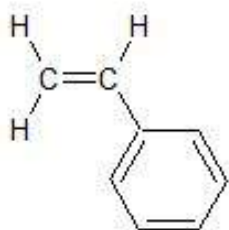
=

Unidad estructural que se repite n veces

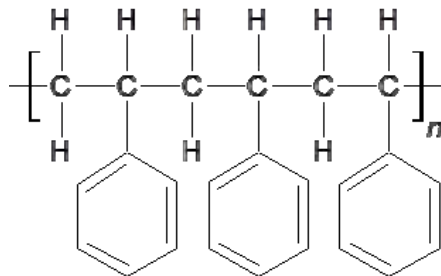
Homopolímeros y Copolímeros

Homopolímeros

Polímero constituido por la repetición de una única unidad estructural: cadena homogénea.



Unidad estructural que se repite: **Estireno**



Homopolímero:
Poliestireno

Si A representa la unidad estructural entonces la estructura del homopolímero es:



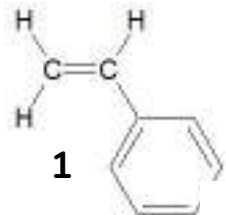
Ejemplos: PE, PTFE, PA66, LDPE, PP-H



Homopolímeros y Copolímeros

Copolímeros

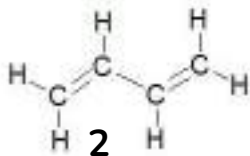
Polímero constituido por dos o más unidades estructurales (UE): cadena heterogénea.



1

UE 1:

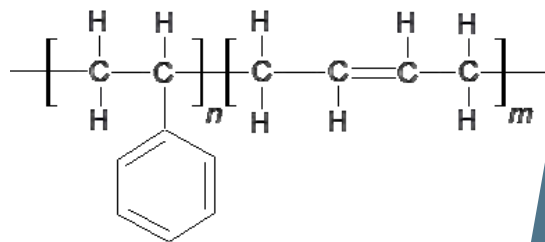
Estireno



2

UE 2: Butadieno

También suelen llamarse
co-monómeros



Copolímero:

Estireno-butadieno (SB)

Si A y B representan las unidades estructurales entonces la estructura del copolímero puede ser:



Sin embargo, existen 4 formas de disponer las unidades estructurales en la cadena:



Homopolímeros y Copolímeros

Los 4 tipos de copolímeros

1. Copolímeros alternantes:

Las unidades estructurales unidas en una forma alternada a lo largo de la cadena del polímero:



Ejemplos: SAN

2. Copolímeros al azar (o aleatorios):

Las unidades estructurales unidas en una secuencia desordenada:



Ejemplos: SB, PP-R

3. Copolímeros en bloque:

Las unidades estructurales se agrupan y forman "bloques" de unidades que se repiten.:



Ejemplos: SB, PP-B



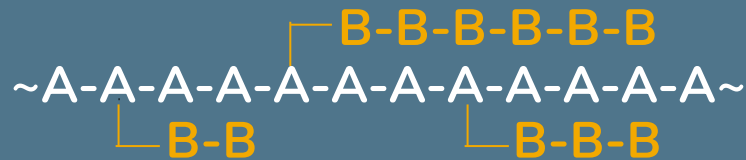
Homopolímeros y Copolímeros

Los 4 tipos de copolímeros

4. Copolímeros de injerto:

Son copolímeros segmentados con un esqueleto lineal de una unidad estructural y ramas distribuidas al azar de otra:

Ejemplos: ABS, ASA, LLDPE-C4



Peso molecular y distribución de peso molecular

Peso molecular (MW)

Grado de Polimerización: Número de veces que se repite la unidad estructural



**A mayor longitud de las cadenas:
mayor MW**

Un material polimérico puede consistir de cadenas de polímero de distintas longitudes o unidades de repetición

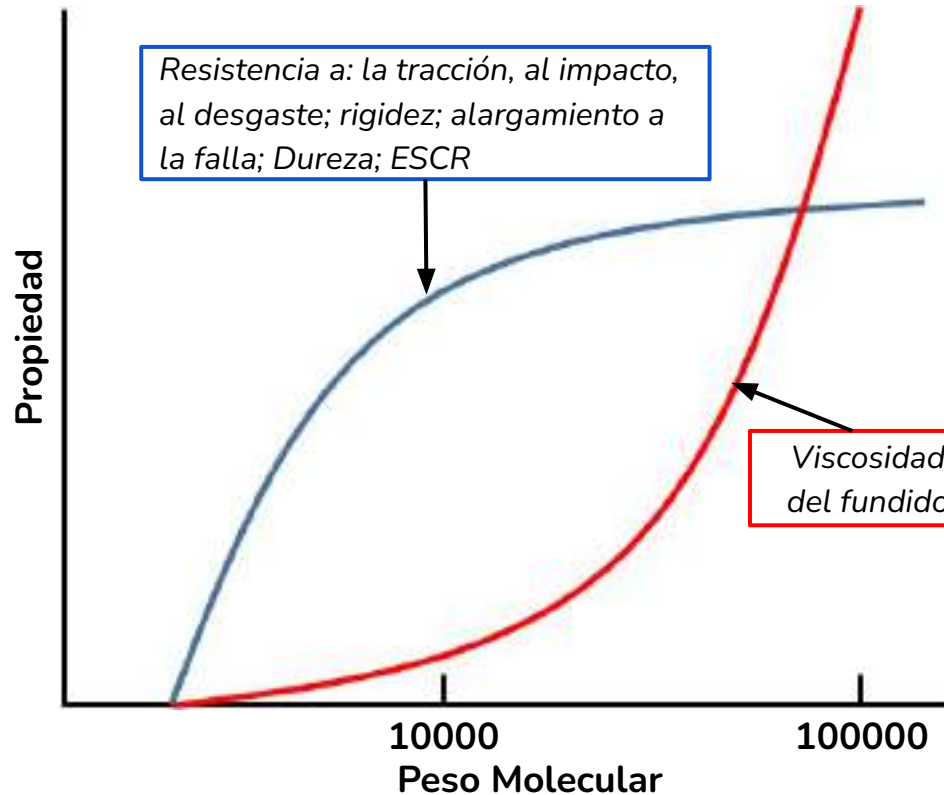
El MW es la suma de los pesos atómicos de los átomos de una molécula:

$$\text{PS} = (\text{C}_8\text{H}_8)_n = n \times 104 \text{ g/mol}$$



Peso molecular y distribución de peso molecular

Peso molecular : Cómo afecta a las propiedades de un polímero

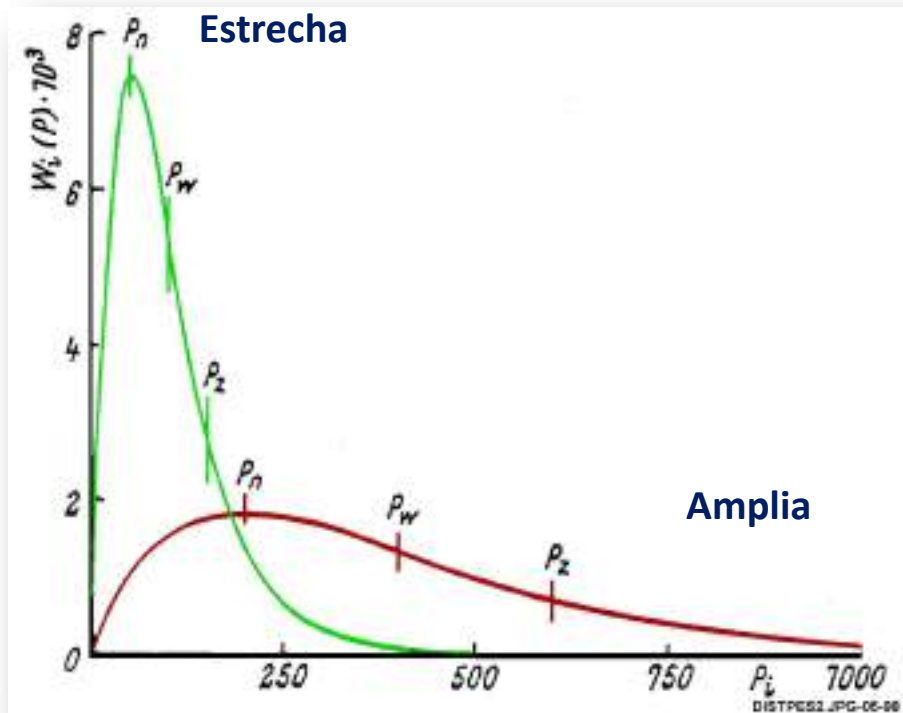


Las propiedades de un polímero están fuertemente ligadas al MW:

- *A partir de cierto MW, el crecimiento de las cadenas no aporta mejoras sustanciales de la resistencia pero dificulta enormemente la procesabilidad.*



Distribución de peso molecular (MWD)



¡Un polímero con el mismo MW y diferente MWD tiene propiedades diferentes y requerimientos de procesamiento diferentes!





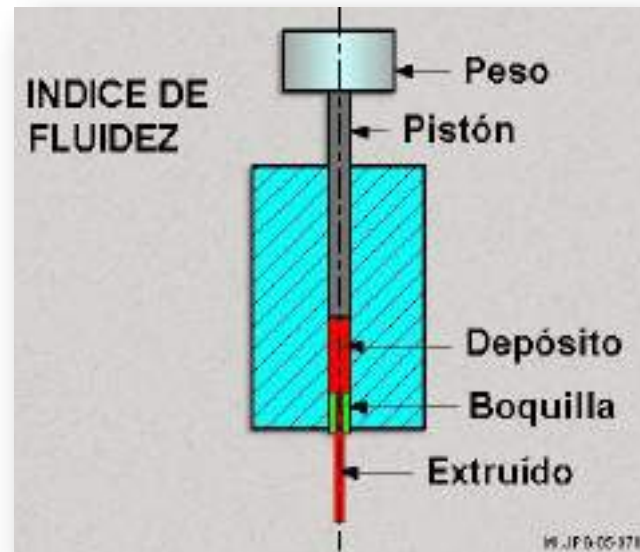
MFI

Normas: [ASTM D 1238](#) o ISO 1133

Unidades: [=] g/10 min

Se debe especificar: La temperatura y el peso usado para la prueba

¡Sólo son comparables los MFI medidos a la misma temperatura y carga!



Pregunta 5

¿El índice de fluidez me dice si el material va a ser más difícil de procesar en mi máquina?



Peso molecular

MW y MWD V.S. MFI

Normas: [ASTM D 1238](#) o ISO 1133

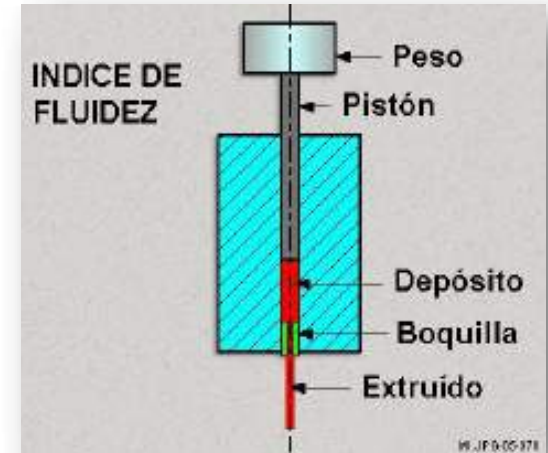
Unidades: [=] g/10 min

Se debe especificar: La temperatura y el peso usado para la prueba

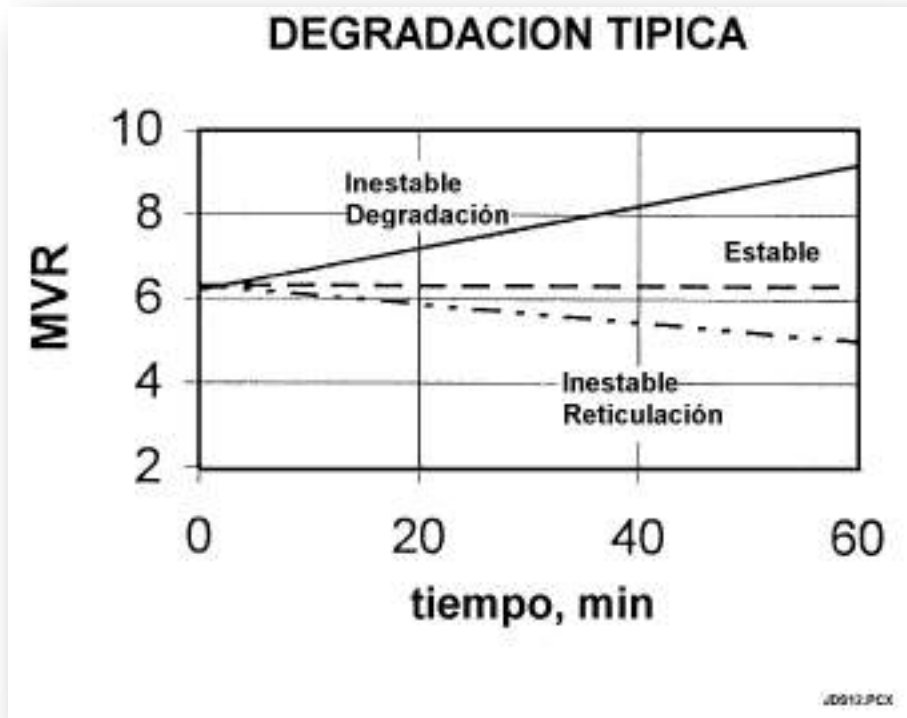
MFI \uparrow \Rightarrow MW \downarrow

MFI \uparrow \Rightarrow Viscosidad \downarrow

$MFI_{21.6kg} / MFI_{2.16kg} \downarrow \Rightarrow$ MWD más estrecha



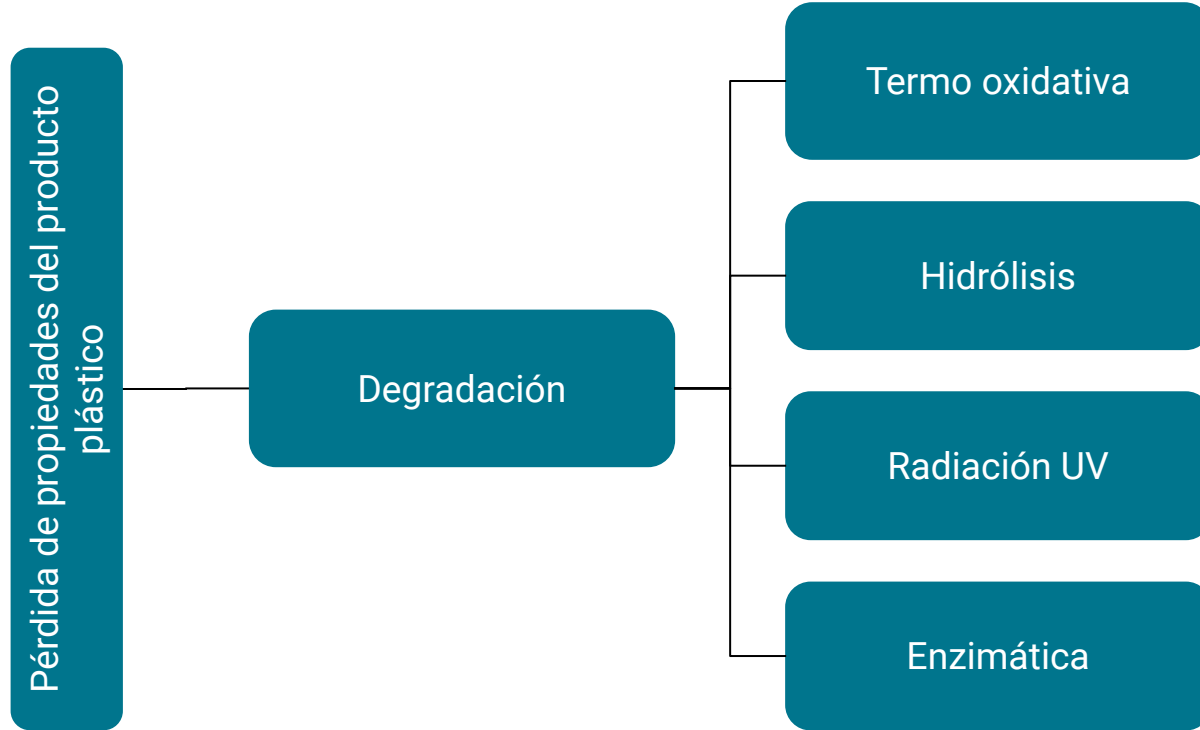
MFI como indicador de degradación



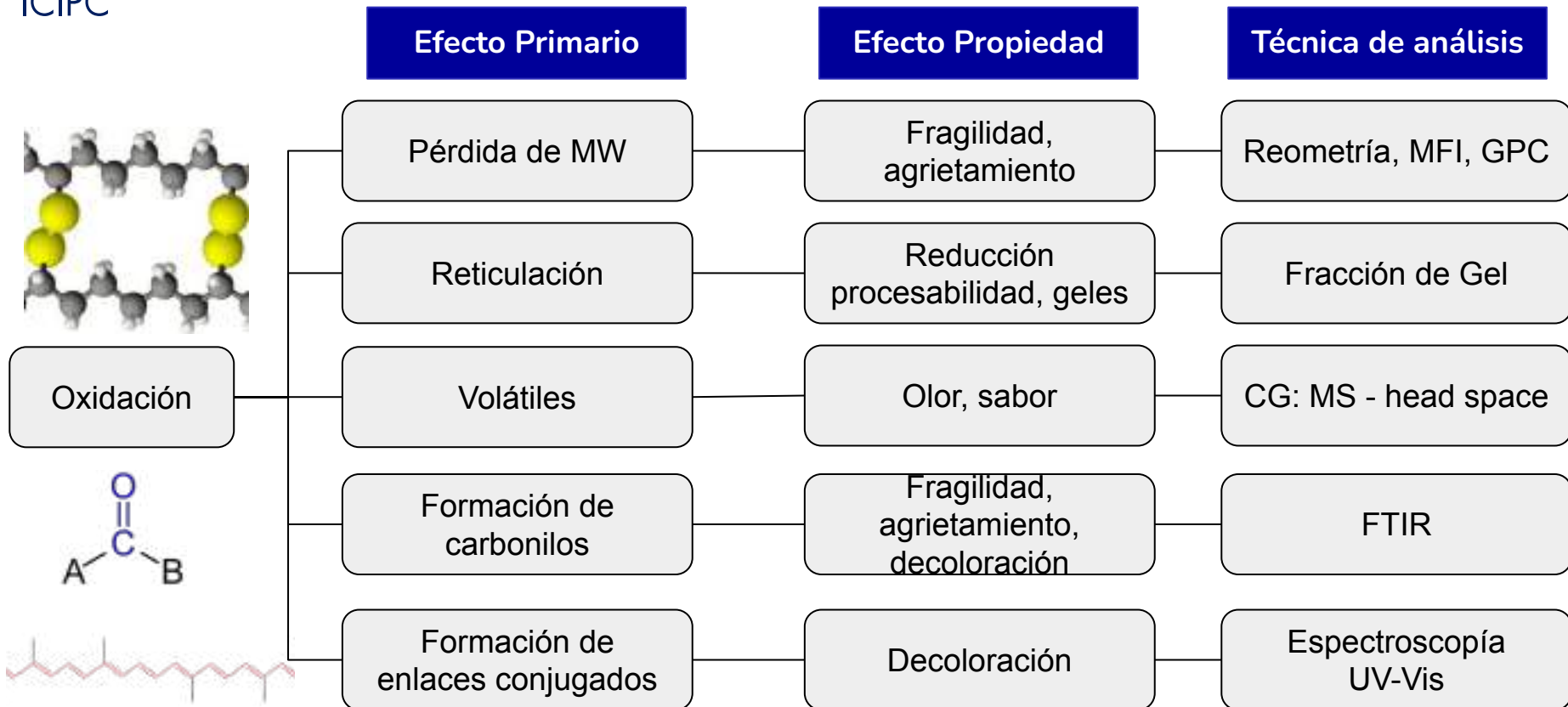
El incremento del MFI puede indicar procesos de ruptura de cadenas

La reducción del MFI puede indicar fenómenos de reticulación

Tipos de degradación

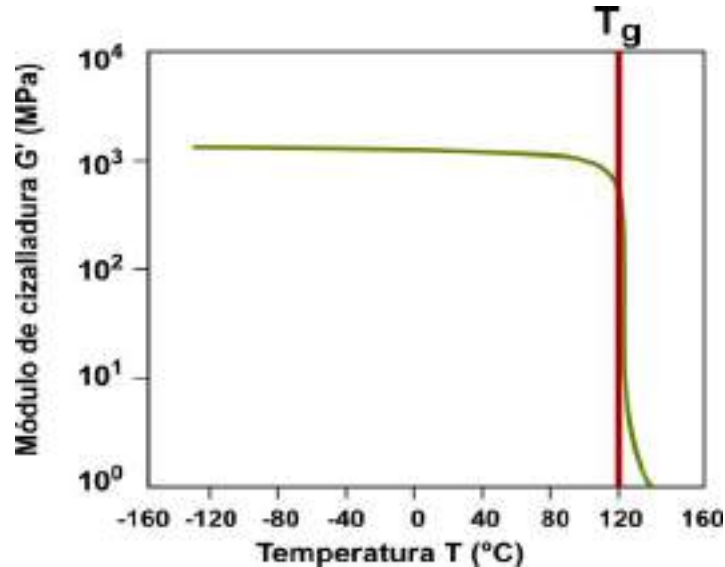


Consecuencias de la degradación

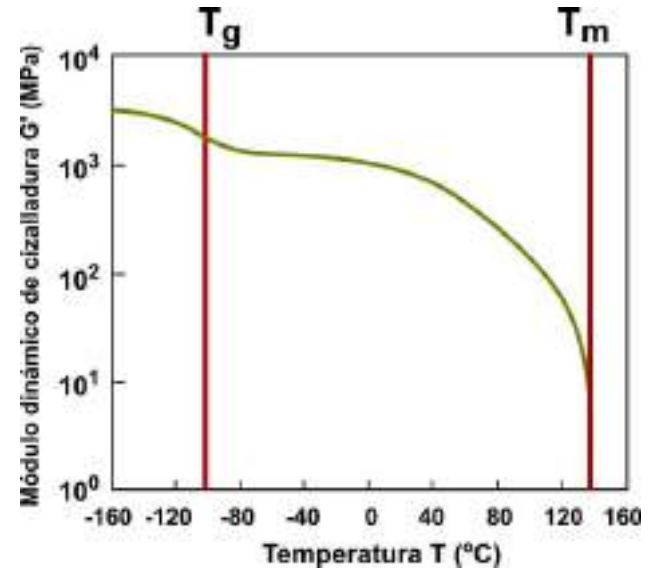


Temperaturas de transición

Polímero amorfo (PS)



Polímero semicristalino (PE)

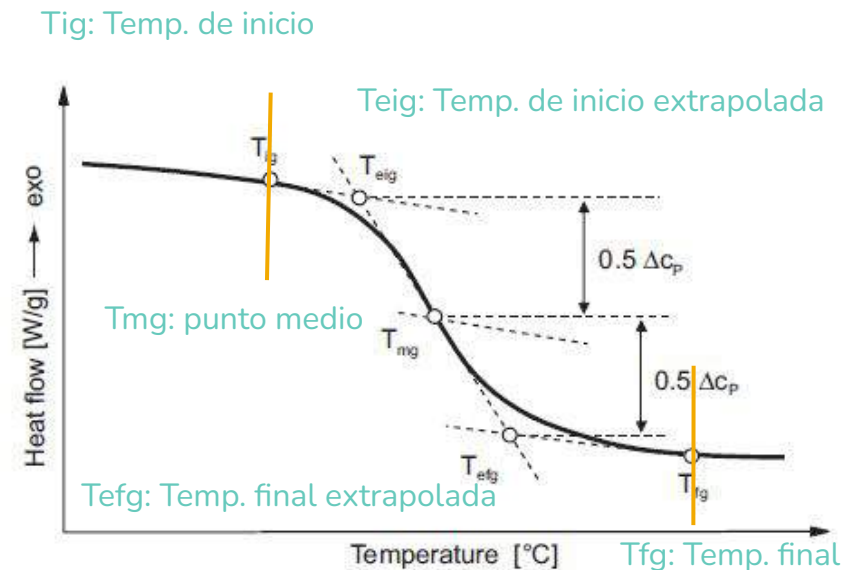


Todos los polímeros tienen T_g , pero sólo los semicristalinos presentan T_m

Temperatura de Transición Vítrea (T_g)

Temperatura de transición vítrea (T_g): es la temperatura a la cual se descongela (ó congela) el movimiento de relajación macromolecular. Conforme el polímero alcanza la T_g , adquiere una naturaleza frágil y rígida. La T_g se observa en el DSC como un salto en la capacidad calorífica ó en el flujo de calor. La T_g se mide en calentamiento.

- $T_g = f$ (MWD, orientación, reticulación, esf. internos, velocidad calentamiento)

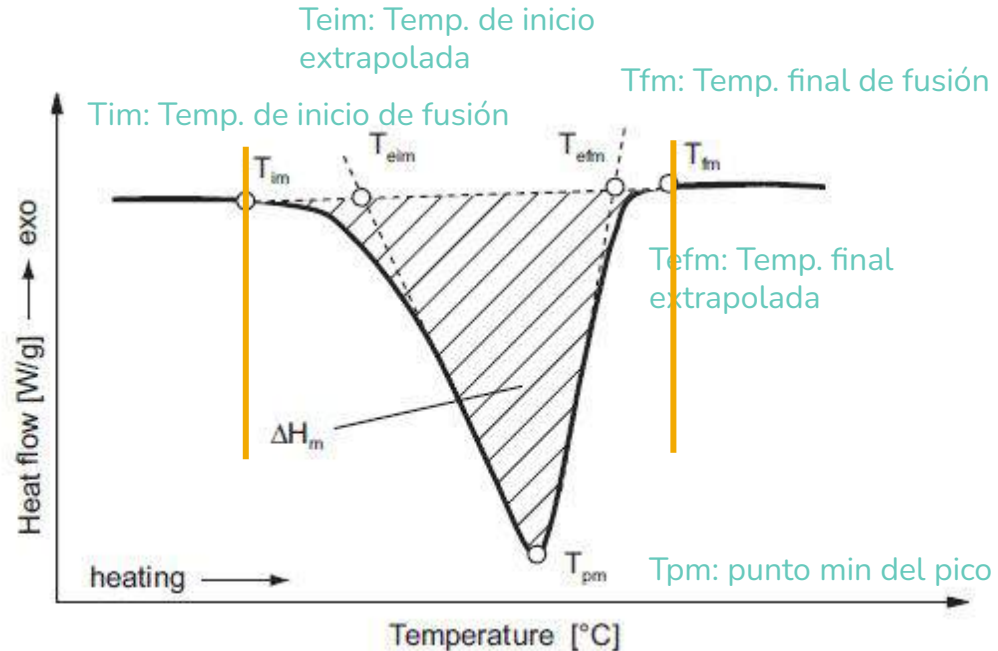


Temperatura de Fusión (T_m o T_f)

Temperatura de fusión (T_m o T_f): es la temperatura a la cual se destruye el ordenamiento cristalino, se funden los cristales, la T_m se observa en el DSC como un pico endotérmico. La T_m se mide en calentamiento.

El punto de fusión (T_m) depende de:

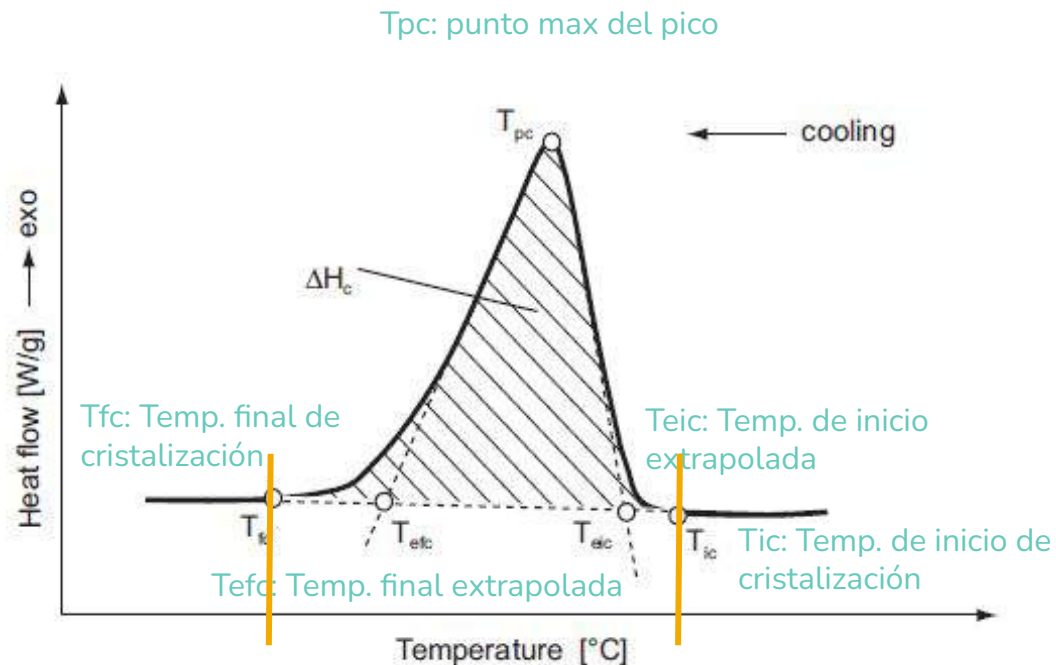
- Tamaño de cristales,
- Forma de los cristales y
- Grado de cristalización.



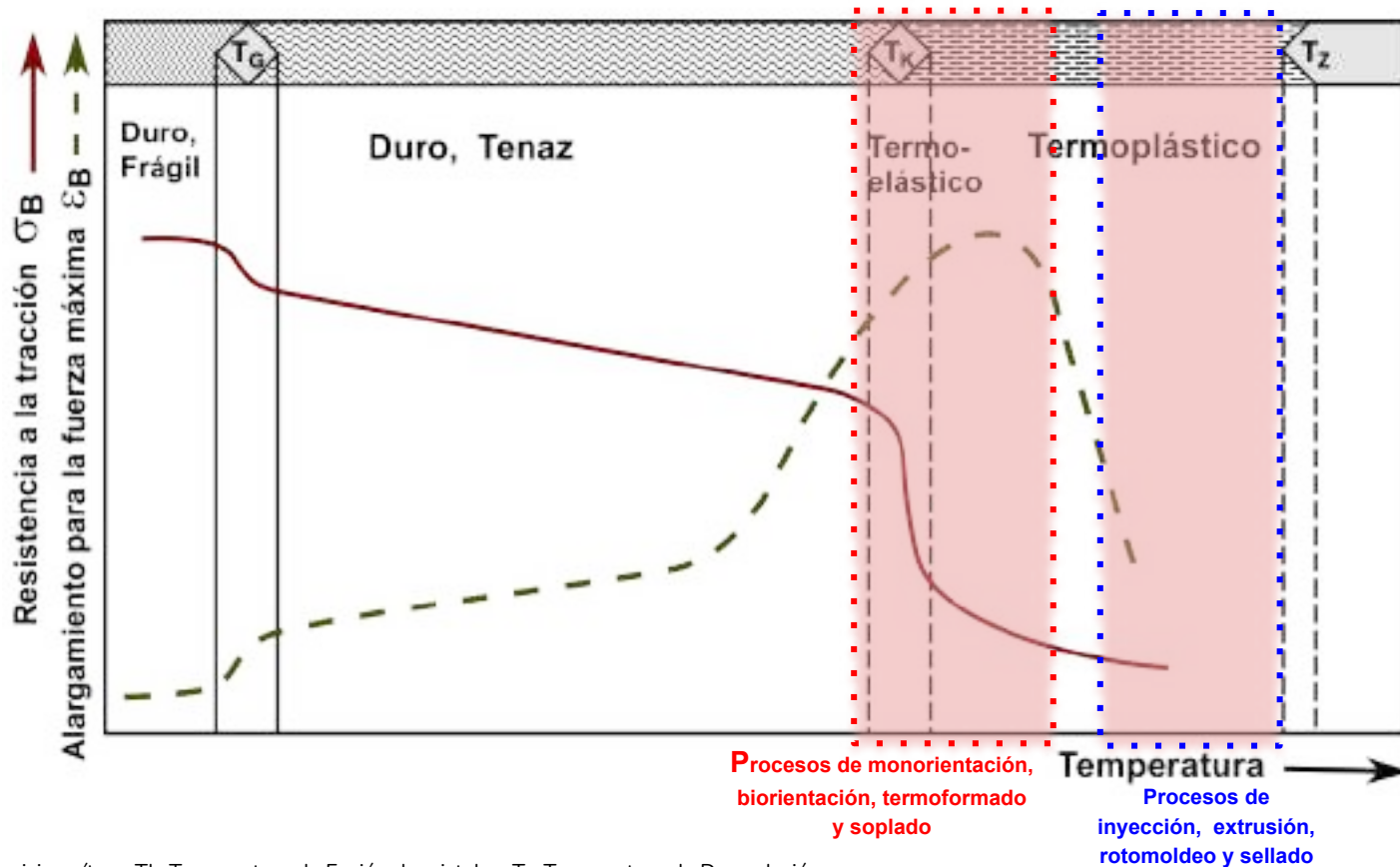
Temperatura de Cristalización (T_c)

Temperatura de cristalización (T_k o T_c): es la temperatura en la cual ocurre el ordenamiento macromolecular para formar cristales. La T_c se mide en enfriamiento.

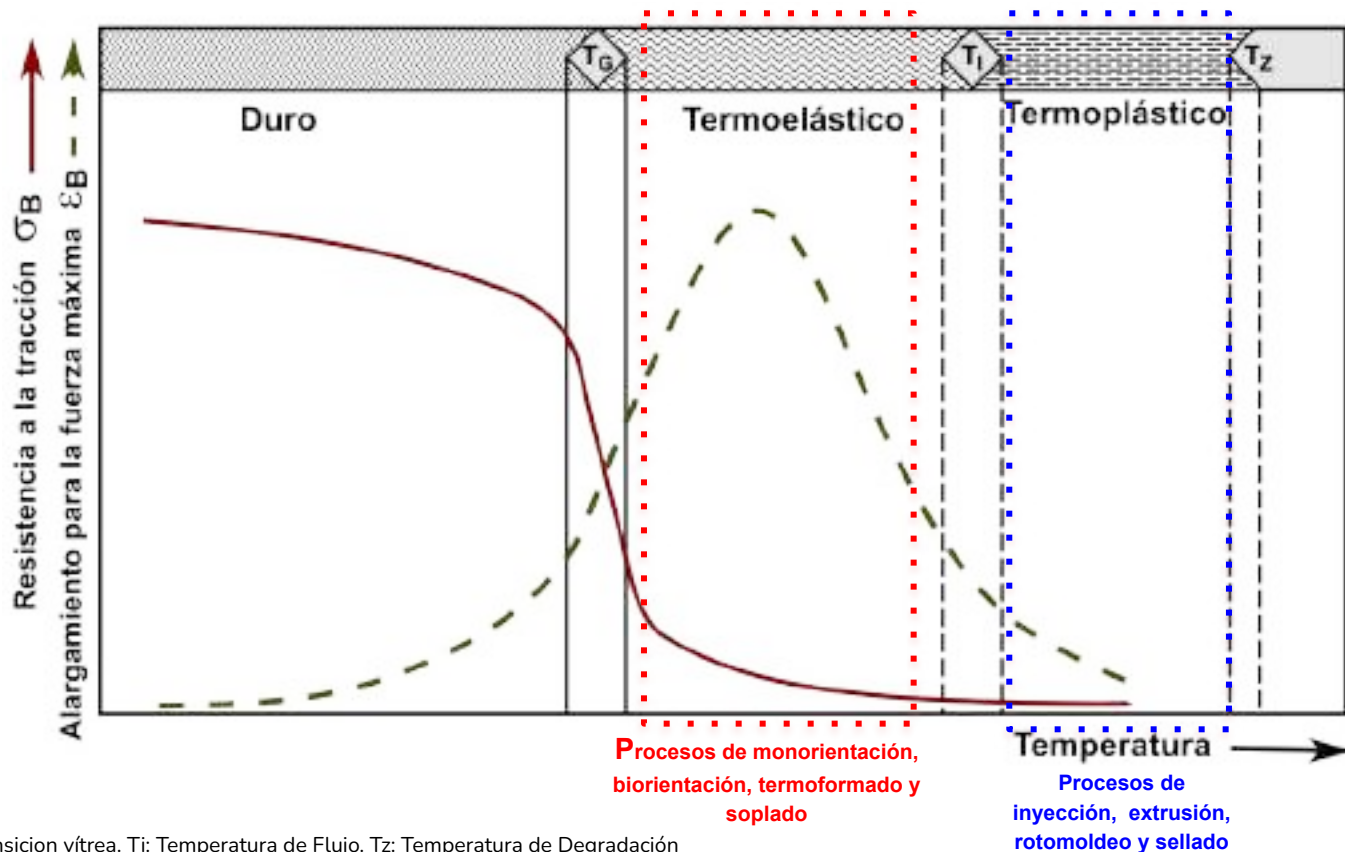
- $T_g < T_k < T_m$



Estados físicos de un polímero semicristalino



Estados físicos de un polímero amorfo



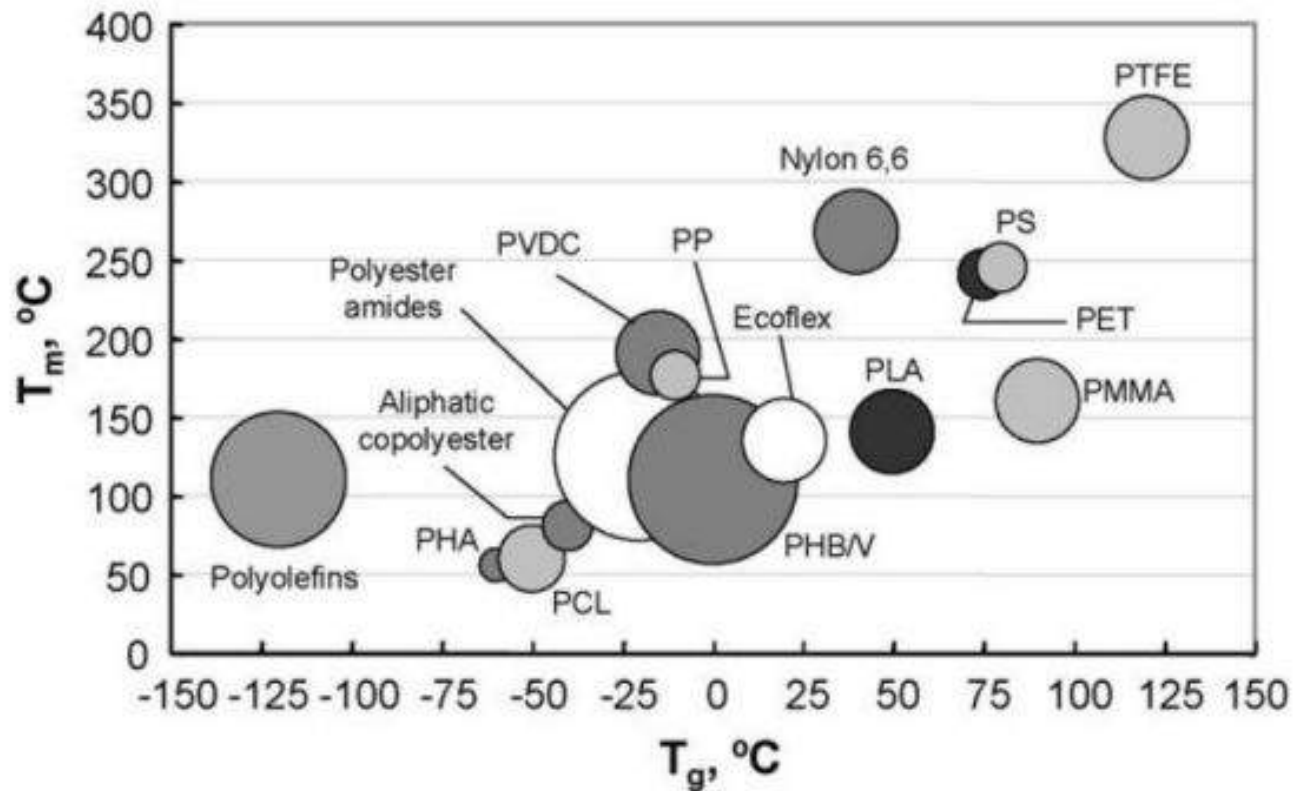


Temperatura de procesamiento (T_p)

Es una definición tecnológica!

- Temperatura a la cual es posible obtener que el material fluya lo suficiente que permita su procesamiento en las máquinas normales de producción.
- Para los amorfos: $T_p \approx T_g + 100^\circ\text{C}$
- Para los semicristalinos: $T_p \approx T_m + 70^\circ\text{C}$

Temperaturas de fusión y transición vítrea para varios polímeros





ALGUNOS ELEMENTOS INTRODUCTORIOS PARA EL RECICLAJE DE POLÍMEROS

Lo que conocemos del reciclaje

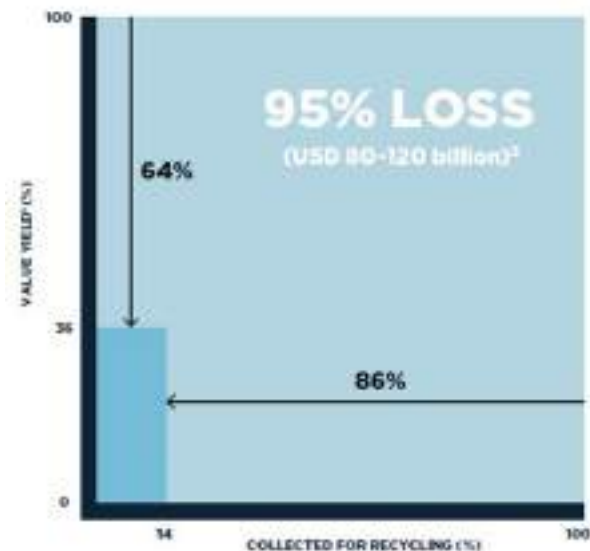
REALIDAD ACTUAL:

Bajas tasas de recolección

Bajas tasas de reciclaje

Poca o ninguna separación

Productos cuyo valor es menor al del material original





Lo que conocemos del reciclaje

REALIDAD ACTUAL:



Plásticos: Pasta, Poste,
Policolor, Tasa, etc.
Picado, granulado,
peletizado

Recicador

Industrial



Especificaciones, Aplicaciones
Polimeros (PE, PP, PS, PET, etc)
Trazabilidad
Certificados de Calidad
Propiedades
Inocuidad
Extrusión, Inyección, Termoformado

Los tres grandes sectores que preocupan por su impacto ambiental



Envases y empaques



Aparatos eléctricos y electrónicos



Textiles

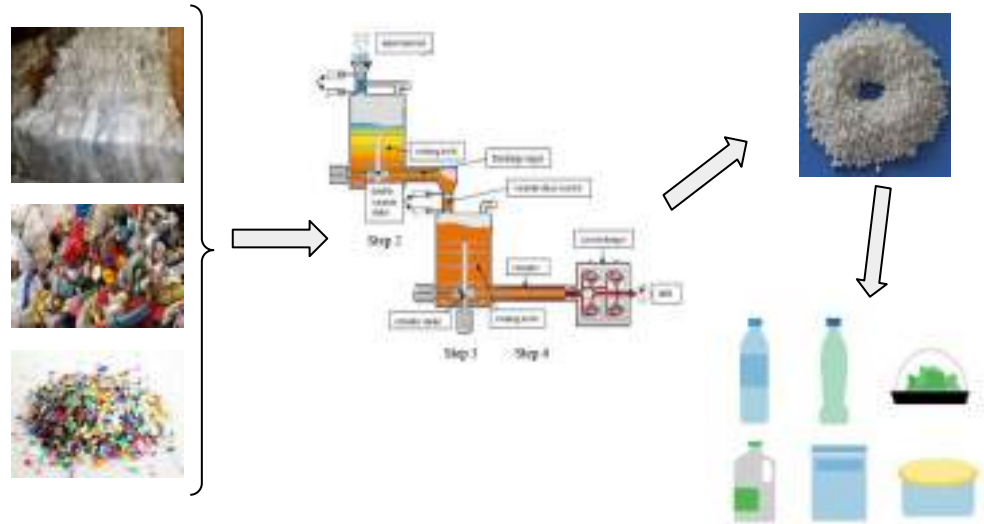


Los tres grandes sectores que preocupan por su impacto ambiental - Principales retos



La pérdida de valor de los empaques es de 80-120 billones de USD/año. Sólo se recicla el 14%

- 40% del consumo de plásticos mundial son empaques y envases.
- El 60% son empaques para alimentos
- Se requieren Cartas de No Objeción y Conceptos Científicos para el uso de reciclados.
- Alta cantidad de empaques flexibles

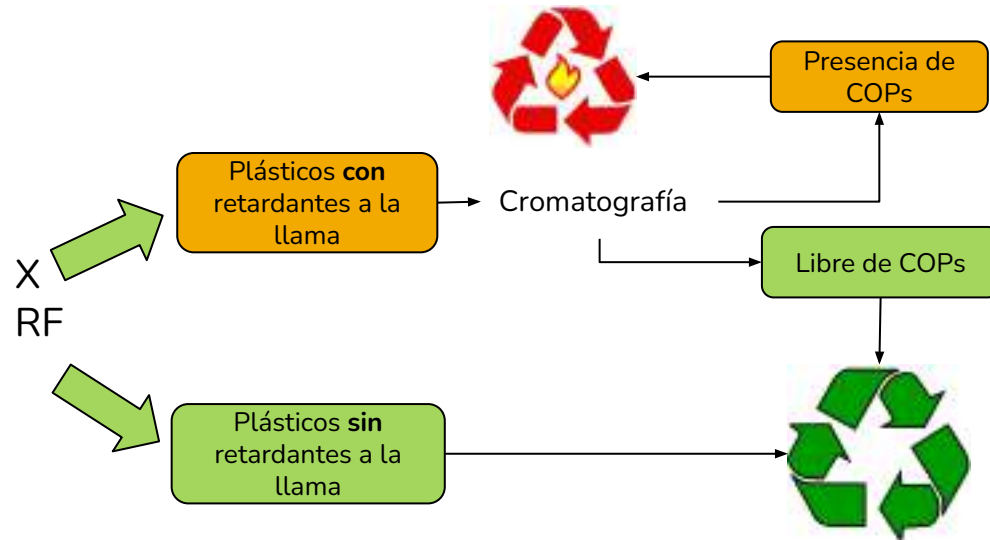


Los tres grandes sectores que preocupan por su impacto ambiental - Principales retos



Sólo se recoge y se recicla aproximadamente el 20% de los RAEE's en el mundo.

- Muchos materiales diferentes.
- Muchas piezas tienen compuestos orgánicos persistentes (COPs) como retardantes a la llama polibromados (BFR's)
- Mezclas con metales y papel

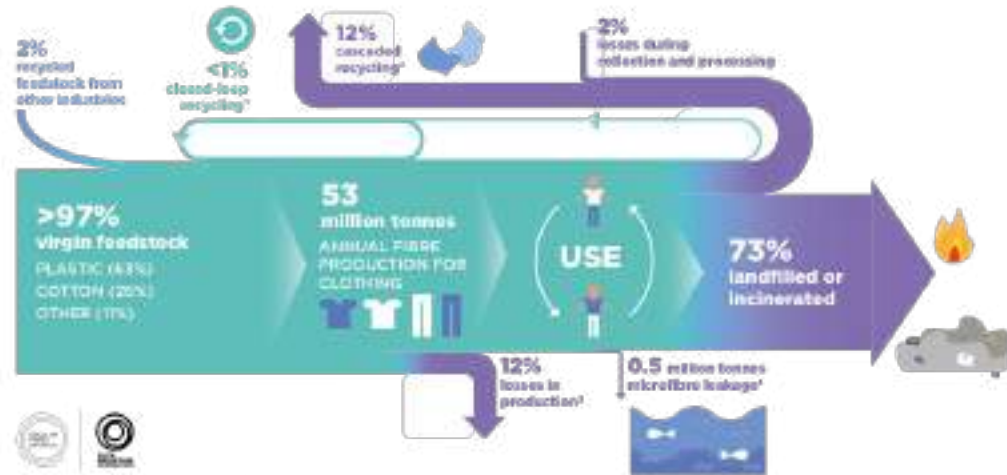


Los tres grandes sectores que preocupan por su impacto ambiental - Principales retos

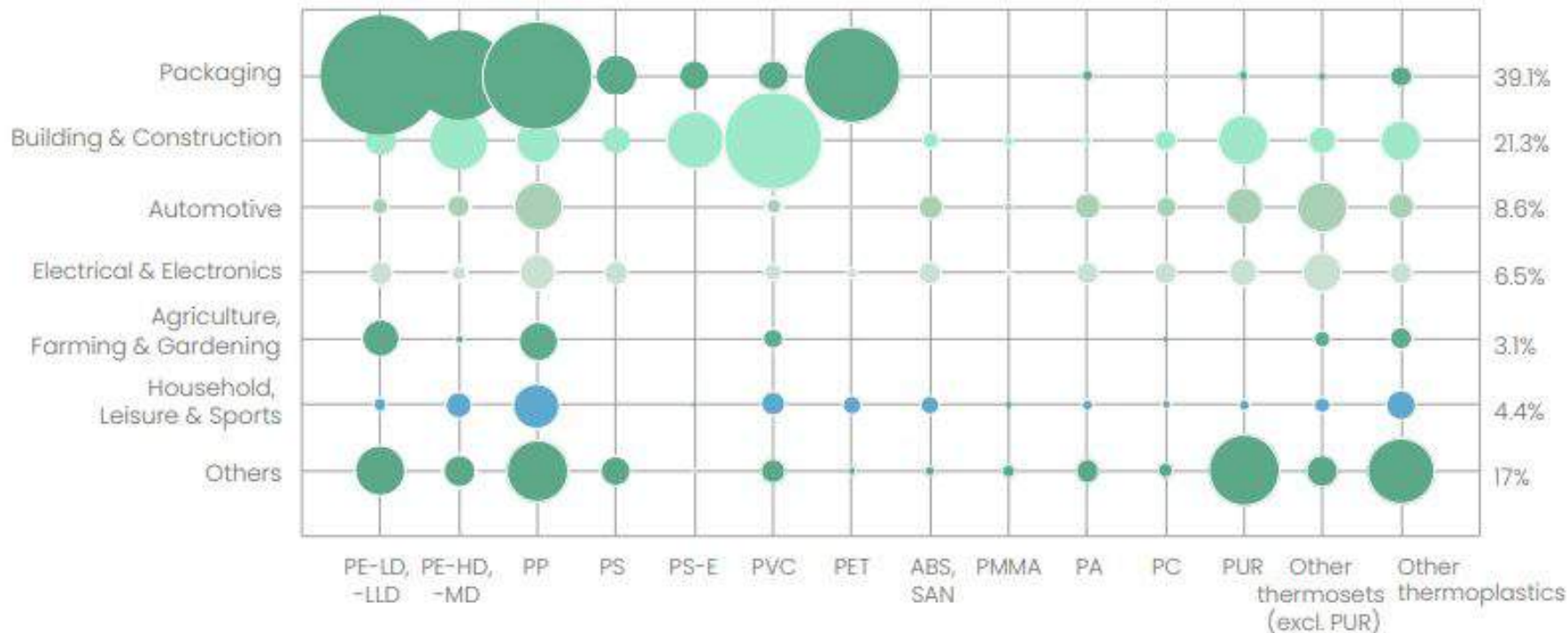
- Fibras y telas de composición compleja
- Mercado de “exclusividad”
- Desconocimiento de los procesos de reciclaje de plásticos.



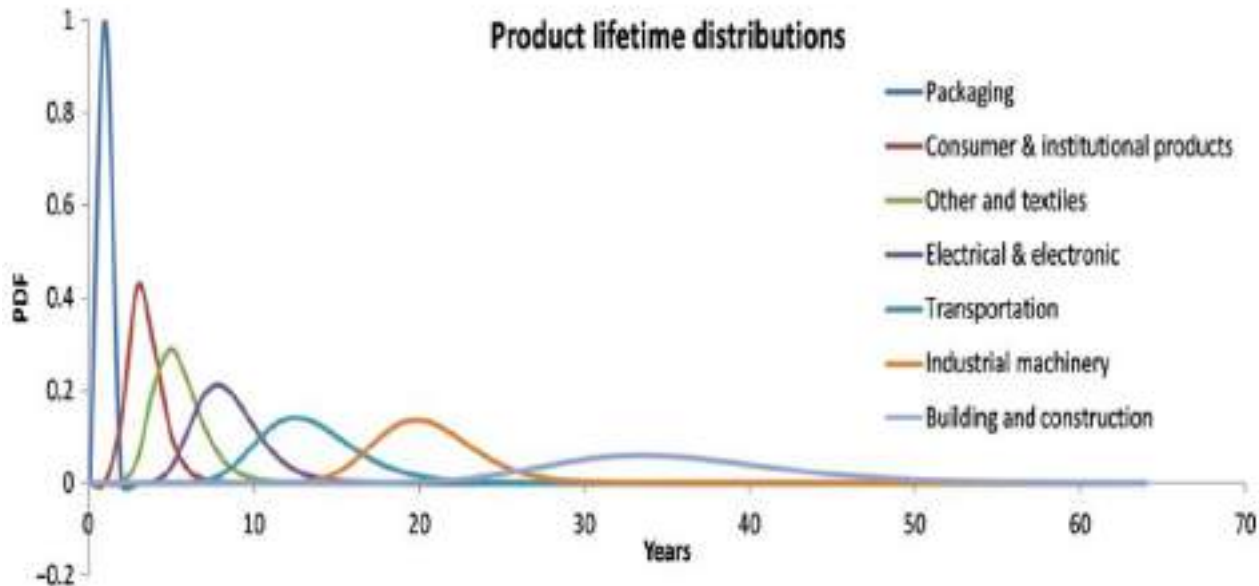
63% son plásticos y el 73% termina en relleno sanitario o incinerado. A mayor producto interno bruto, se compra más y se usa menos.



Producción y consumo de plásticos en Europa



Distribución del tiempo de vida de los productos plásticos



Los materiales asociados a empaques presentan el **menor tiempo de vida** en el mercado, siendo los que generan **mayor cantidad de residuos**.

Prioridades en la gestión de residuos sólidos



Upcycling - Downcycling

¿Qué estamos haciendo?

Upcycling: Reciclaje de materiales en productos de igual o mayor **valor**

Downcycling: Reciclaje de materiales en productos de menor **valor**

\$\$



\$\$\$\$\$



\$\$



\$

Upgrading - Downgrading

¿Qué estamos haciendo?

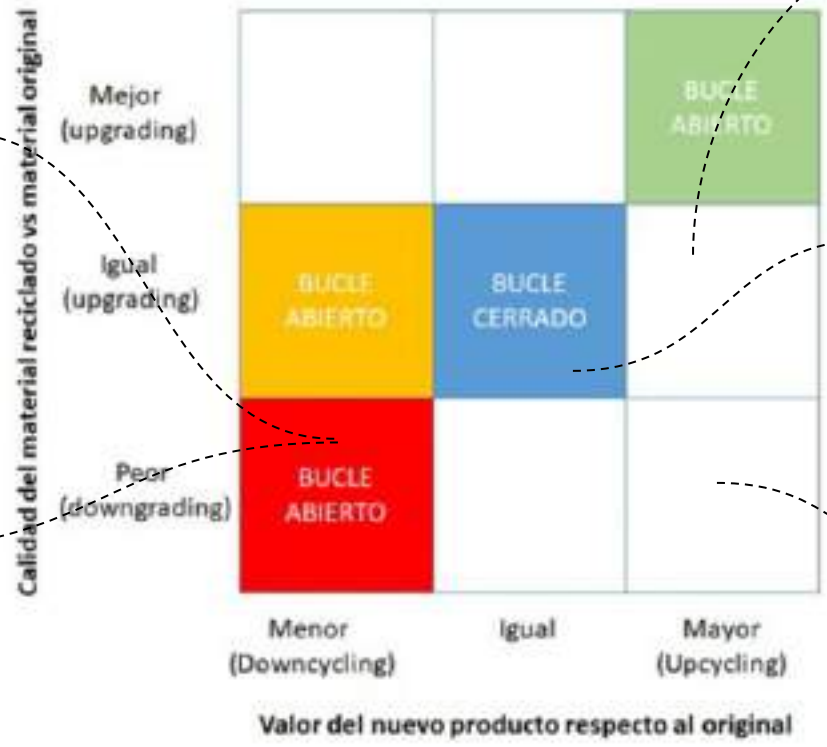
Upgrading: Reciclaje de materiales con iguales o mejores **propiedades**

Downgrading: Reciclaje de materiales con menores **propiedades**





Objetivo: Upcycling y Upgrading en ciclo cerrado





Diferencia entre plástico reciclado y materia prima reciclada



Plástico reciclado



Materia prima reciclada



Los altos requerimientos de los plásticos como materia prima

Implicaciones:

Mayores requerimientos de separación

Caracterización

Estabilidad lote a lote

Cumplimiento de ficha técnica





Fichas técnicas

FICHA TÉCNICA PRELIMINAR – GAIA PS-C 7 - Cristal

MATERIAL: GAIA – PS-C 7 - Cristal

Descripción General: Compuesto polimérico proveniente de RAGEA, seleccionado de fuentes controladas principalmente nuevas con contenido mayoritario de Poliestireno cristal- PS-C, y libre de retardantes de llama bromados de color transparente.

Por sus características de fluidez es adecuado para los procesos de inyección para ser usado puro o en combinación con PS o HIPS virgen.

Usos:

- Piezas inyectadas rígidas de larga vida útil
- Posibilidad de modificar sus propiedades y ajustarlas dependiendo de la aplicación

Beneficios

- Reducción del impacto ambiental

Propiedades:

Nota: Los valores presentados son típicos y no pretenden que sean usados para especificar productos.

Propiedad	Norma	Unidades	Valor
Modulo Secante	ASTM D638	MPa	2911
Resistencia a la Tensión	ASTM D638	MPa	46.1
Elongación en la fractura	ASTM D638	%	2.12
Índice de Fluidez – MFI	ASTM D1231	g/10min 230°C/2.16 Kg	6.97
Resistencia al Impacto	ASTM D256	kJ/m ²	15.6
Densidad	ASTM D792	g/cm ³	1.023
Contras en nudo	INSTR	%	>0.8

Para su procesamiento, se recomienda usar temperaturas entre 220°C – 240°C

Debido a la naturaleza de la fuente, no se recomienda su uso para artículos en contacto con alimentos.

FICHA TÉCNICA PRELIMINAR – GAIA PP 18 - Black

MATERIAL: GAIA – PP 18 - Black

Descripción General: Compuesto polimérico con contenido mayoritario de Polipropileno – PP proveniente de RAGEA, seleccionado de fuentes controladas principalmente cajas de fibras, el material se encuentra libre de retardantes de llama bromados de color Negro.

Por sus características de fluidez es adecuado para los procesos de inyección para ser usado puro o en combinación con PP virgen o sus copolímeros.

Usos:

- Piezas inyectadas rígidas de larga vida útil
- Posibilidad de modificar sus propiedades y ajustarlas dependiendo de la aplicación

Beneficios

- Reducción del impacto ambiental

Propiedades:

Nota: Los valores presentados son típicos y no pretenden que sean usados para especificar productos.

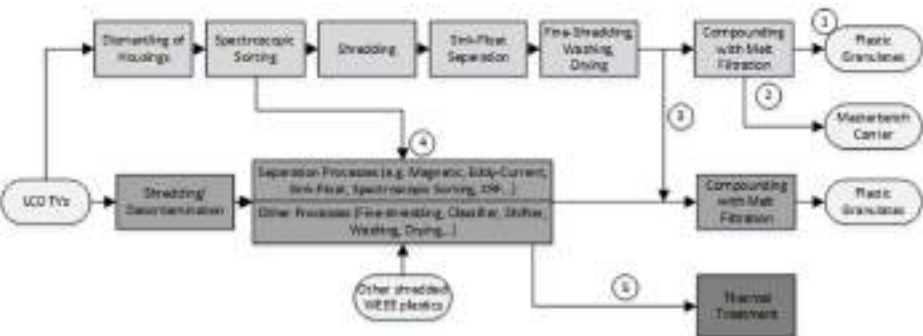
Propiedad	Norma	Unidades	Valor
Modulo Secante	ASTM D638	MPa	1026.6
Resistencia a la Tensión	ASTM D638	MPa	19.20
Elongación en la fractura	ASTM D638	%	169.2
Índice de Fluidez – MFI	ASTM D1238	g/10min 300°C/2.16 Kg	19
Resistencia al Impacto	ASTM D256	kJ/m ²	122.8
Densidad	ASTM D792	g/cm ³	0.891
Contras en nudo	instra	%	<0.5

Para su procesamiento, se recomienda usar temperaturas entre 220°C – 240°C

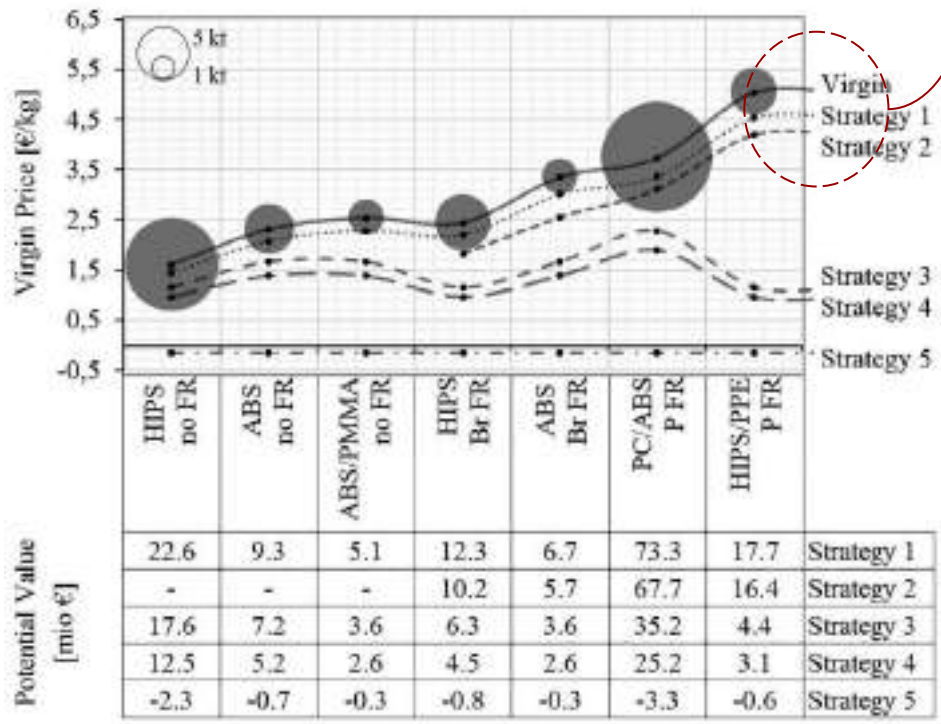
Debido a la naturaleza de la fuente, no se recomienda su uso para artículos en contacto con alimentos.

El valor de los plásticos como materia prima

Estrategias de reciclaje con productos de valor cercano a materias primas vírgenes



Recycling strategies:	Recycling category
1 Dismantling based recycling of plastics for direct reapplication	Primary
2 Dismantling based recycling of plastics as masterbatch carriers	Primary/ Secondary
3 Blending with post-shredder plastic recyclates	Secondary
4 Refeeding in post-shredder recycling process	Secondary
5 Thermal treatment	Tertiary



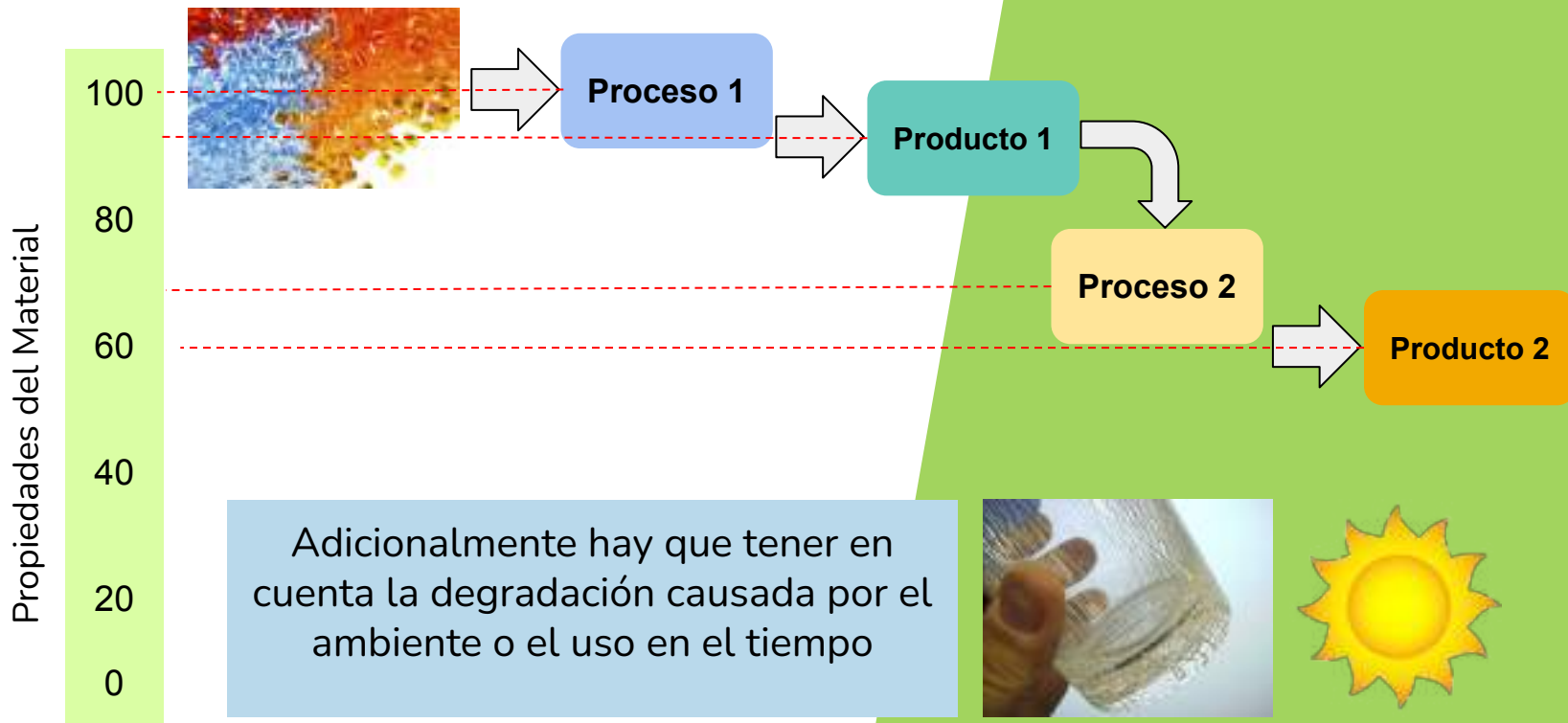
[10] Wagner, F., Peeters, J. R., De Keyzer, J., Janssens, K., Dufloy, J. R., & Dewulf, W. (2019). Towards a more circular economy for WEEE plastics – Part A: Development of innovative recycling strategies. Waste Management, 100, 269–277. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.026>



El problema de la pérdida de propiedades

Upgrading - Downgrading

Por qué se genera?

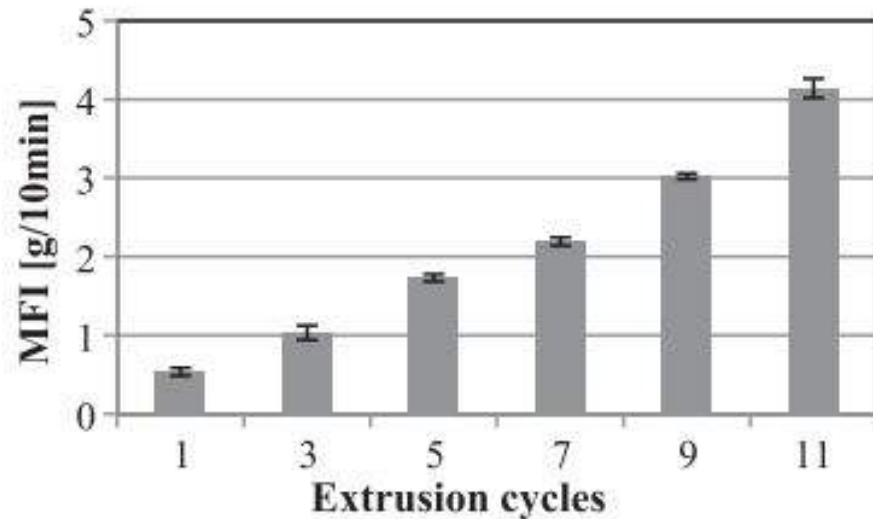
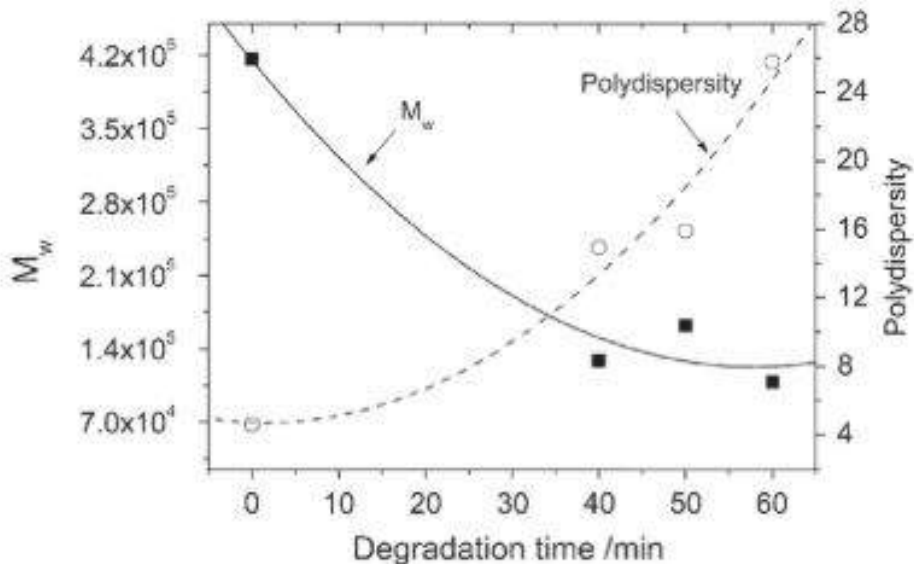


Cambios en el peso molecular en el PP

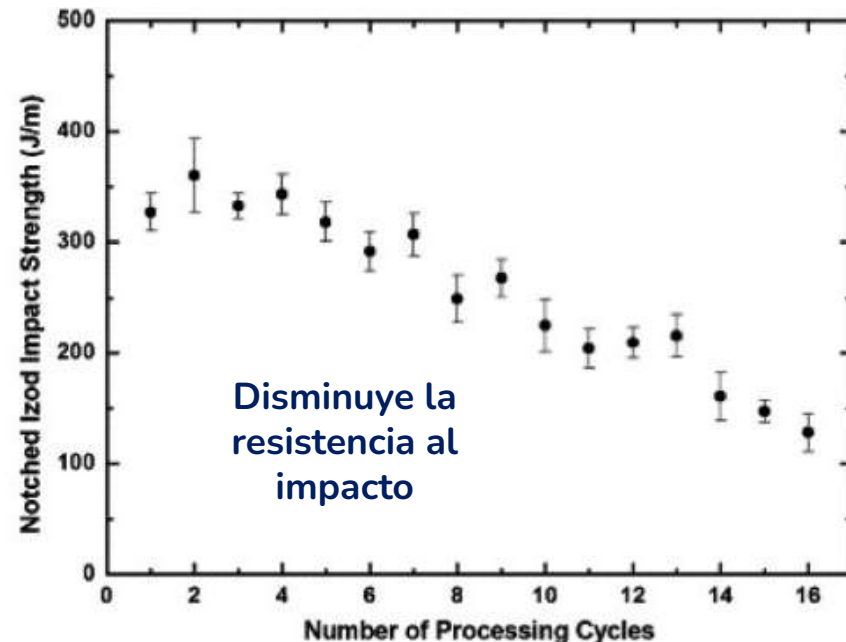
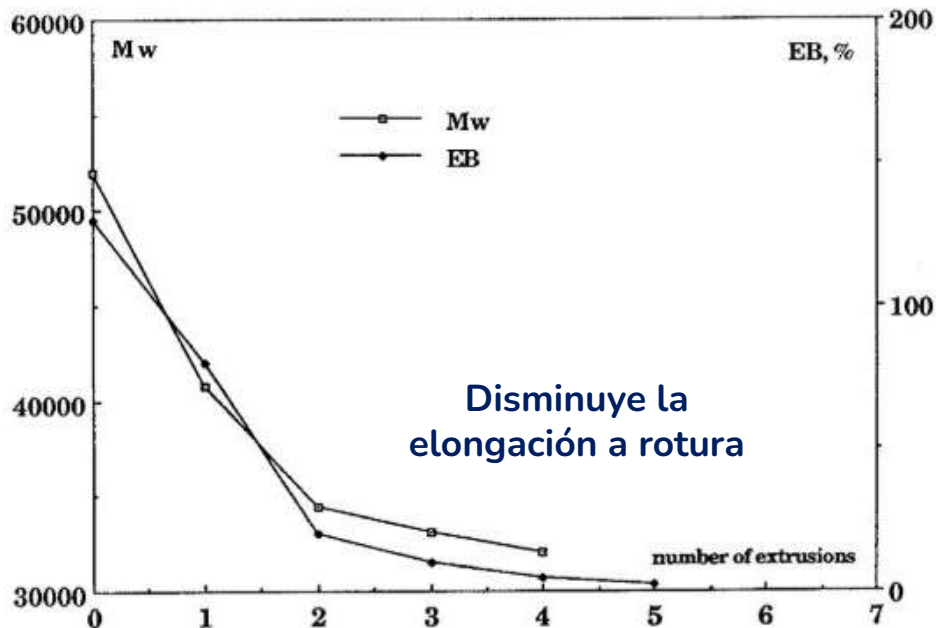
Disminuye el peso molecular

Aumenta la distribución de peso molecular

Aumenta el MFI



Cambios en el peso molecular, elongación a rotura y resistencia al impacto en PET





Algunas bases de datos y documentación relevante

[Directrices Técnicas para el manejo de materiales plásticos recuperados de RAEE's y vehículos desintegrados: Manual que tiene una sección sobre identificación rápida de materiales plásticos.](#)

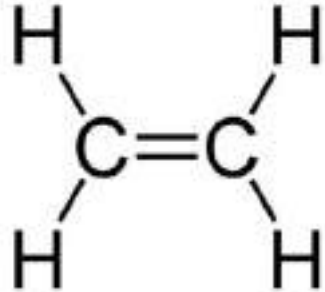
[MatWeb: Base de datos de fichas técnicas de materiales plásticos.](#)

[Campus Plastics: Base de datos on-line con información técnica de polímeros. Especializada en polímeros de ingeniería y altas prestaciones.](#)



PROPIEDADES, USOS Y APLICACIONES DE LOS POLIETILENOS Y SUS COPOLÍMEROS

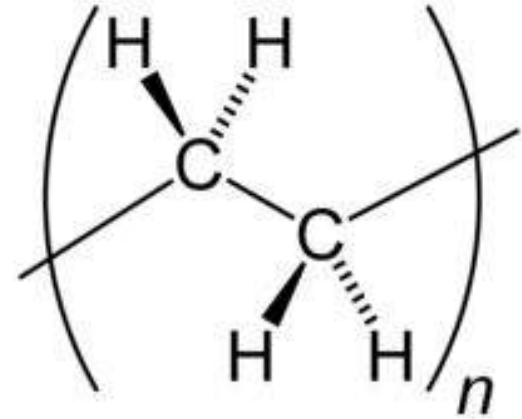
Formación del polietileno (PE)



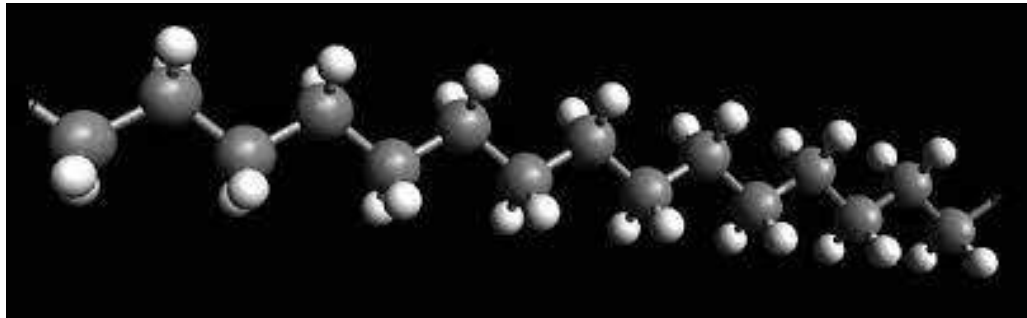
Etileno



Catálisis Ziegler
Natta o por
Metalocenos

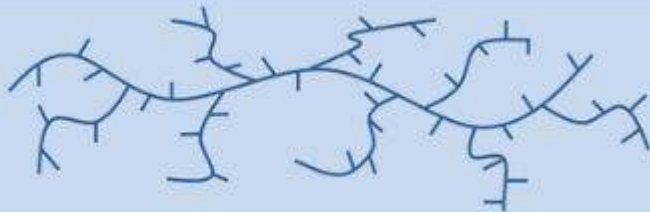


Polietileno



Diferencia estructural del LDPE, LLDPE Y HDPE

LDPE



LDPE: Altamente ramificado
50% de CRISTALINIDAD

LLDPE



LLDPE: Copolímeros buteno, hexeno,
octeno, deceno
60% de CRISTALINIDAD

HDPE



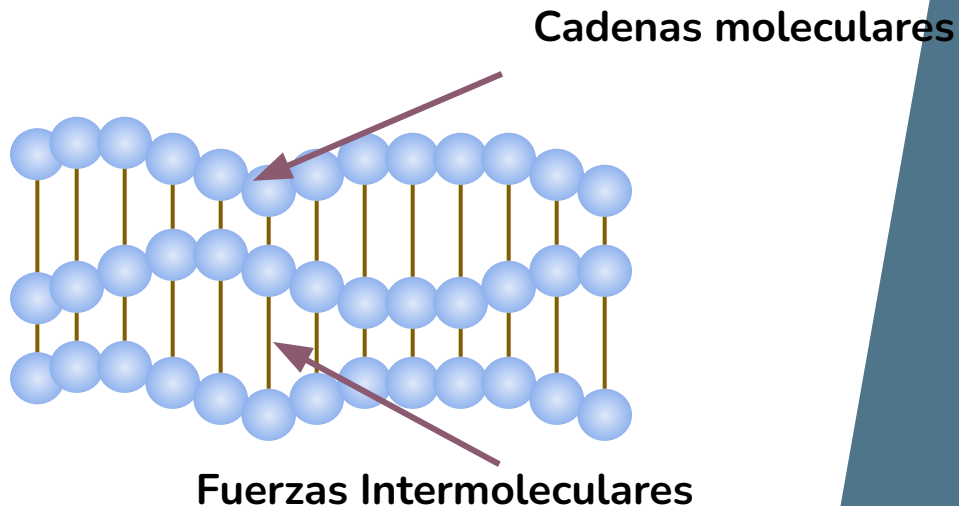
HDPE: 4 a 10 cadenas
cortas por cada 1000 C
80% de CRISTALINIDAD



**Un pequeño concepto
antes de seguir...**

¿Cómo se forman los polímeros?

Fuerzas Intermoleculares



Mantienen “unidas” las macromoléculas a través de atracciones definidas por el potencial químico



Piensa como si las cadenas de polímeros fueran espaguetis, pero a nivel molecular



Sigamos...



Propiedades de los PE

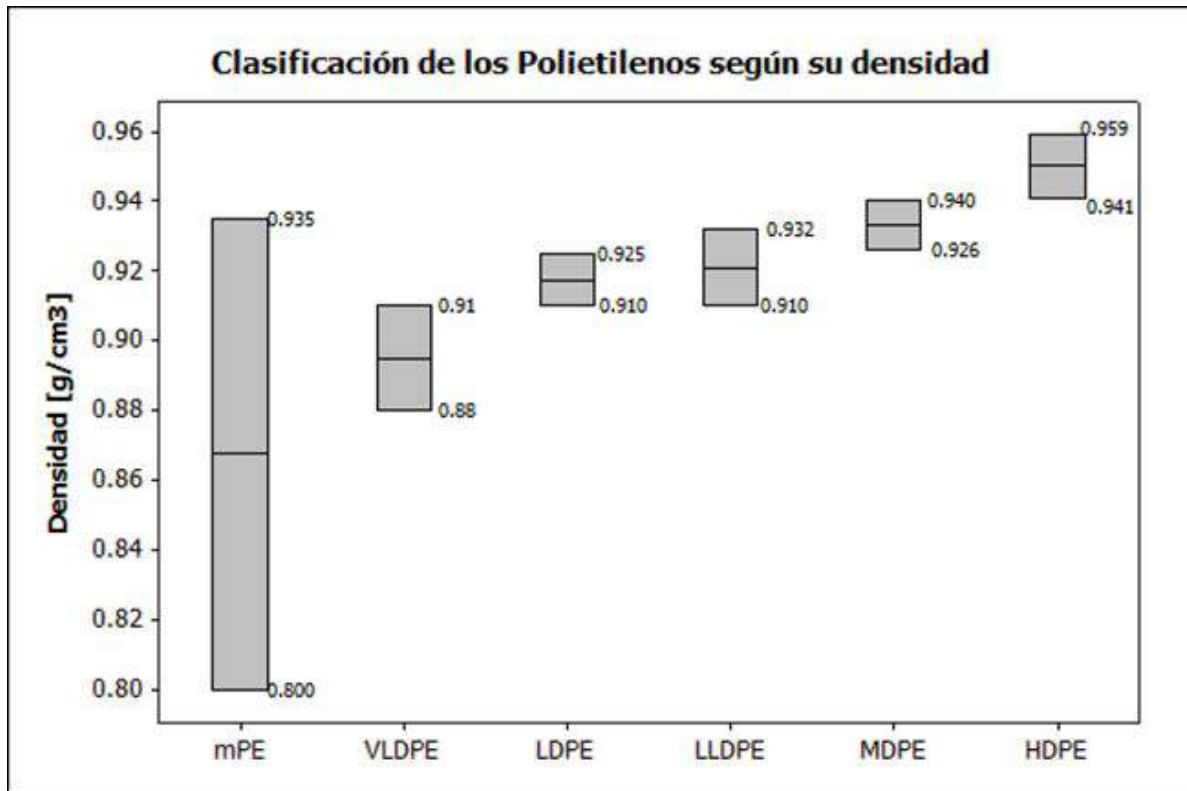
Peso Molecular

Influye en el procesabilidad y está relacionado con el índice de fluidez (MFI)

CLASIFICACIÓN	P.M. g/mol
LDPE	100,000 – 300,000
LLDPE	200,000 – 500,000
HDPE	200,000 – 400,000
HMWHDPE	200,000 – 500,000
UHMWPE	1'500.000 – 6'000.000

Clasificación

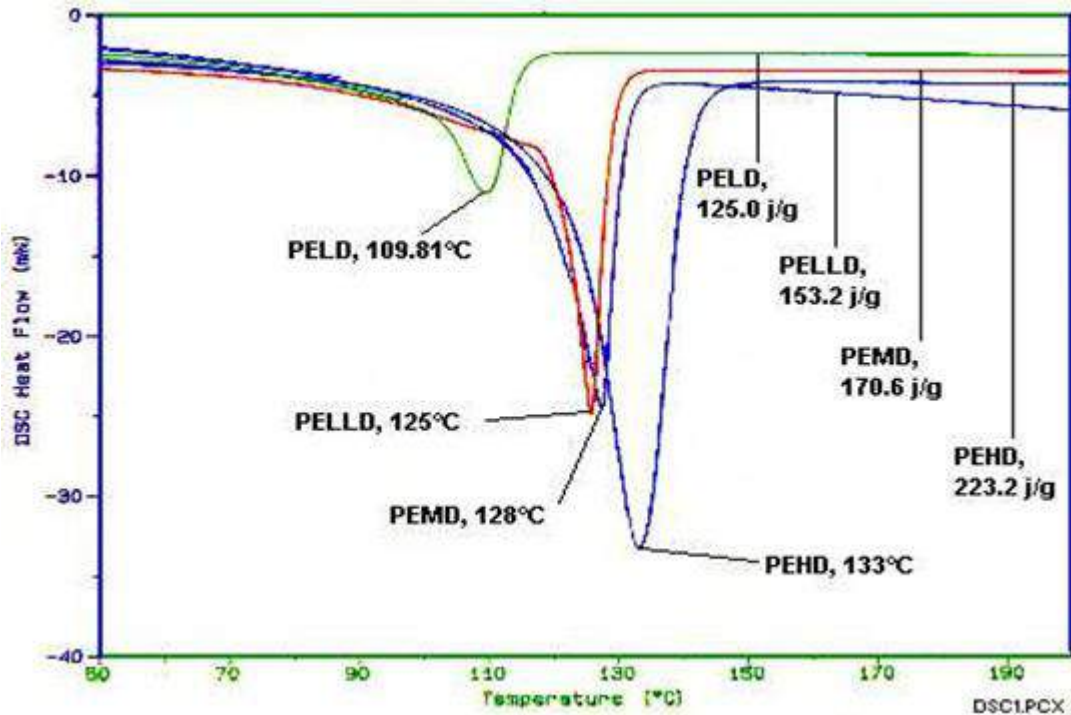
Densidad de los PE



El constante desarrollo tecnológico ha permitido el surgimiento de nuevos grados, haciendo que las fronteras sean más difusas entre ciertos grados



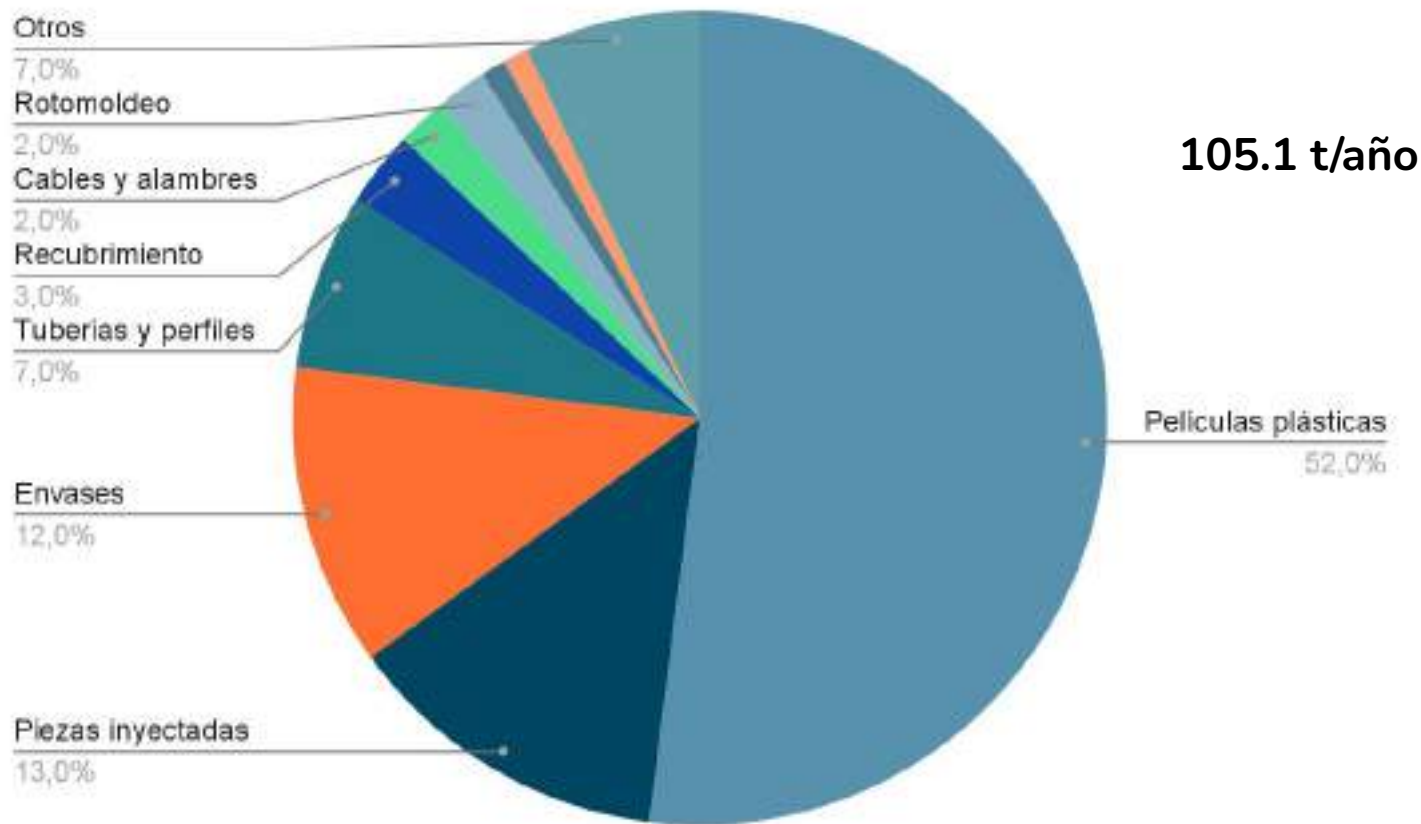
Propiedades de los PE



Rango típico de las propiedades térmicas de los PE

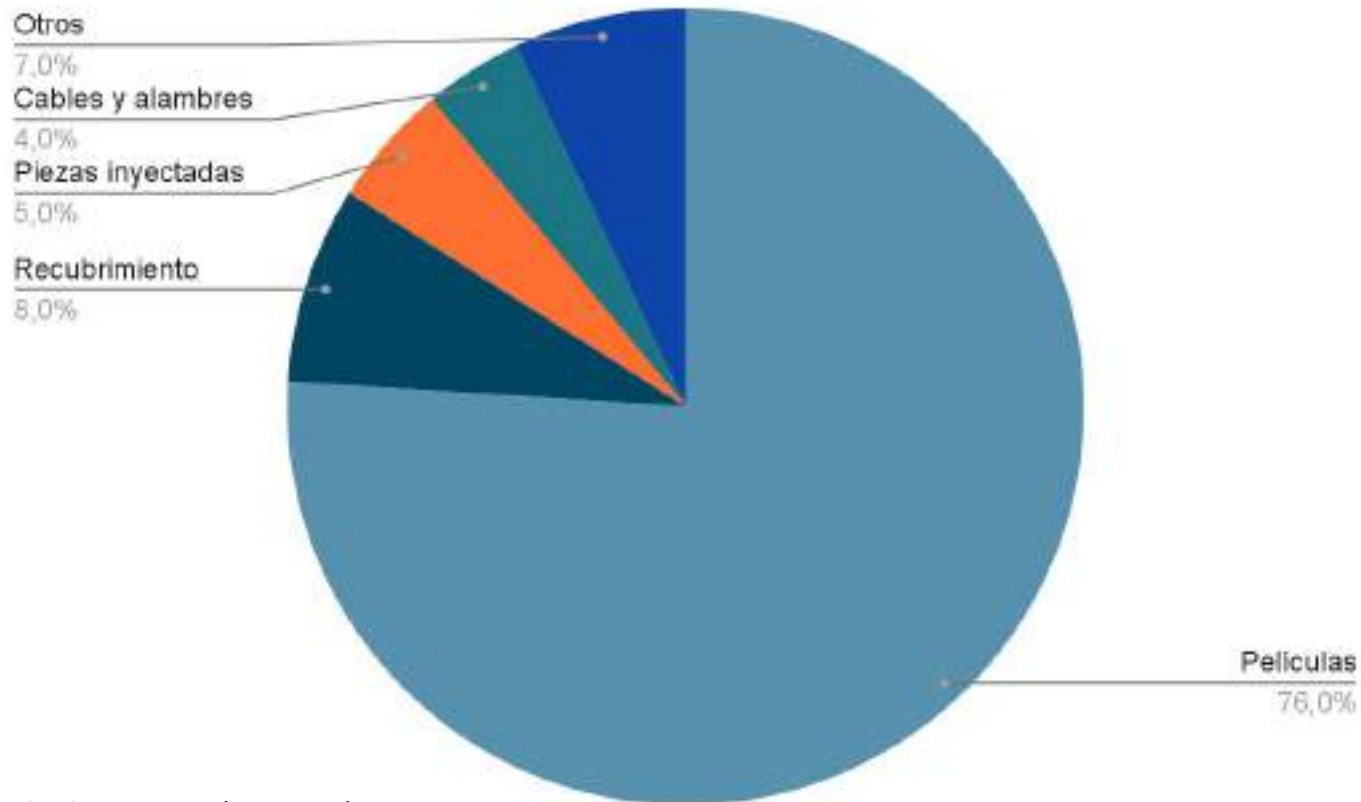
Polymer	Tg °C	Tm °C Peak
LDPE	-120 to -70	105 to 115
LLDPE	-120 to -70	120 to 130
HDPE	-130 to -80	130 to 135

Demanda de PE por procesos de transformación



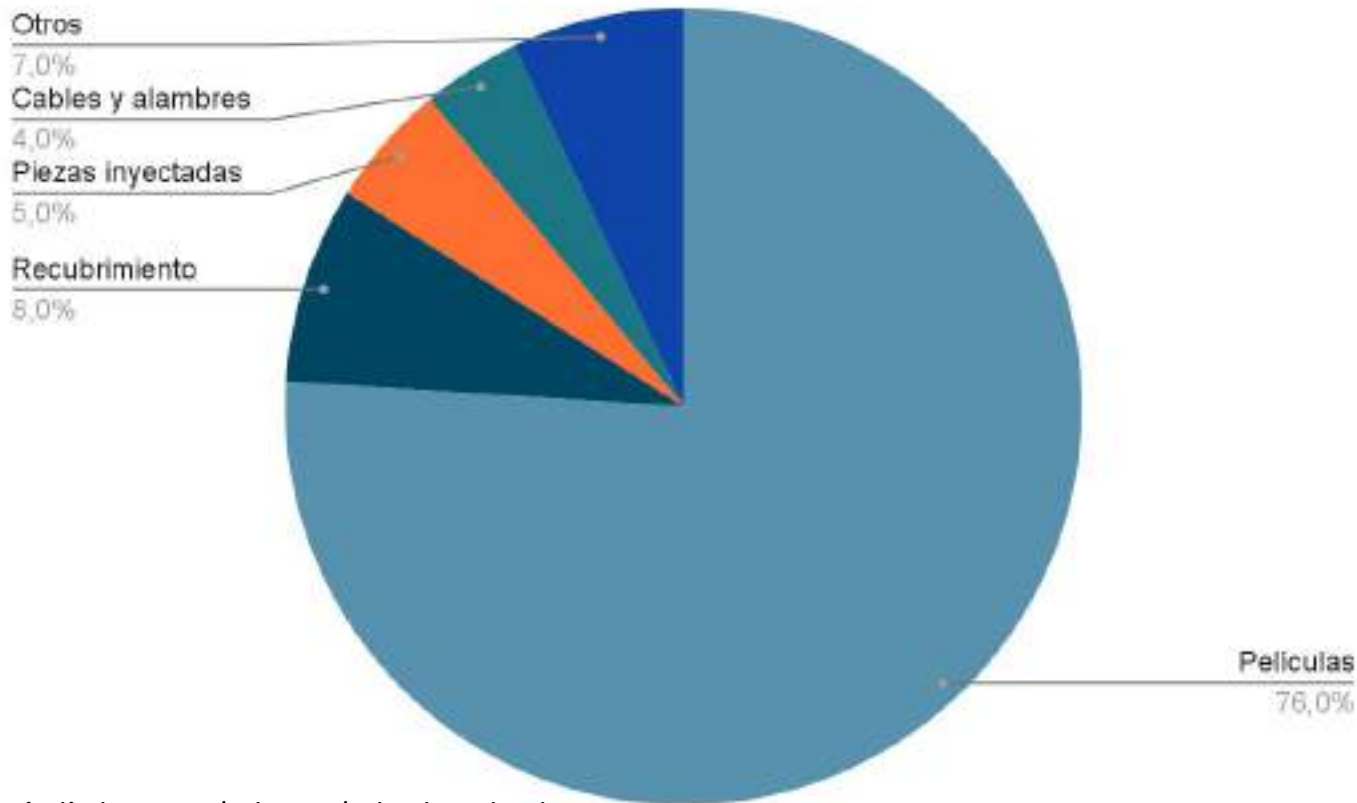


Usos y aplicaciones del LDPE (Low Density Polyethylene)



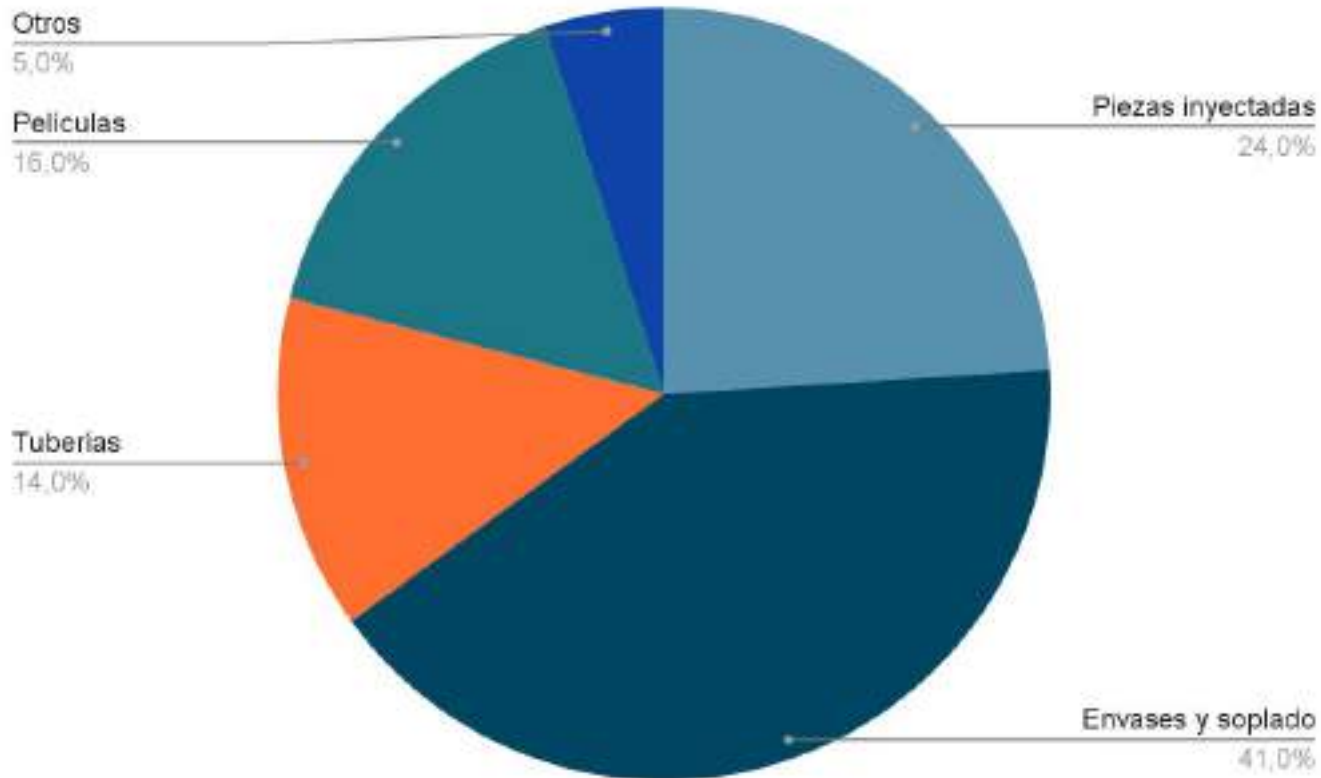


Usos y aplicaciones del LLDPE (Linear Low Density Polyethylene)



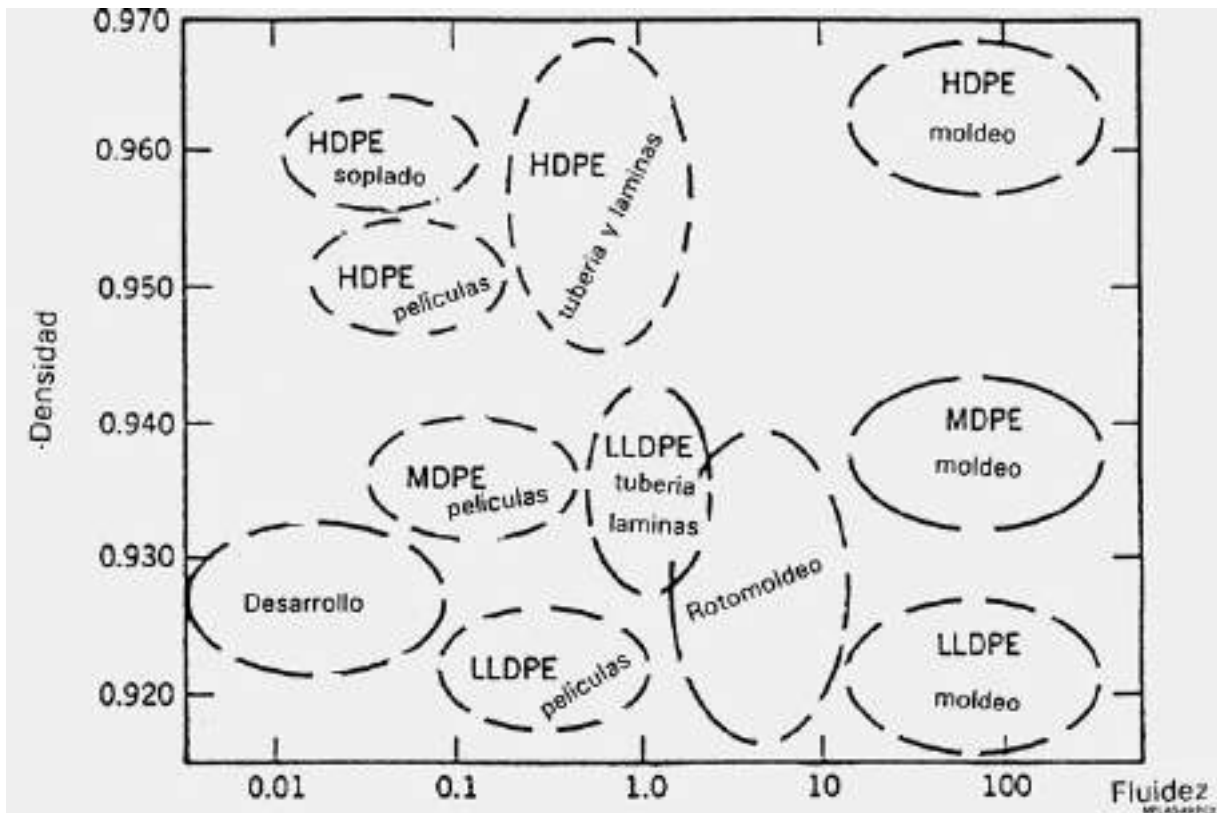


Usos y aplicaciones del HDPE (High Density Polyethylene)



Propiedades de los PE

Relación Índice de Fluidez-Densidad con la Aplicación





Aplicaciones relevantes del Polietileno

Aplicación	MFI (2.16kg/190°C) [g/10 min]	Densidad [g/cm³]
Tapas (HDPE)	0.5 - 2.7	0.950 - 0.963
Etiquetas (LLDPE - C4)	1.6 - 3.1	0.916 - 0.922
Etiquetas (MDPE)	0.6 - 0.8	0.928 - 0.935
Etiquetas (LDPE)	2.7 - 3.3	0.918 - 0.922
Etiquetas (HDPE)	1 - 2	0.950 - 0.956
Inyección de estibas (HDPE)	4 - 9	0.952 - 0.965
Inyección de canastas (HDPE)	5.5 - 9.0	0.959 - 0.964



Aplicaciones relevantes del Polietilenos

Aplicación	MFI (2.16kg/190°C) [g/10 min]	Densidad [g/cm³]
Inyección de cuñetes (HDPE)	5 - 8	0.952 - 0.962
Inyección de cuñetes (PP-R)	12 - 14	0.895 - 0.905
Inyección de canecas (LLDPE)	20	0.922 - 0.924
Inyección de canecas (HDPE)	4.5 - 6.9	0.952 - 0.960
Extrusión tuberías (MDPE - PE80)	0.7 - 0.85*	0.926 - 0.940
Extrusión tuberías (HDPE - PE100)	0.26 - 0.30*	0.952 - 0.965

*MFI (5kg/190°C)



**Un pequeño concepto
antes de seguir...**

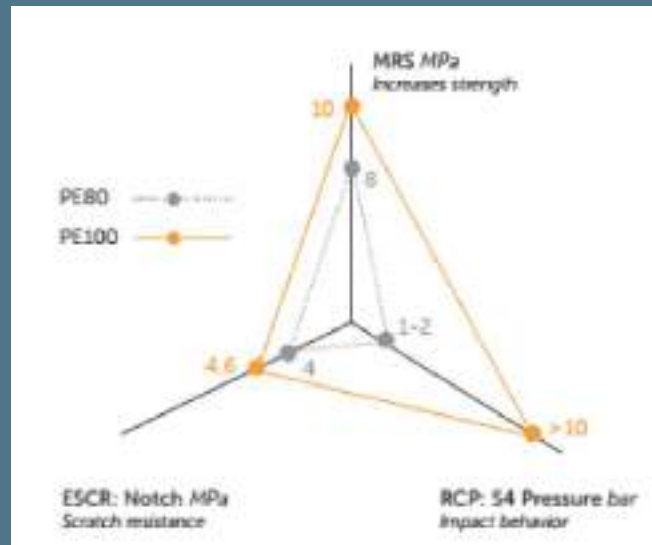
¿Qué significa PE80 y PE100?

Polietilenos para la producción de tuberías de gas y agua potable

MRS - according ISO 4427 for the different materials are:

Designation of material	MRS at 50 years and 20°C MPa (bar)
PE 100	10 (100)
PE 80	8 (80)
PE 63	6.3 (63)
PE 40	4 (40)
PE 32	3.2 (32)

**MRS o Minimum Required Strength o
Mínima Resistencia Requerida a 50 años
y 20°C, acorde a norma ISO 4427**



Piensa como si las cadenas de polímeros fueran espaguetis, pero a nivel molecular



Sigamos...



Aplicaciones relevantes del Polietileno

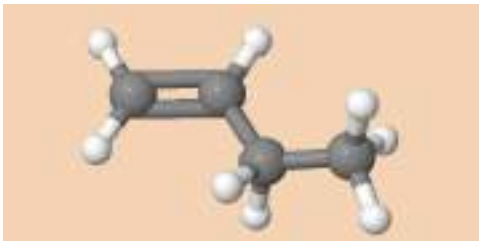
Aplicación	MFI (2.16kg/230°C) [g/10 min]	Densidad [g/cm³]
Extrusión de tubos agroindustriales (LDPE)	0.35 - 2	0.921 - 0.923
Extrusión de tubos agroindustriales (LLDPE)	0.8 - 2	0.916 - 0.922
Extrusión soplado (HDPE)	0.2 - 0.4	0.954 - 0.960
Extrusión soplado (LDPE)	0.32 - 2	0.918 - 0.922
Moldeo por compresión (HDPE)	2.5 - 9	0.949 - 0.956
Rotomoldeo (MDPE)	3.3 - 6	0.934 - 0.939
Rotomoldeo (HDPE)	2 - 5	0.942 - 0.956



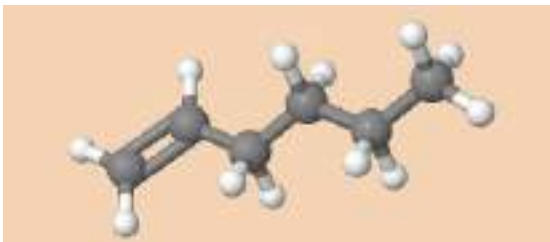
LLDPE

Co-monómeros y Propiedades

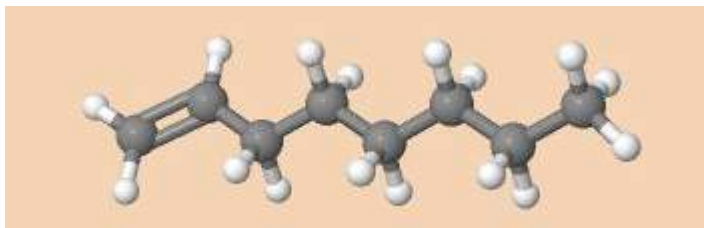
Los co-monómeros del LLDPE



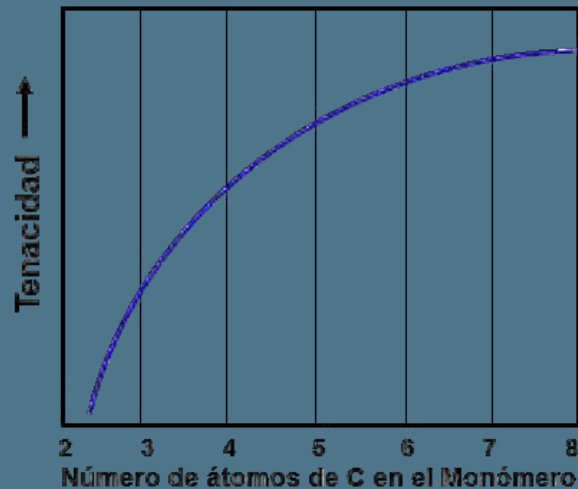
1- *Buteno*



1- *Hexeno*



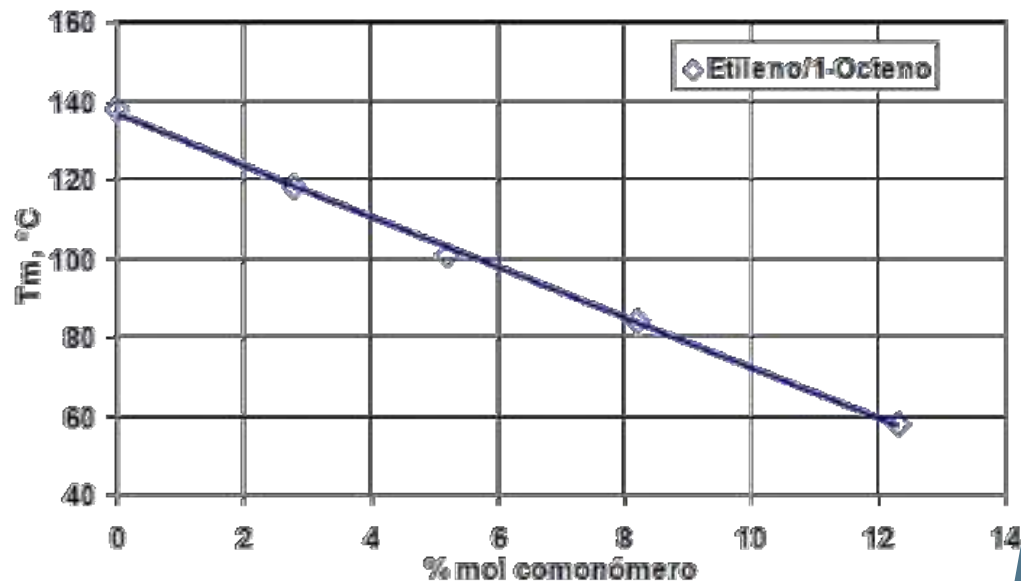
1- *Octeno*



Tenacidad: energía de deformación total que es capaz de absorber o acumular un material

Homopolímeros y Copolímeros

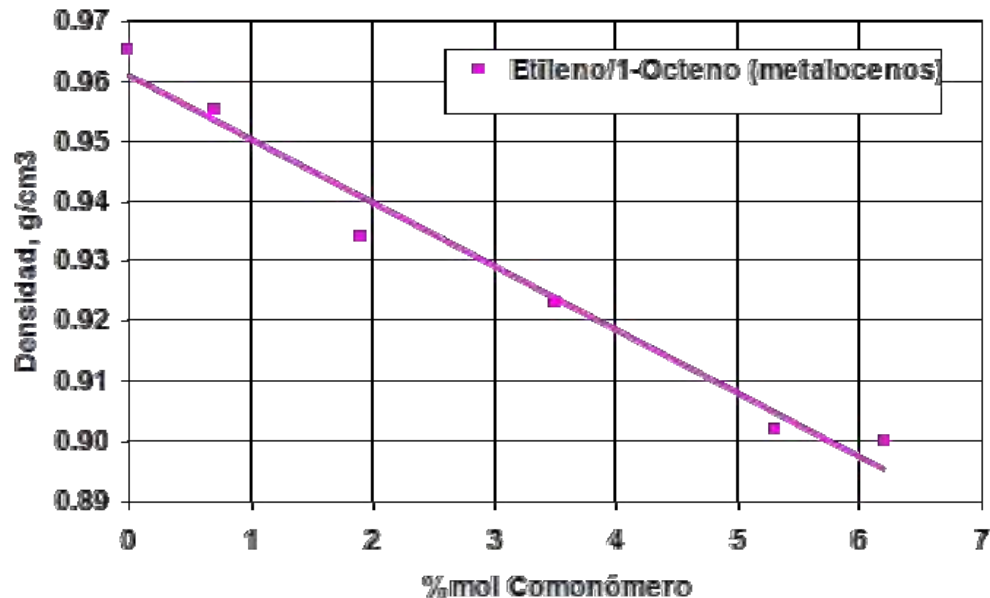
Copolímeros vs. Propiedades



Efecto del porcentaje de
co-monómero en la
temperatura de fusión del
LLDPE

Homopolímeros y Copolímeros

Copolímeros vs. Propiedades



Efecto del porcentaje de comonomero en la densidad del LLDPE

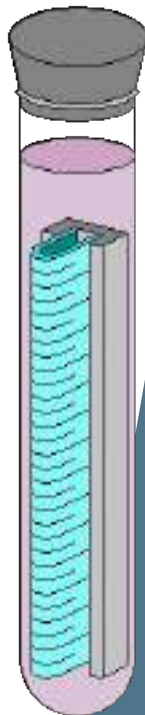


**Un pequeño concepto
antes de seguir...**



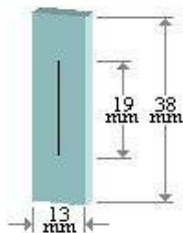
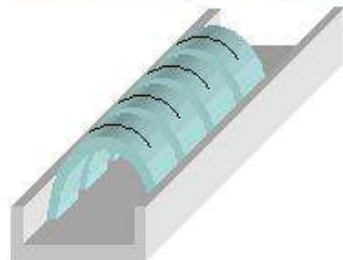
ESCR-Environmental Stress Cracking Resistance

Resistencia al agrietamiento bajo tensiones



ASTM D1693

Es el número de horas requerido para que falle el 50% de los especímenes probados (exhiban grietas generadas por la tensión).

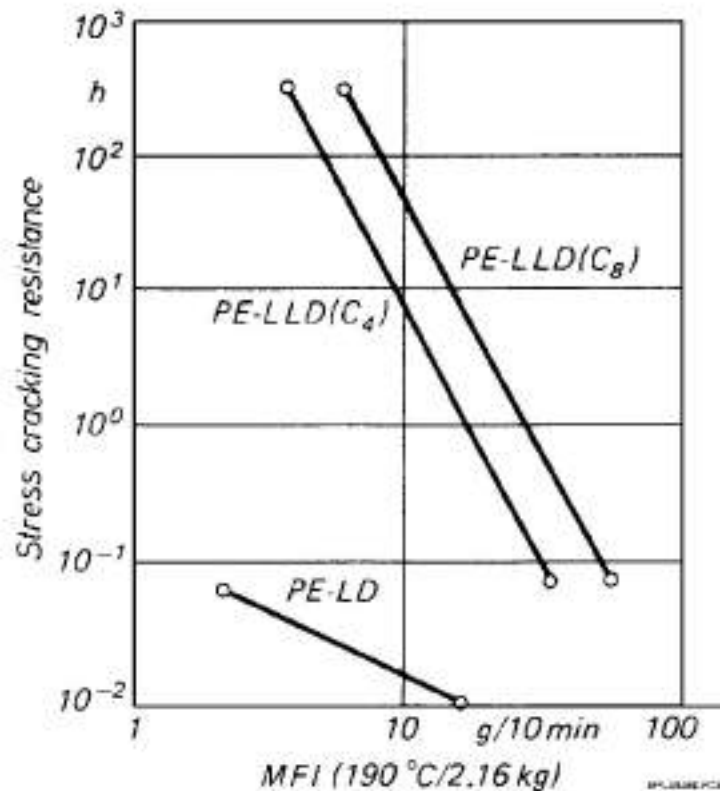
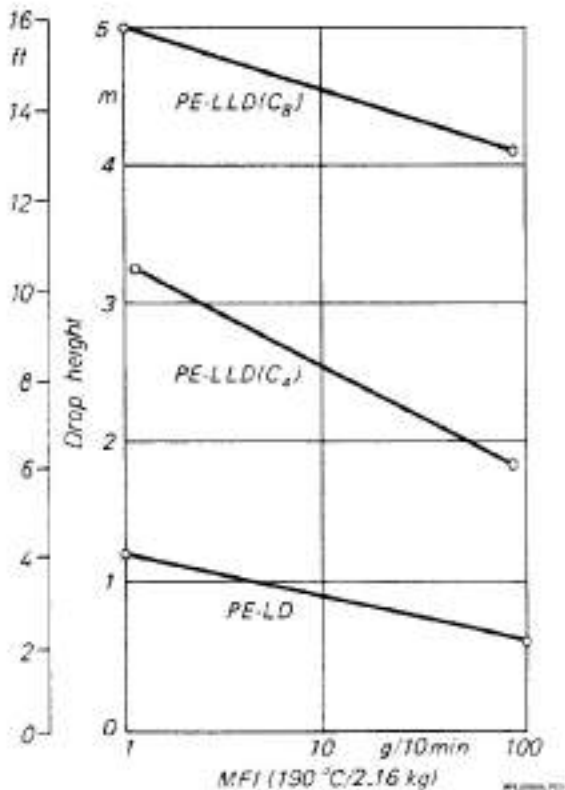




Sigamos...

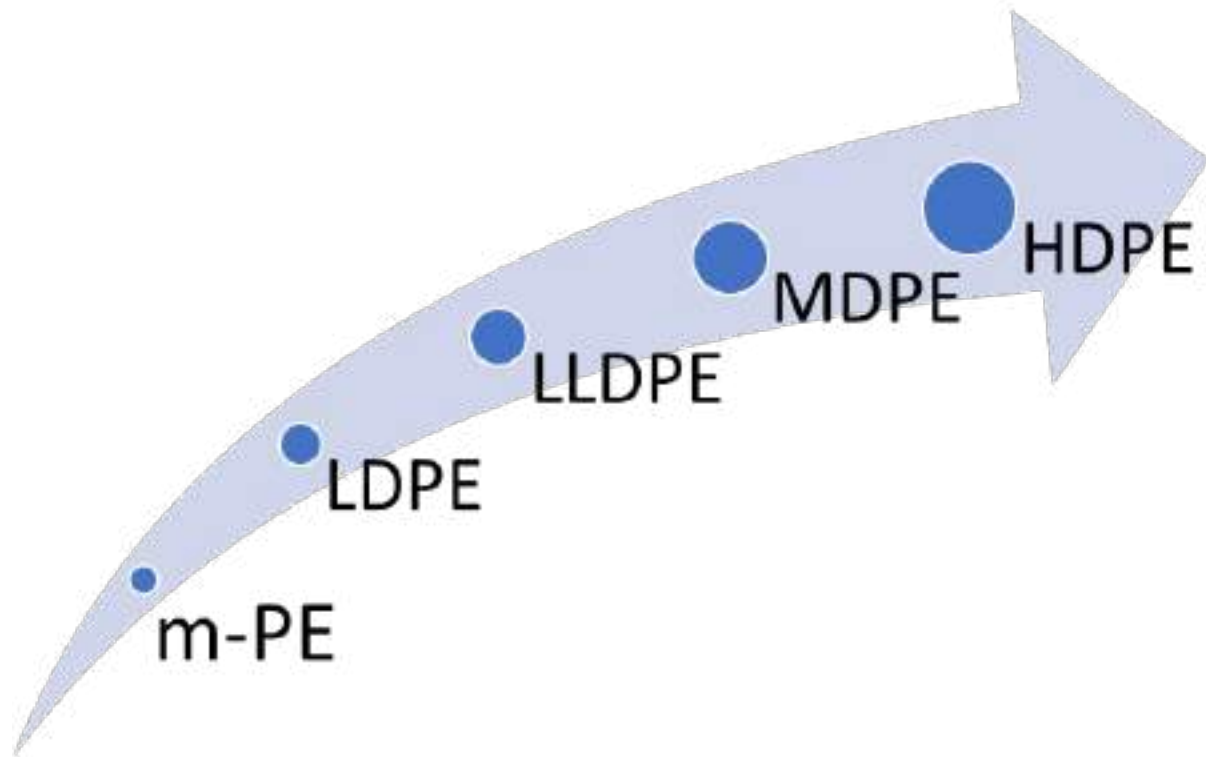
Comparación de propiedades

LDPE vs LLDPE



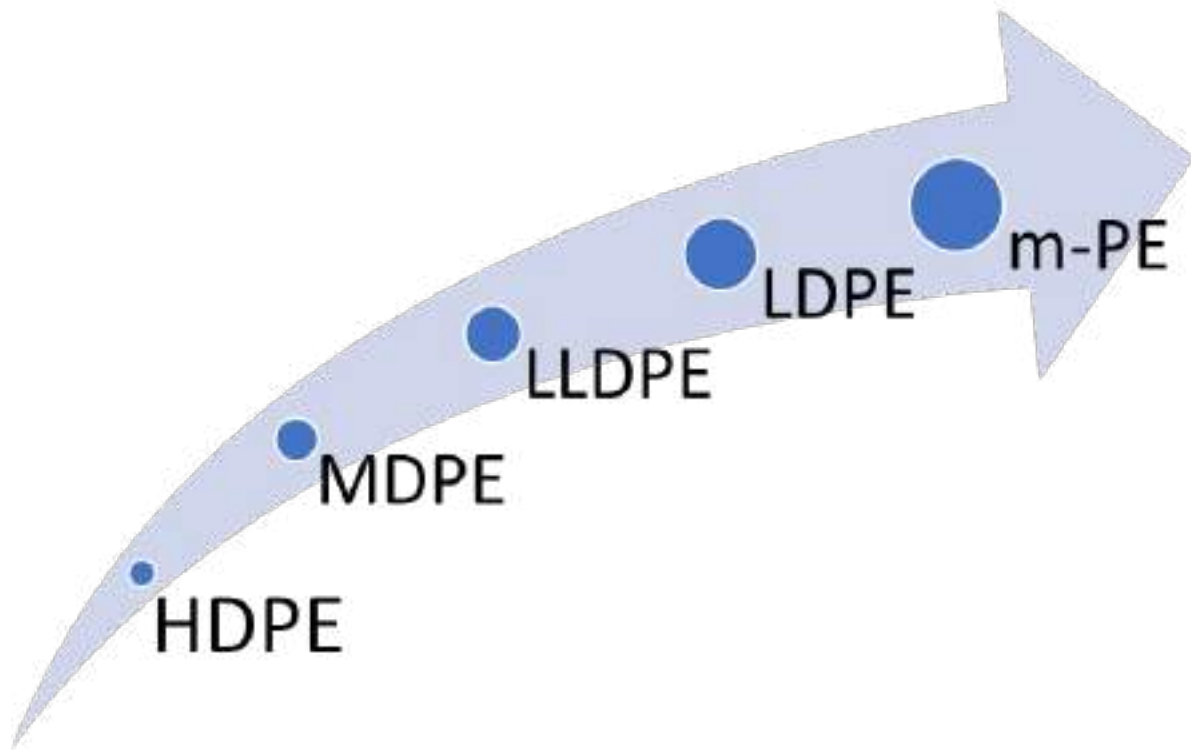
Sentido de aumento de las propiedades de los polietilenos

- Módulo de elasticidad (140 a 1500 MPa)
- Esfuerzo de cedencia (5 a 32 MPa)
- Temperatura de uso continuo (60 a 85°C)
- HDT - Temperatura de deflexión bajo carga (40-70°C)
- Dureza por penetración de bola (8-65 N/mm²)
- Temperatura de inicio de sellado (80-135°C)
- Haze (0.5 - 50% a 25µm)



Sentido de aumento de las propiedades de los polietilenos

- Resistencia al impacto Charpy con ranura a 20°C ($> 6 \text{ kJ/m}^2$) y Izod ($>150 \text{ J/m}$)
- Permeabilidad al vapor de agua (0.63 a 1.4 g-mil/100 in² atm dia)
- Permeabilidad a gases y aromas (75 a 300 cm³-mil/m² atm dia)
- Transparencia





**Un pequeño concepto
antes de seguir...**

Comportamiento viscoso de las sustancias



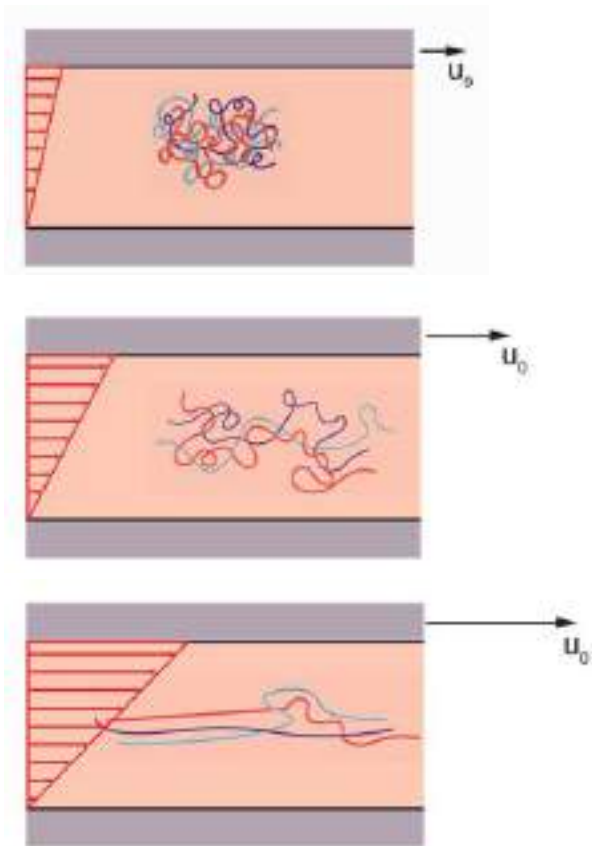
Newtonianos: Viscosidad constante (ej. agua)

Pseudoplásticos: El esfuerzo de cizalladura disminuye con el aumento de la velocidad de cizalladura (ej. Polímeros)

Dilatantes: El esfuerzo de cizalladura aumenta con la velocidad de cizalladura (ej. Mezclas harina/agua)



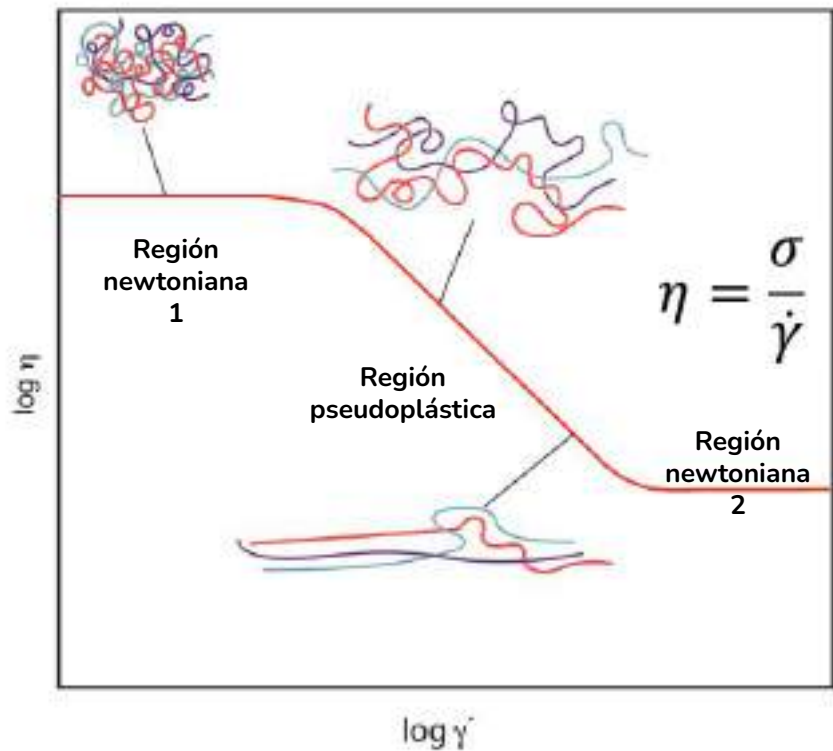
Pseudoplasticidad



Fenómeno reológico más importante en los polímeros, desde el punto de vista de procesamiento.

Caída de la viscosidad con la velocidad de deformación. Fenómeno llamado “adelgazamiento por cizalladura”

Comportamiento pseudoplástico de los polímeros



η

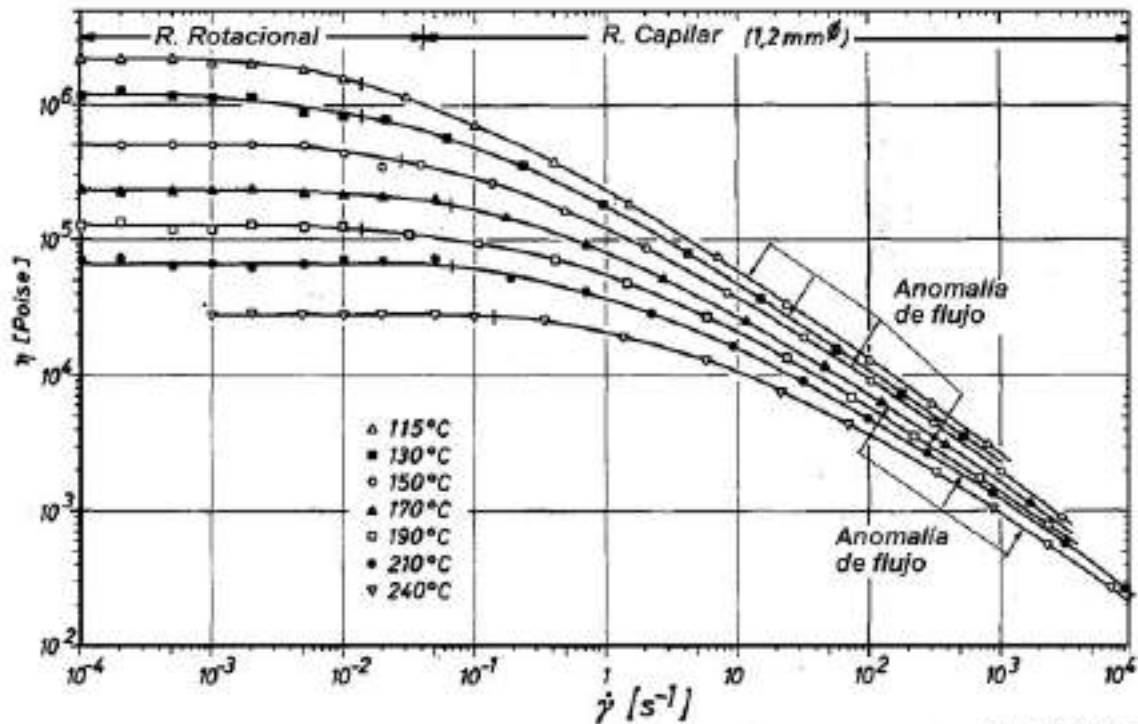
Viscosidad [Pa.s]

¡La viscosidad disminuye con el incremento de la velocidad de cizalladura!

¡A mayor velocidad más eficiencia!



Viscosidad y temperatura



La viscosidad disminuye con la temperatura y la velocidad de cizalladura

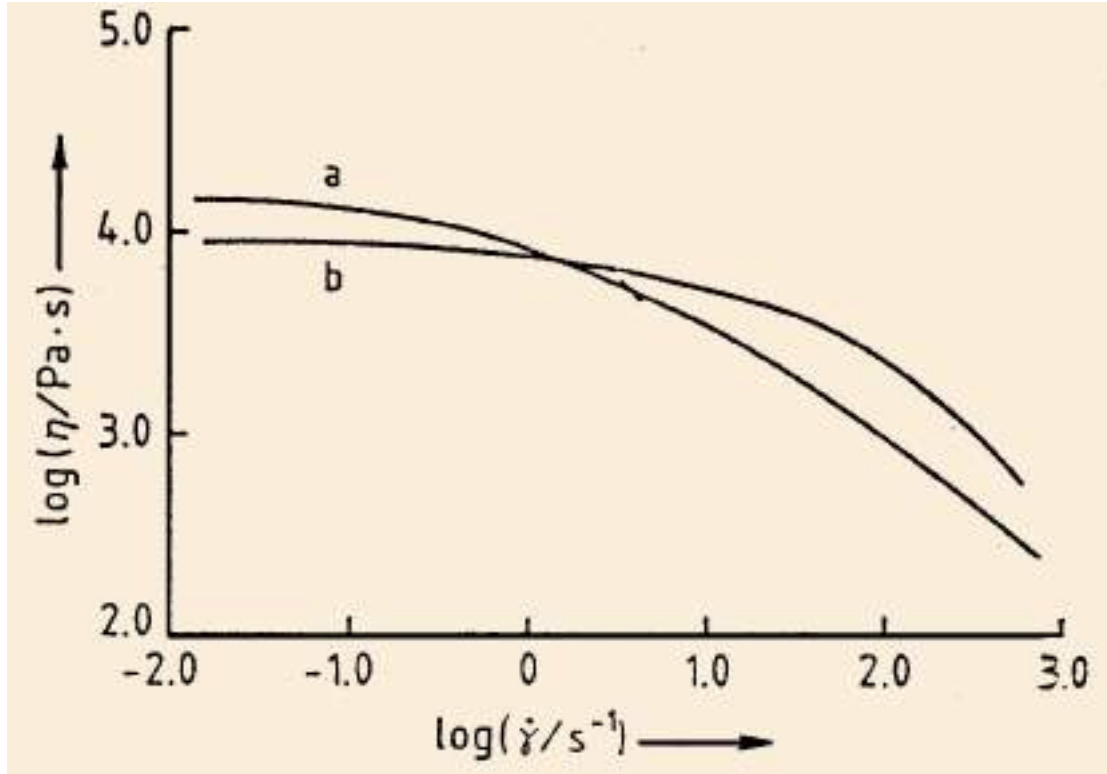
¡Estas se llaman curvas reológicas!





Sigamos...

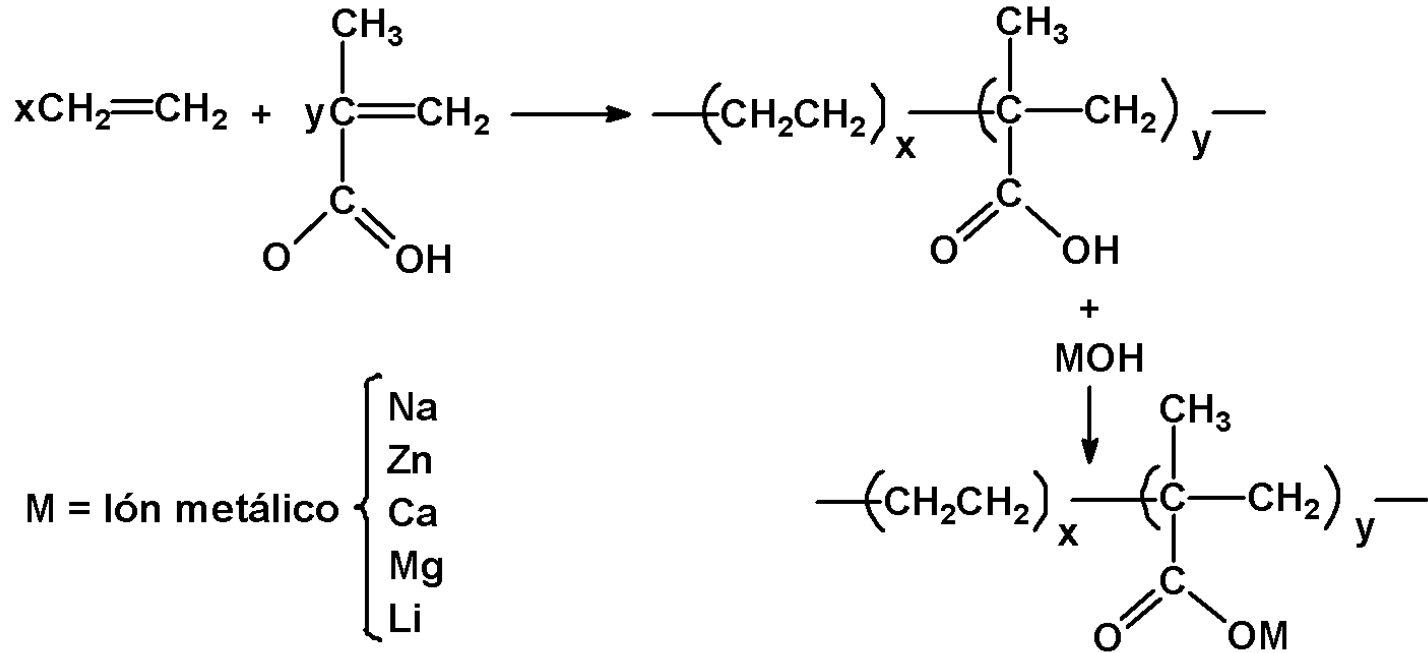
Comportamiento reológico de los polietilenos lineales



- a) LDPE
- b) LLDPE

El LLDPE tiene una distribución de peso molecular estrecho

Copolímeros ácidos y los ionómeros



Los ionómeros son copolímeros ácidos parcialmente neutralizados
 Empleados especialmente como modificadores de sellado y adhesivos



Copolímeros ácidos

Efecto de grupos ácidos
Contenido entre 3 y 20% de
co-monómero



Aumenta

- Rigidez
- Tenacidad
- Resistencia del fudido
- Propiedades ópticas
- Pegajosidad en caliente
- Adhesión a películas de aluminio y poliamidas
- Adhesión a metales
- Resistencia química
- Estabilidad térmica hasta 310°C

Reduce

- Temperatura de fusión
- Temperatura de iniciación de sellado
- Flexibilidad



Copolímeros ácidos

Efecto de grupos ácidos
Contenido entre 3 y 20% de
co-monómero



Procesabilidad en extrusión

- Corre como un LDPE
- No es sensible a la humedad
- Requiere de equipo protegido contra la corrosión
- Necesita ser purgado después del uso y no dejado en el equipo.
- Tiene algún grado de tacticidad
- Puede reticular a altas temperaturas de extrusión o elevados tiempos de residencia



Los ionómeros

Efecto del porcentaje de neutralización



Aumenta

- Rigidez
- Tenacidad
- Resistencia al rayado y al desgaste
- Resistencia a la penetración
- Resistencia a los solventes
- Rango de temperatura de sellado
- Termoformabilidad
- Propiedades ópticas
- Pegajosidad en caliente

Reduce

- MFI
- Adhesión a poliamidas y aluminio
- Resistencia al rasgado



Diferentes tipos de ionómeros

Ionómeros de sodio (Na)

- Mejores propiedades ópticas
- Mayor resistencia a los aceites
- Mayor pegajosidad en caliente
- Mejor desempeño durante el sellado al calor bajo contaminación con polvos
- Buena termoformabilidad

Ionómeros de zinc (Zn)

- Buena adhesión a sustratos como películas de aluminio y coextrusiones
- Mejor desempeño durante el sellado al calor bajo contaminación con líquidos

Es la resina más utilizada en la producción de tapas para el sector cosmético y perfumería



NUCREL™ Acid Copolymer

Química: Copolímero de ácido de etileno.

Comonomero: Ácido acrílico o metacrílico.

Descripción: Utilizado en procesos de recubrimiento por extrusión y laminación. Une polietileno con aluminio y tiene propiedades de sellado. Tiene resistencia hacia productos ácidos empacados con vida de anaquel de hasta 1 año.

Recomendación de uso: Empaques para jugo, condimentos, pastas dentales y bolsas de té.



El cliente será el único responsable en determinar la idoneidad de los productos en sus formulaciones y aplicaciones antes de su uso y/o mezclado.

Material	% Ácido Metacrílico	MI g/10 min	Densidad g/cm ³
NUCREL™ 0411HS	4.0	11.0	0.930
NUCREL™ 0903	9.0	2.50	0.930
NUCREL™ 093HC	9.0	2.50	0.930
NUCREL™ 0908HS	9.2	8.00	0.930
NUCREL™ 0910	8.7	10.00	0.930
NUCREL™ 1202HC	11.5	1.50	0.930
NUCREL™ 30707	6.9	7.00	0.930
NUCREL™ 30907	9.5	7.00	0.940
NUCREL™ 31001	9.5	1.30	0.940
NUCREL™ 3990	9.5	10.00	0.940
NUCREL™ AE	No contacto comida	10.00	0.920

NUCREL™ is a trademark of The Dow Chemical Company ("Dow") or an affiliated company of Dow.



Copolímeros ácidos y los ionómeros

SURLYN™ Ionomers

Química: Ionómero proveniente de un copolímero de ácido de etileno neutralizado con sales metálicas como zinc, magnesio, litio, potasio o sodio.

Descripción: Gran resistencia a las grasas y aceites. Abrasión excepcional, muy alta resistencia a la punción, baja temperatura de sellado, buena adhesión a metales como el aluminio y ópticas brillantes. Excelente sello en presencia de contaminantes.

Recomendación de uso: Envasado al vacío de carne fresca, empaques médicos, empaques stretch.



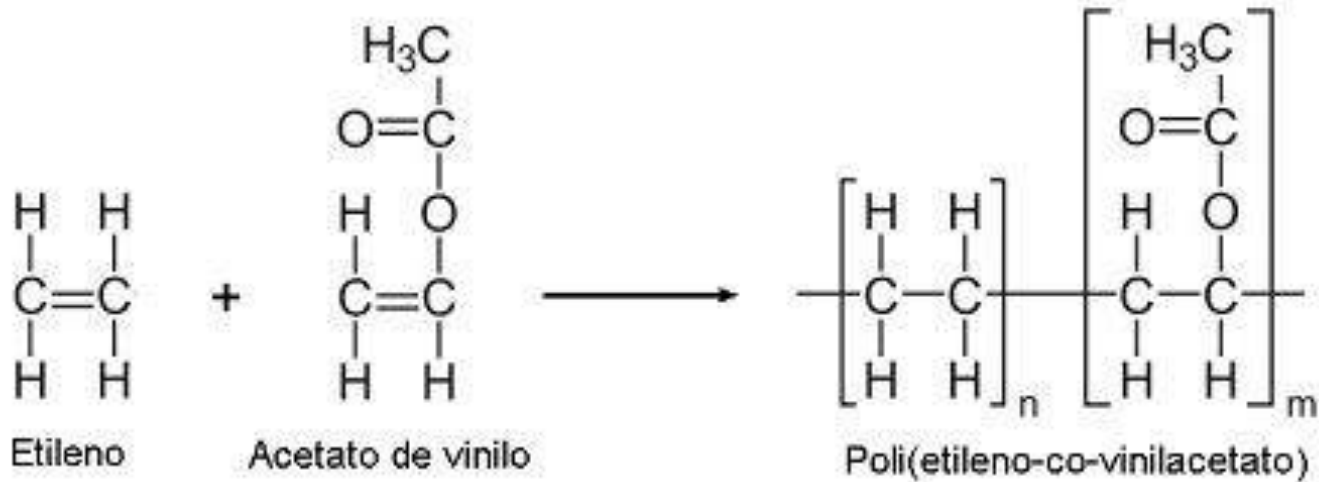
El cliente será el único responsable en determinar la idoneidad de los productos en sus formulaciones y aplicaciones antes de su uso y/o mezclado.

Material	Copolímero	MI g/10 min	Densidad g/cm ³
SURLYN™ 1601	Na	1.30	0.940
SURLYN™ 1605	Na	2.50	0.950
SURLYN™ 1652	Na	5.20	0.940
SURLYN™ 1706	Zn	0.70	0.950
SURLYN™ 1707	Na	0.90	0.950
SURLYN™ 1802	Na	4.30	0.940

SURLYN™ is a trademark of The Dow Chemical Company ("Dow") or an affiliated company of Dow.



EVA - Etil Vinil Acetato



Se clasifican acorde al porcentaje de vinil acetato (VA). Habitualmente entre 5% y 25%



EVA - Etil Vinil Acetato

Efecto del vinil acetato



Célula abierta



Célula cerrada



Aumenta

- Adhesión que el polietileno (PE), PVC, PS y PET
- Suavidad
- Flexibilidad
- Resistencia al impacto y la penetración
- Resistencia al agrietamiento por flexión
- Resistencia del fundido
- Capacidad de espumado
- Adherencia a PVdC en procesos de coextrusión

Reduce

- Temperatura de iniciación de sellado
- Rigidez



EVA - Etil Vinil Acetato

ELVAX™ Ethylene Vinyl Acetate Copolymers

Química: Polímero de etileno con vinil acetato.

Descripción: Añadir vinil acetato al polímero promueve la polaridad y disminuye la cristalinidad así como el punto de fusión (por lo tanto, menor temperatura para sellado). Excelente flexión y resistencia al craqueado.

Recomendación de uso: Mezclas de ceras, empaques médicos, empaques para líquidos, empaques de cereal, empaques barrera y refrigerados.

Material	% Vinil Acetato	MI g/10 min	Densidad g/cm ³
ELVAX™ 3120	7.50	1.20	0.930
ELVAX™ 3128-1	9.30	2.00	0.930
ELVAX™ 3129-1	10.0	0.35	0.930

El cliente será el único responsable en determinar la idoneidad de los productos en sus formulaciones y aplicaciones antes de su uso y/o mezclado.

Material	% Vinil Acetato	MI g/10 min	Densidad g/cm ³
ELVAX™ 3130	12.0	2.50	0.930
ELVAX™ 3135SB	12.0	0.35	0.930
ELVAX™ 3135X	12.0	0.35	0.930
ELVAX™ 3165	18.0	0.70	0.940
ELVAX™ 3165SB	18.0	0.70	0.940
ELVAX™ 3170	18.0	2.50	0.940
ELVAX™ 3175	28.0	25.00	0.950
ELVAX™ 3178Z	20.0	20.00	0.940
ELVAX™ 3180	28.0	25.00	0.950
ELVAX™ 3182	28.0	3.00	0.950
ELVAX™ 3190	25.0	2.00	0.950
ELVAX™ 3190- A	25.0	2.00	0.950
ELVAX™ CE9619-1	18	3.8	1.060

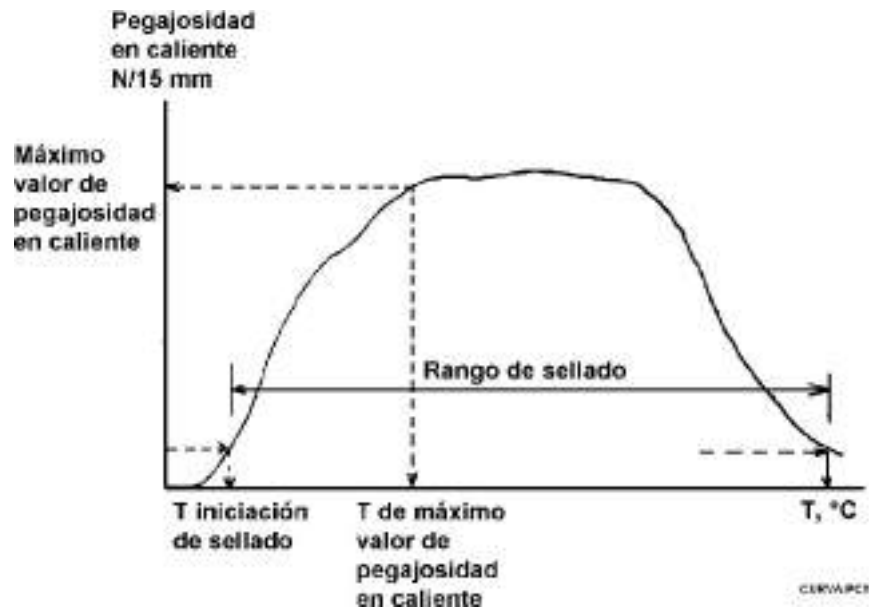
ELVAX™ is a trademark of The Dow Chemical Company ("Dow") or an affiliated company of Dow.



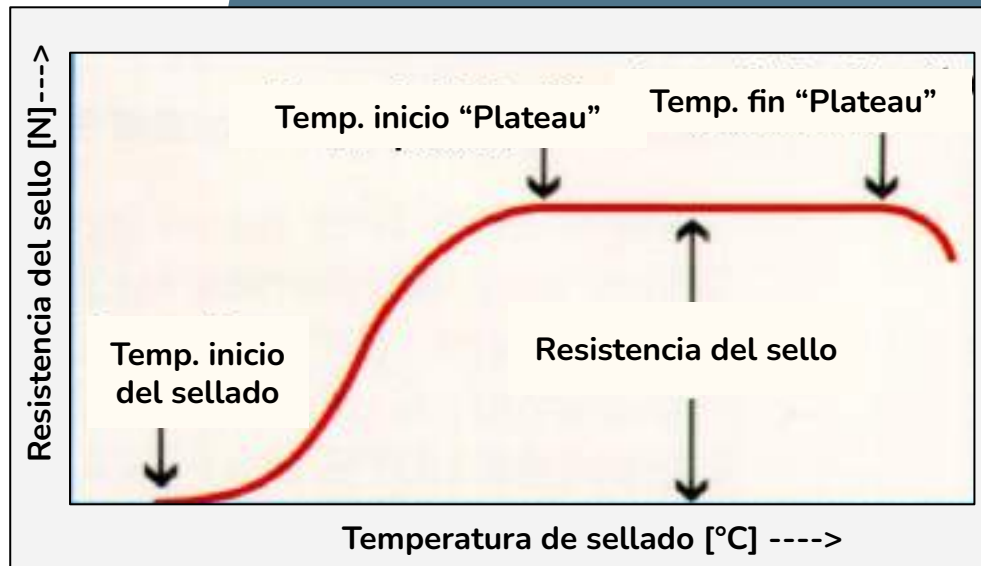


**Un pequeño concepto
antes de seguir...**

Propiedades importantes para la conversión de empaques

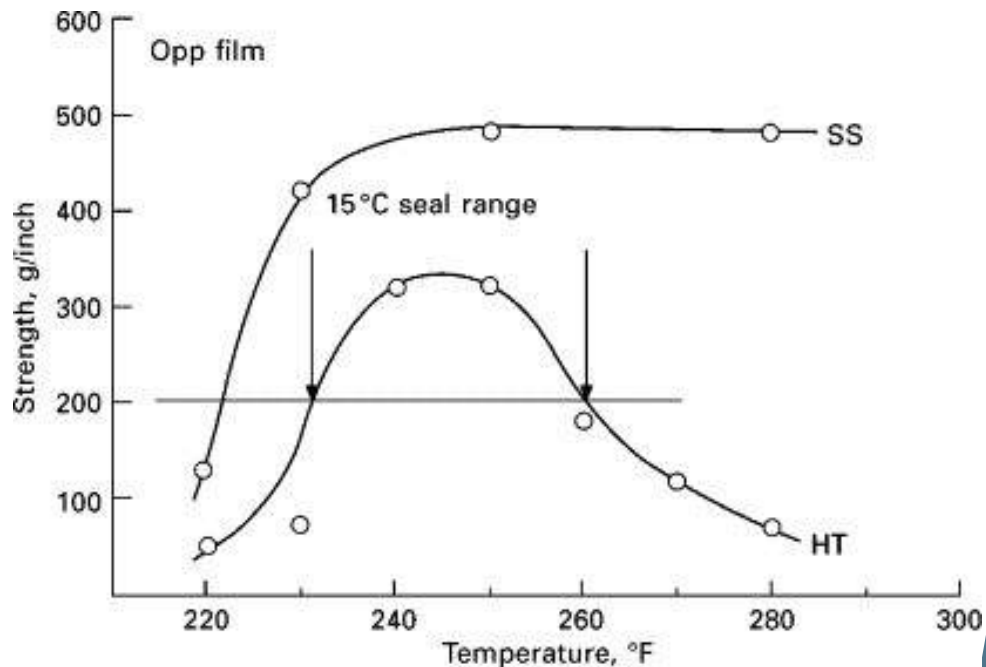


Hot Tack [ASTM F1921](#)



Curva de sellado [ASTM F88](#)

Rango de sellado adecuado



El conjunto de curva de sellado y curva de pegajosidad en caliente permite determinar el rango de sellado.

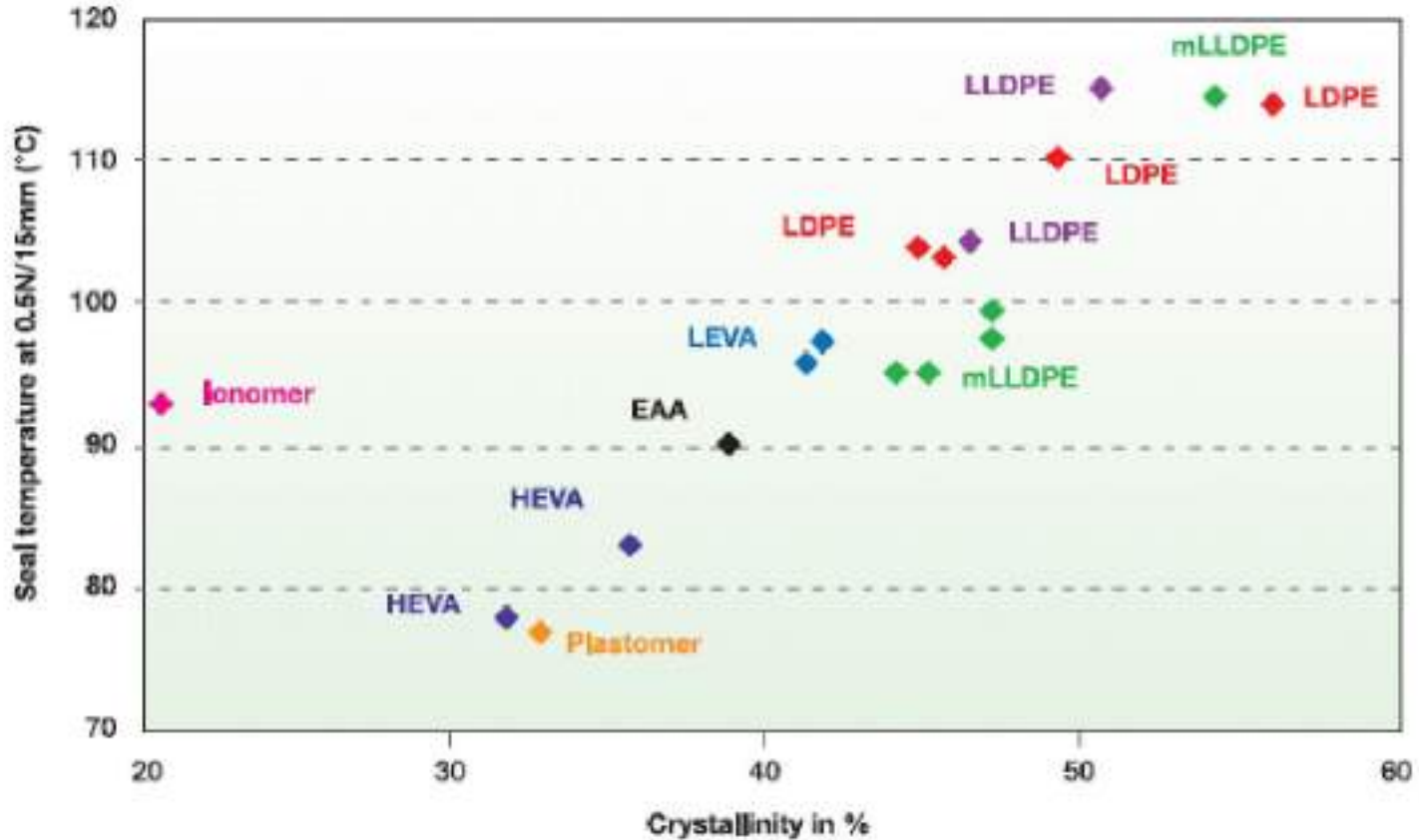
Mientras más grande el rango de sellado, más fácil es el control del proceso



Sigamos...



Comparación de temperaturas de inicio de sellado - copolímeros de etileno



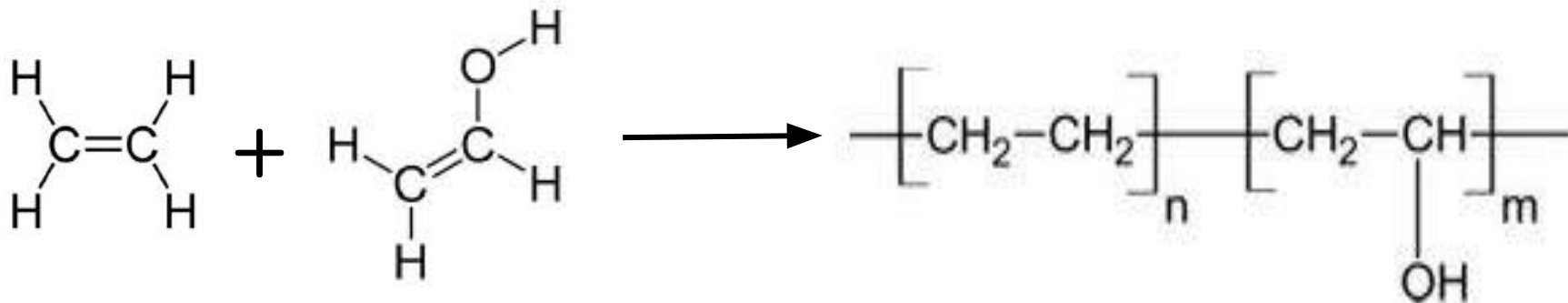


Evaluación de algunas características de los copolímeros de etileno

Polímero	Hot Tack	Rango Hot Tack	SIT	Sello contam	Total sello	Adhes Foil	Estir	Bajo Torq	Bajo Neck in	Total Proce
LDPE	1	1	2	1	5	1	2	4	2	9
mLLDPE	2	1	1	2	6	1	1	1	1	4
EVA	2	2	4	2	10	1	2	2	2	7
EMA	2	2	4	2	10	1	2	3	2	8
mVLDPE	4	1	4	3	12	1	1	1	1	4
Copolímero ácido	3	3	4	3	13	4	3	3	3	13
Ionómeros	4	4	4	4	16	3	4	3	4	14



EVOH (Etilen Vinil Alcohol)



Combina las propiedades de excelentes barreras a gases y resistencia a solventes orgánicos del Polivinil Alcohol (PVOH) con la procesabilidad y resistencia al agua del PE



EVOH (Etilen Vinil Alcohol) - Efecto del contenido de etileno

% molar de etileno: Varía entre 27 y 47%

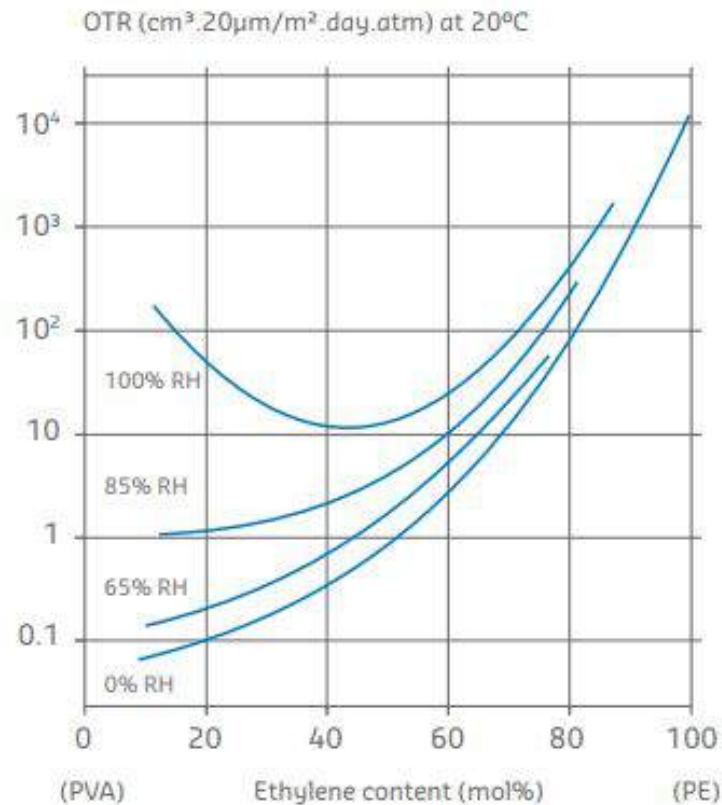
% mol etileno

Barrera al oxígeno

Flexibilidad

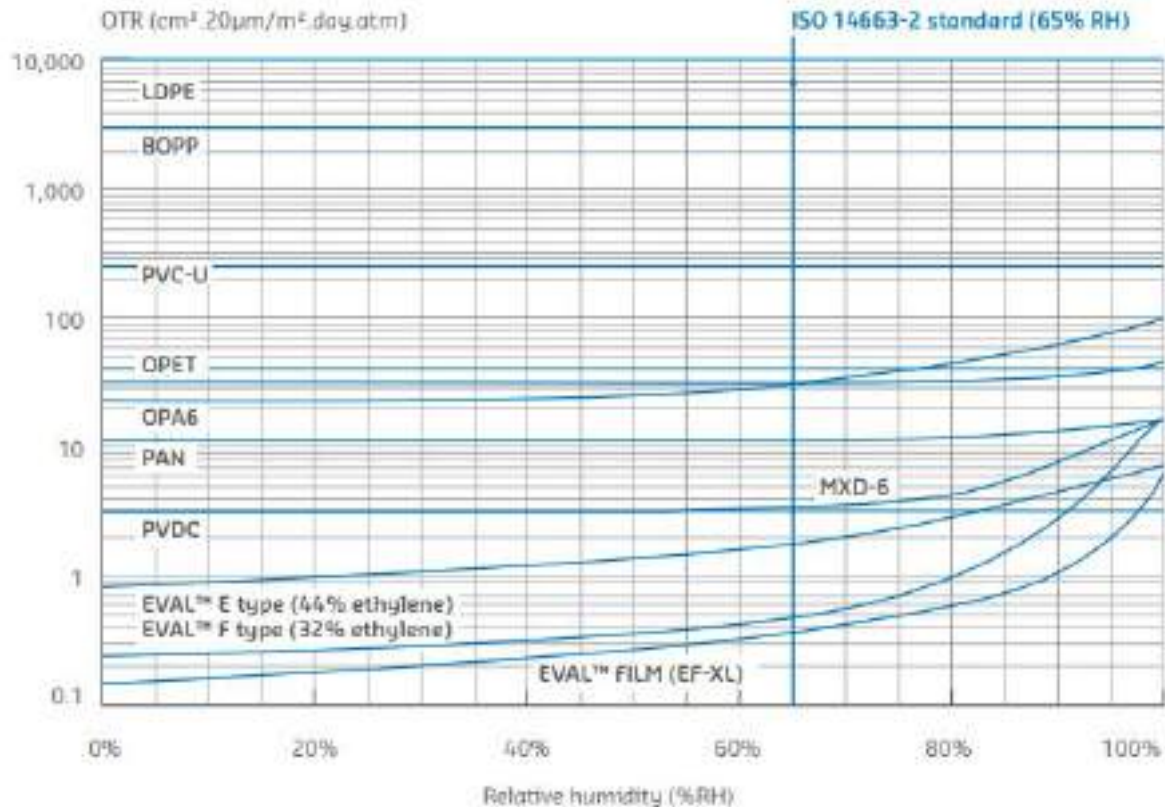
Procesabilidad

Estabilidad térmica



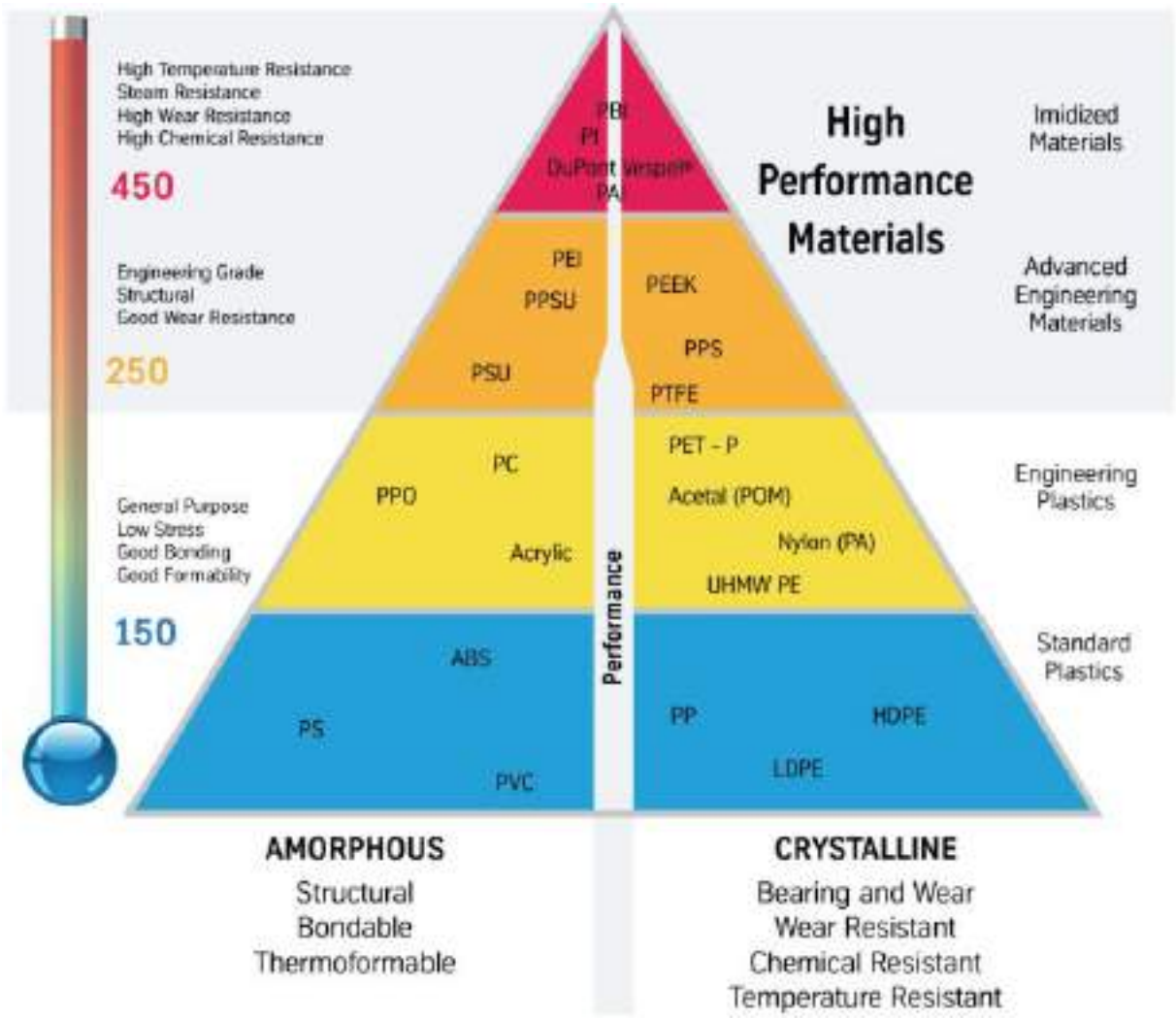


EVOH (Etilen Vinil Alcohol) - Comparativo propiedades de barrera con otros polímeros



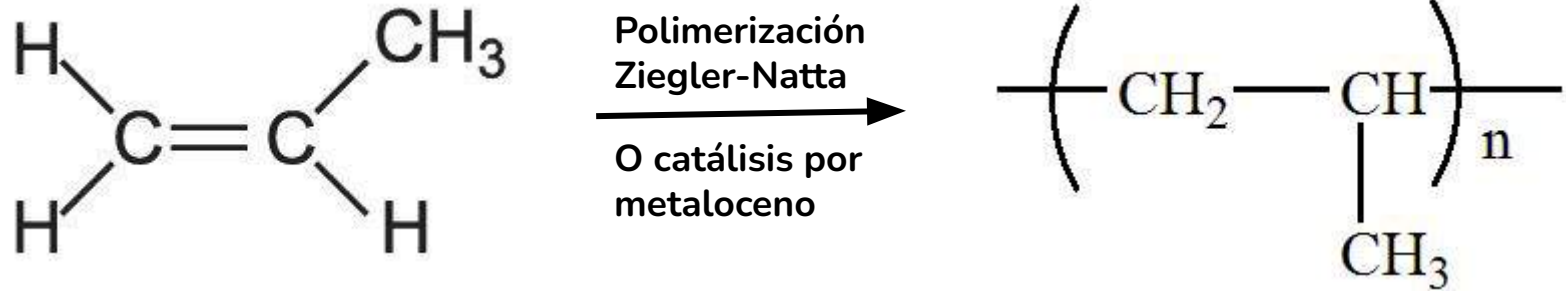


PROPIEDADES, USOS Y APLICACIONES DE LOS POLIPROPILENOS Y SUS COPOLÍMEROS



Clasificación de los polímero acorde con su resistencia térmica

Polipropileno (PP)



Existen básicamente tres tipos de polipropilenos homopolímeros: Isotácticos, sindiotácticos y atácticos



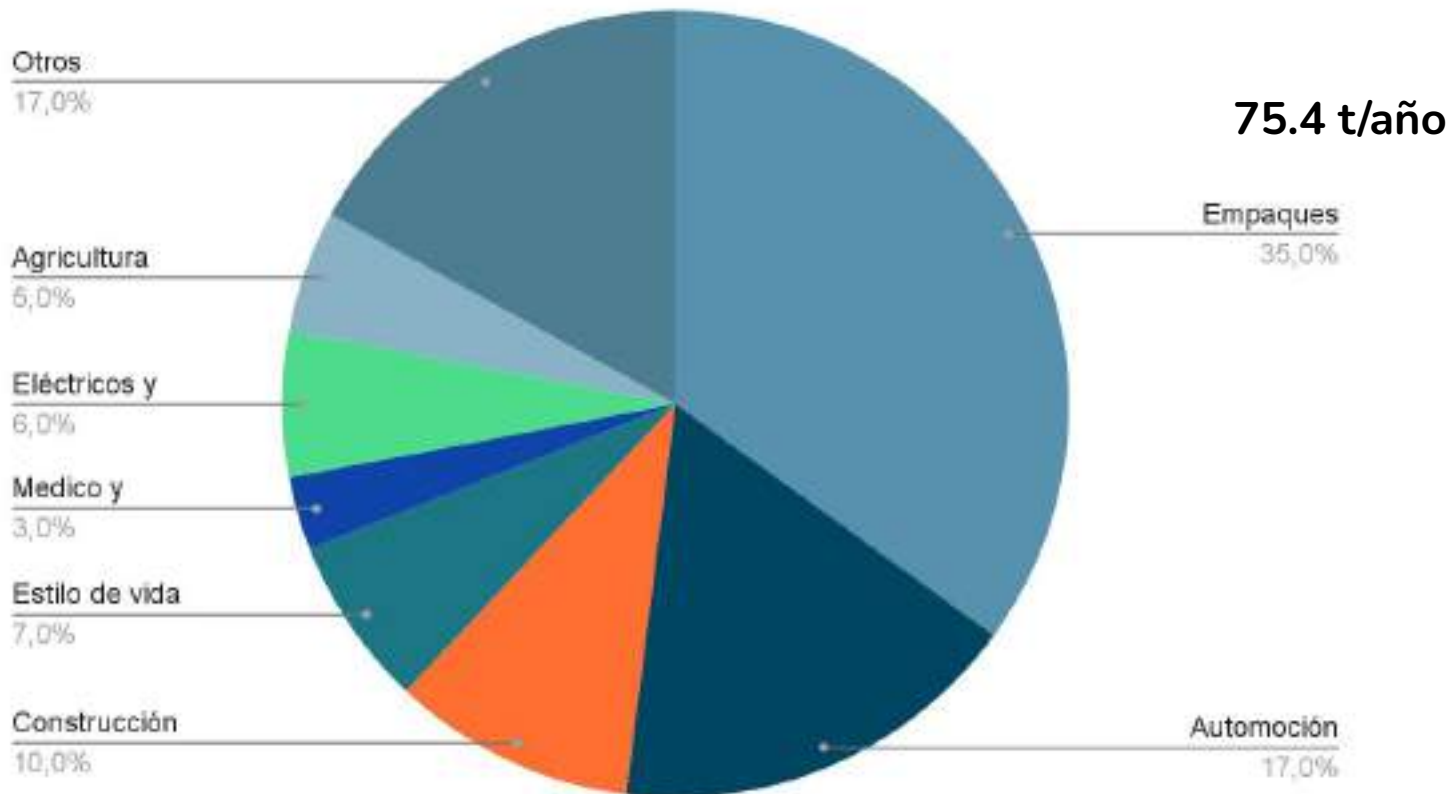
Polipropileno

Características generales

- Densidad entre 0.900 - 0.910 g/cm³
- Alta temperatura vítrea (Homopolímero) (-10 a 0°C)
- Temperatura de fusión (Homopolímero) 165°C
- Menor encogimiento que el PE
- Puede ser usado en microondas
- Puede ser usado en aplicaciones para llenado en caliente
- Resistencia al ataque por ácidos, álcalis y solventes,
- Hinchable en gasolina, Xileno y compuestos Clorados
- Baja permeabilidad al agua.
- Difícil de estampar, pintar y pegar

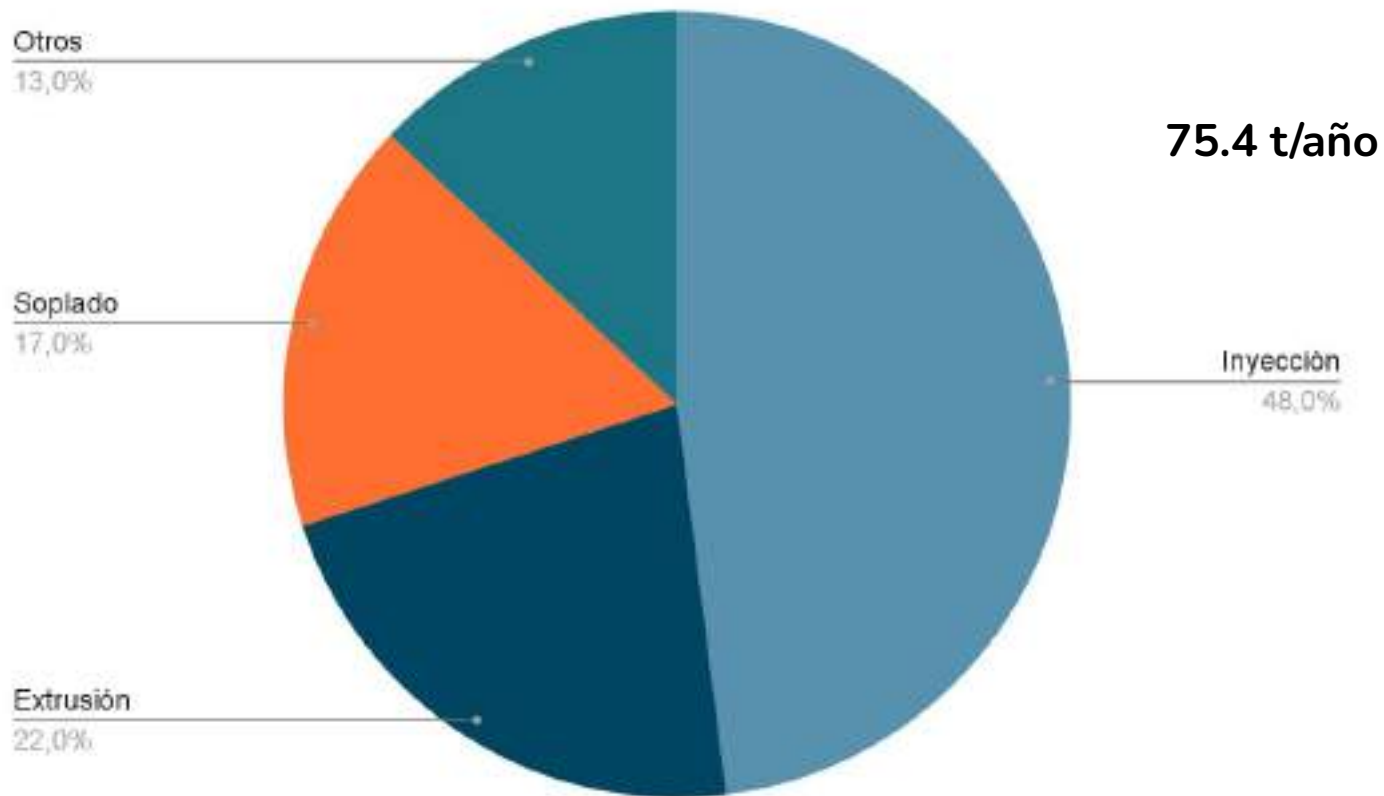


Aplicaciones típicas del polipropileno





Aplicaciones típicas del polipropileno



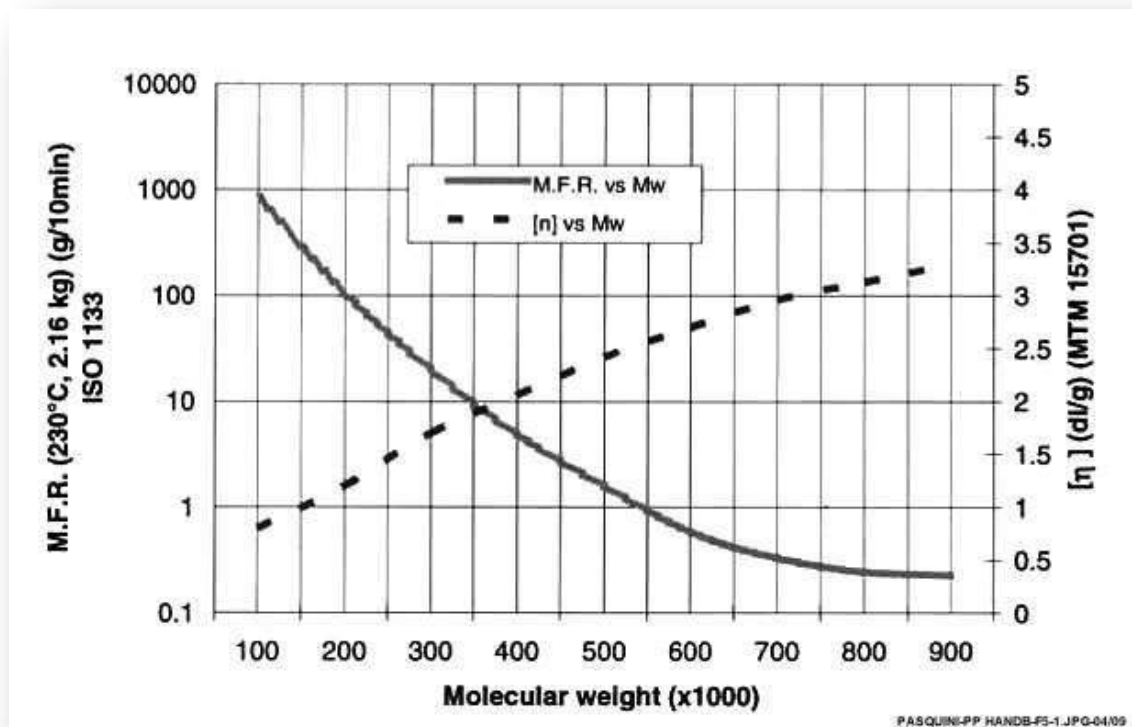


Polipropileno

Aplicaciones del PP



Polipropileno (PP) - Efecto del peso molecular



El índice de fluidez disminuye y la viscosidad aumenta con el aumento del peso molecular del polipropileno



Aplicaciones relevantes del Polipropileno

Aplicación	MFI (2.16kg/230°C) [g/10 min]	Densidad [g/cm³]
Tapas (PP-C)	6 - 8	0.900 - 0.905
Tapas (PP-H)	7.5 - 12.5	0.900 - 0.905
Etiquetas (PP-H)	1.6 - 3.1	0.900 - 0.905
Etiquetas (PP-R)	1.5 - 7.0	0.900 - 0.910
Inyección de estibas (PP-R)	11 - 13	0.900 - 0.910
Inyección de baldes (PP-R)	40 - 80	0.900 - 0.910
Inyección de baldes (PP-C)	5 - 16	0.900 - 0.905



Aplicaciones relevantes del Polipropileno

Aplicación	MFI (2.16kg/230°C) [g/10 min]	Densidad [g/cm³]
Inyección de cuñetes (PP-C)	16 - 19	0.900 - 0.905
Inyección de cuñetes (PP-R)	12 - 14	0.895 - 0.905
Inyección de canecas (PP-C)	16 - 18	0.900 - 0.905
Extrusión tuberías agroindustriales (PP-C)	0.3 - 0.8	0.900 - 0.905
Extrusión tuberías agroindustriales (PP-R)	0.26 - 0.35	0.900 - 0.905
Extrusión de rafias (PP-H)	3.4 - 5.0	0.900 - 0.905



Aplicaciones relevantes del Polipropileno

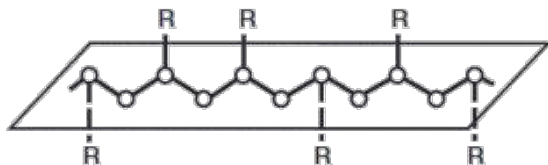
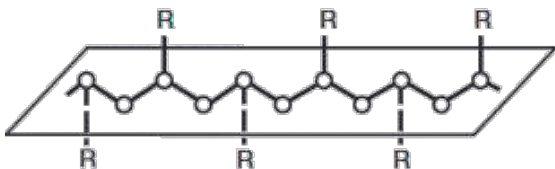
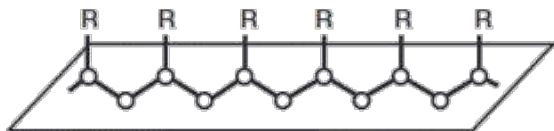
Aplicación	MFI (2.16kg/230°C) [g/10 min]	Densidad [g/cm³]
Extrusión soplado (PP-R)	0.8 - 1.6	0.900 - 0.905
Extrusión soplado (PP-C)	0.7 - 1.2	0.900 - 0.905
Extrusión soplado (PP-H)	0.65 - 1.4	0.900 - 0.905
Moldeo por compresión (PP-C)	6 - 8	0.900 - 0.905
Moldeo por compresión (PP-R)	25 - 80	0.900 - 0.905



**Un pequeño concepto
antes de seguir...**

Tacticidad

Significa "orden" o "arreglo" y se refiere a las diferentes configuraciones resultantes de la ubicación de los sustituyentes a lo largo de la cadena polimérica



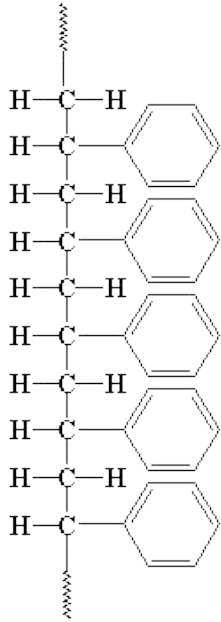
Polímeros isotácticos: los sustituyentes se ubican en el mismo lado de la cadena macromolecular.

Polímeros sindiotácticos: los sustituyentes se encuentran de forma alternante en la cadena principal

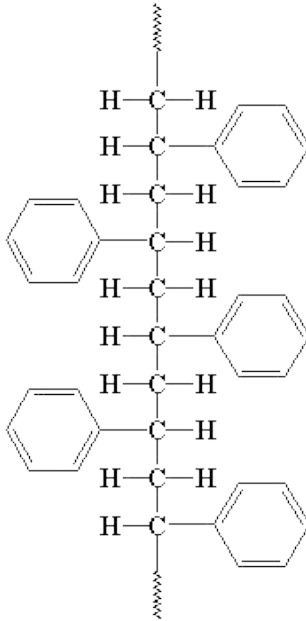
Polímeros atácticos: los sustituyentes se encuentran distribuidos de manera aleatoria en la cadena principal

Tacticidad

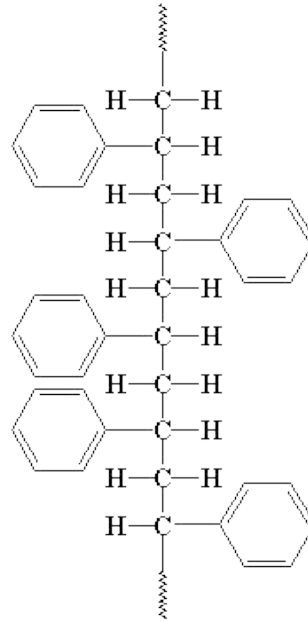
Tacticidad: poliestireno (PS)



Isotático



Sindiotático



Atático

- PS cristal:
 - Es atático.
 - Producido por catálisis Ziegler-Natta
 - Amorfo
 - $T_g = 100^\circ\text{C}$
- PS de ingeniería:
 - Es sindiotático
 - Producido por catálisis metalocénica
 - Semicristalino
 - $T_f = 270^\circ\text{C}$

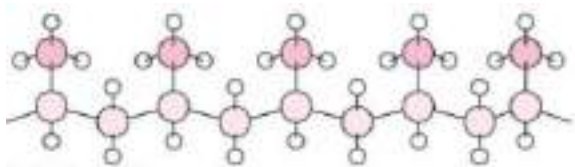




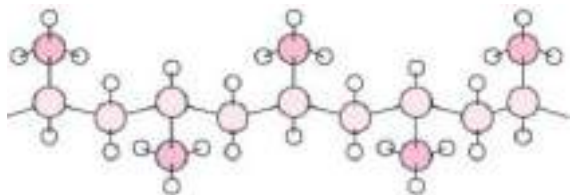
Sigamos...

Tacticidad

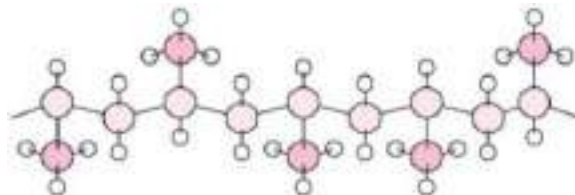
Tacticidad: polipropileno (PP)



iPP



sPP



aPP

A mayor organización intermolecular:

- Mayor cristalinidad
- Mayor temperatura de fusión

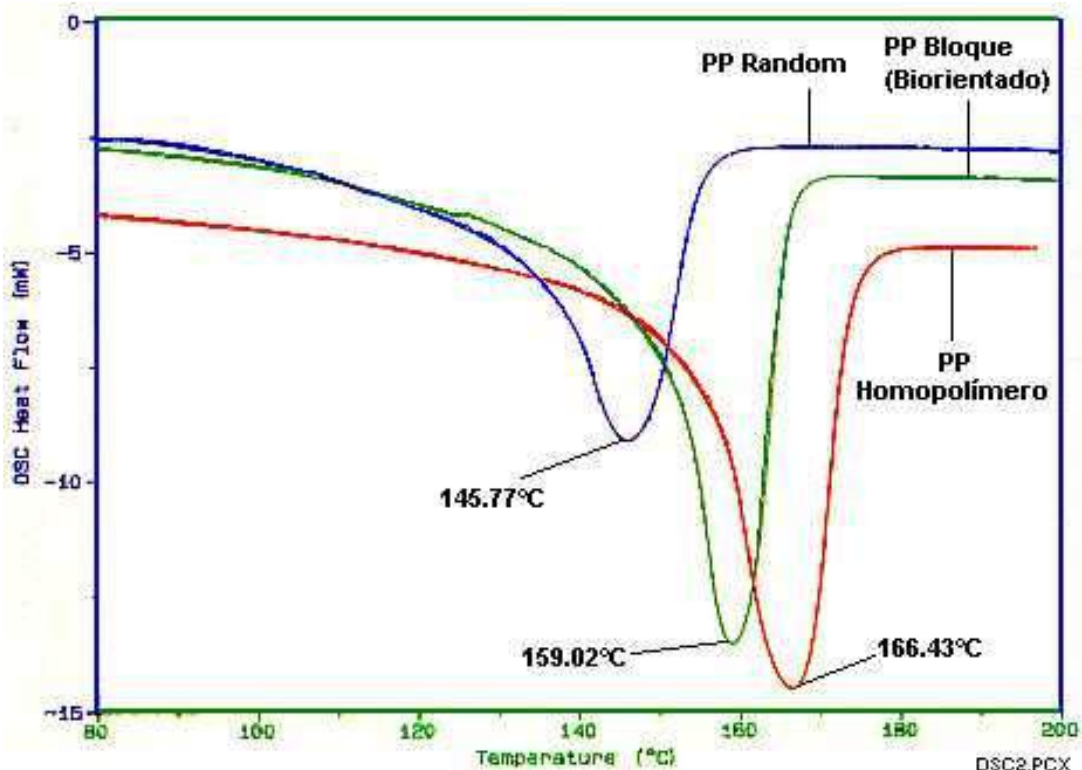
Isotáctico > Sindiotáctico > Atáctico

El s-PP tiene temperatura de fusión de 130°C, 30% de grado de cristalización y se considera un termo elastómero





Propiedades de los PP



PP-H

0.900-0.910 g/cm³

Es la densidad típica

-10 - 0°C

Es la Tg (Temperatura de transición vítrea)

165 - 176°C

Es la Tm (Temperatura de fusión de cristales)

207 J/g

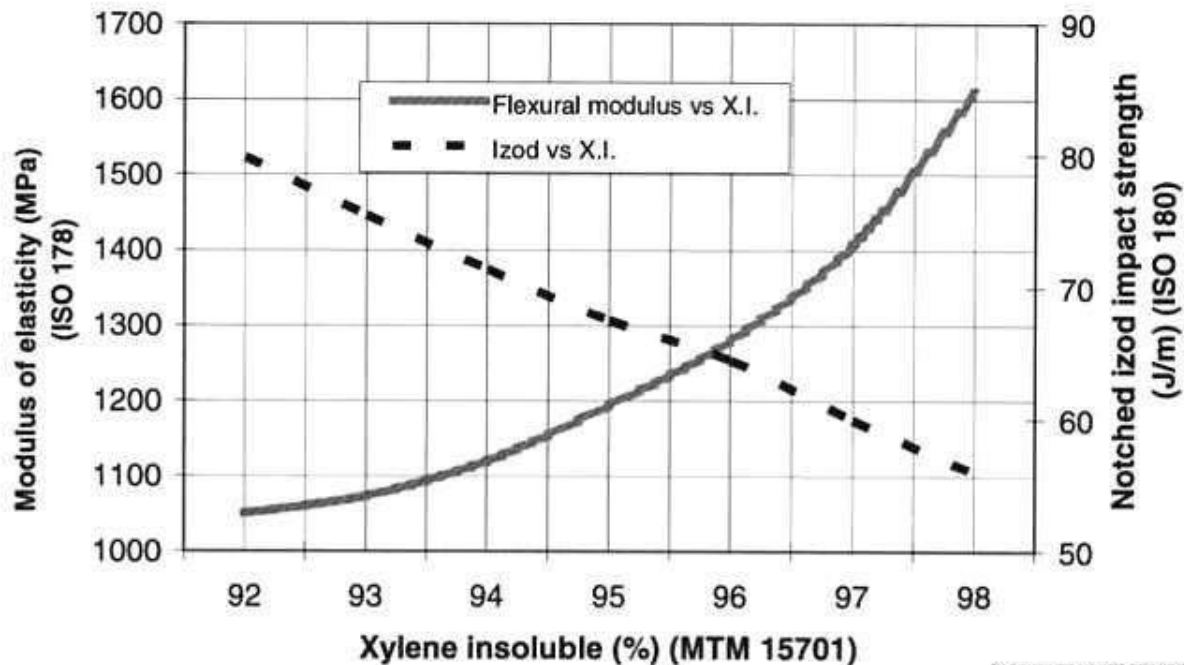
Es el calor latente de fusión de cristales

1.5 - 2.2%

Es el grado de atacticidad del PP-H comercial

Efecto de la atacticidad sobre el polipropileno

La fase atáctica se disuelve en heptano, ciclohexano o xilano



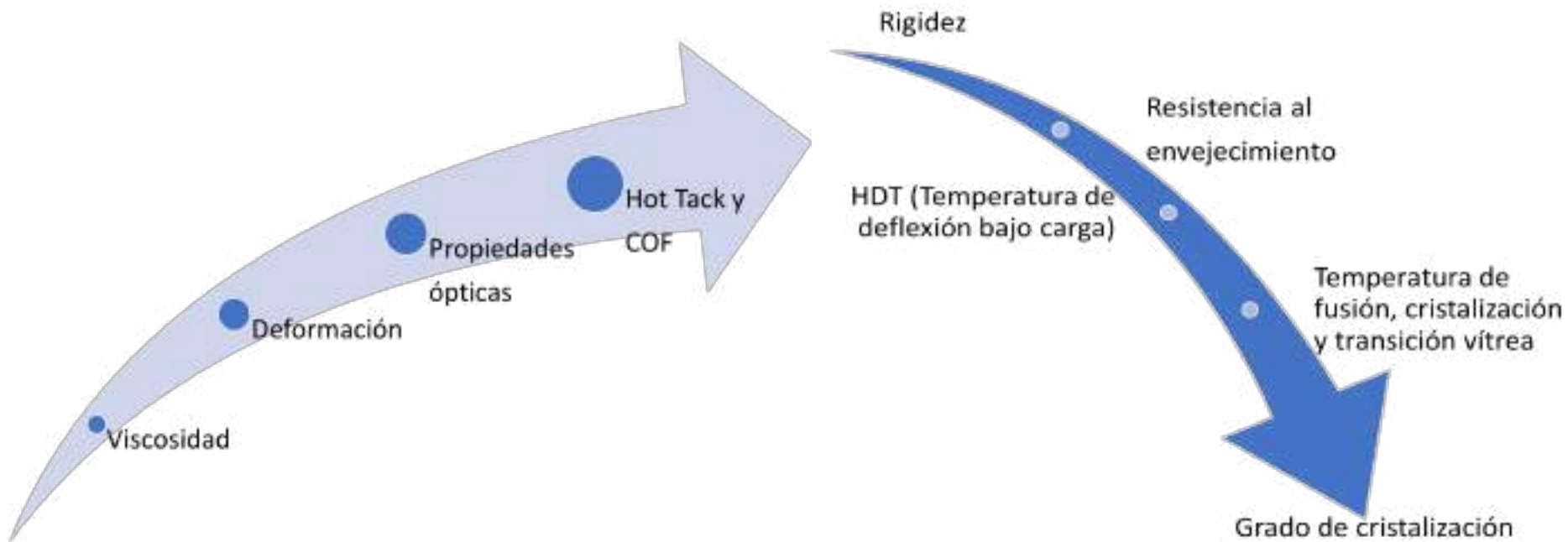
PASQUINI-PP_HANDB-F5-2.JPG-04/09

La rigidez aumenta con la disminución del grado de atacticidad



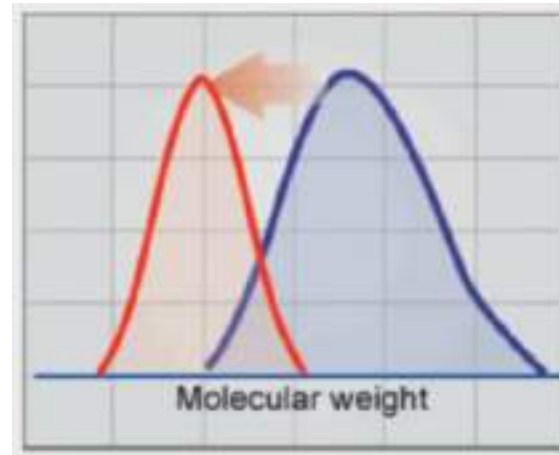
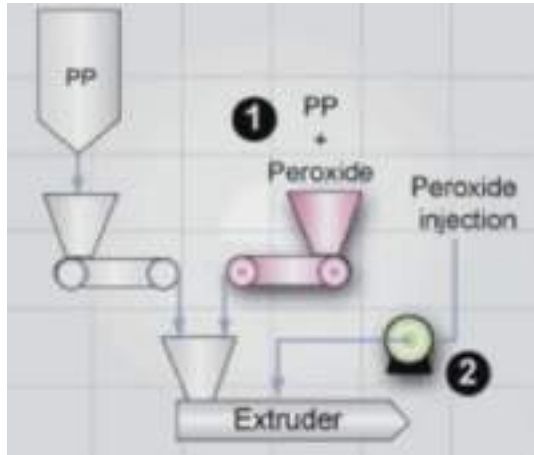
Efecto de la atacticidad sobre el polipropileno

La fase atáctica se disuelve en heptano, ciclohexano o xilano



Reología controlada o “Visbreaking”

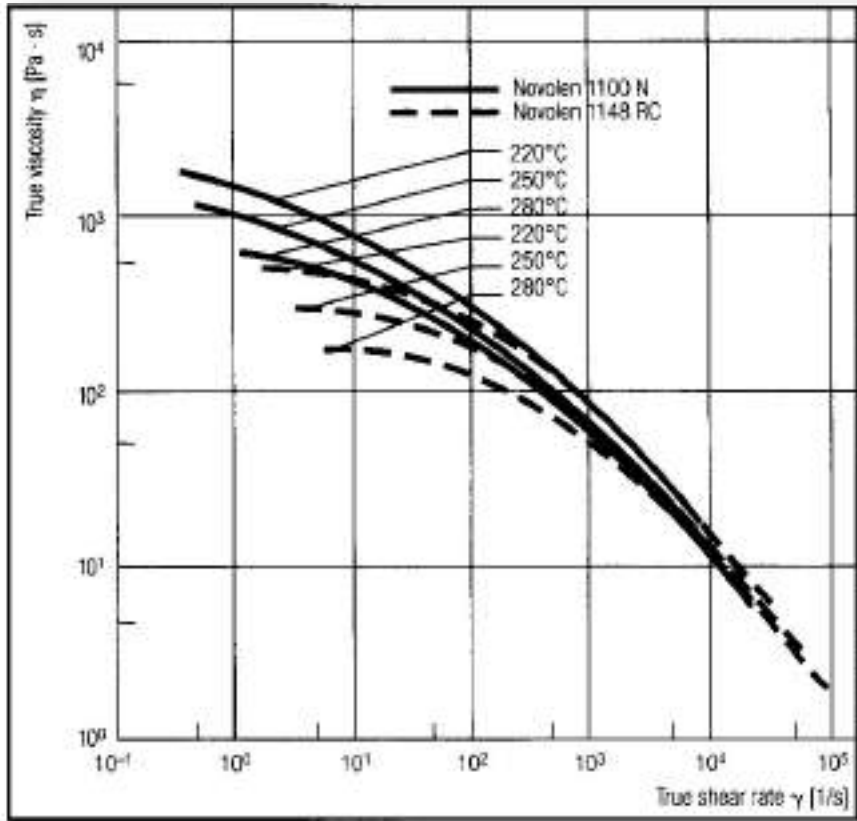
Para reducción del peso molecular



- Fraccionamiento de las cadenas de PP mediante el uso de peróxidos orgánicos (Extrusión Reactiva)
- Reducción del peso molecular
- Estrechamiento de la distribución de pesos moleculares

Reología controlada o “Visbreaking”

Comportamiento viscoso



- Comportamiento típico de polímeros de distribución de peso molecular (MWD) estrecha.

Velocidad de cristalización y porcentaje máximo de cristalinidad

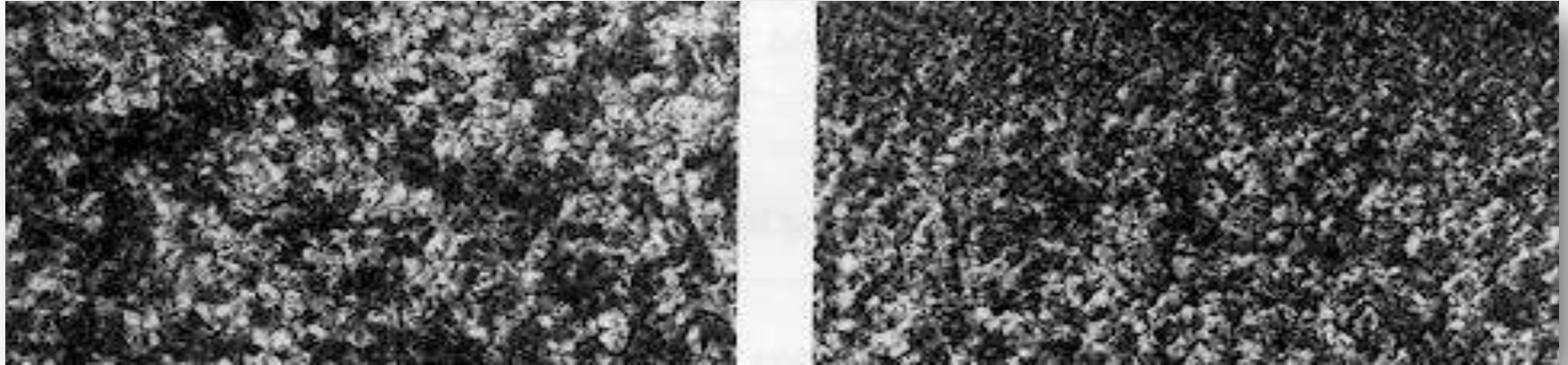


POLIMERO	VELOCIDAD DE CRISTALIZACIÓN [micrones/min]	CRISTALINIDAD MÁXIMA [%]
POLIETILENO	>1000	80
POLIAMIDA 6/6	1000	70
POLIAMIDA 6	200	35
POLIPROPILENO ISOTÁCTICO	20	63
PET	7	50
PS ISOTÁCTICO	0.3	32
PC	0.01	25



Control de la velocidad de enfriamiento

Ejemplo: Producción de películas de polipropileno



$$T_{\text{rodillo de "cast"}} = 100^{\circ}\text{C}$$

$$dT/dt = 1 \text{ K/s}$$

$$\text{densidad a } 20^{\circ}\text{C} = 0.905 \text{ g/cm}^2$$

$$\text{grado de cristalización} = 50\%$$

$$T_{\text{rodillo de "cast"}} = 40^{\circ}\text{C}$$

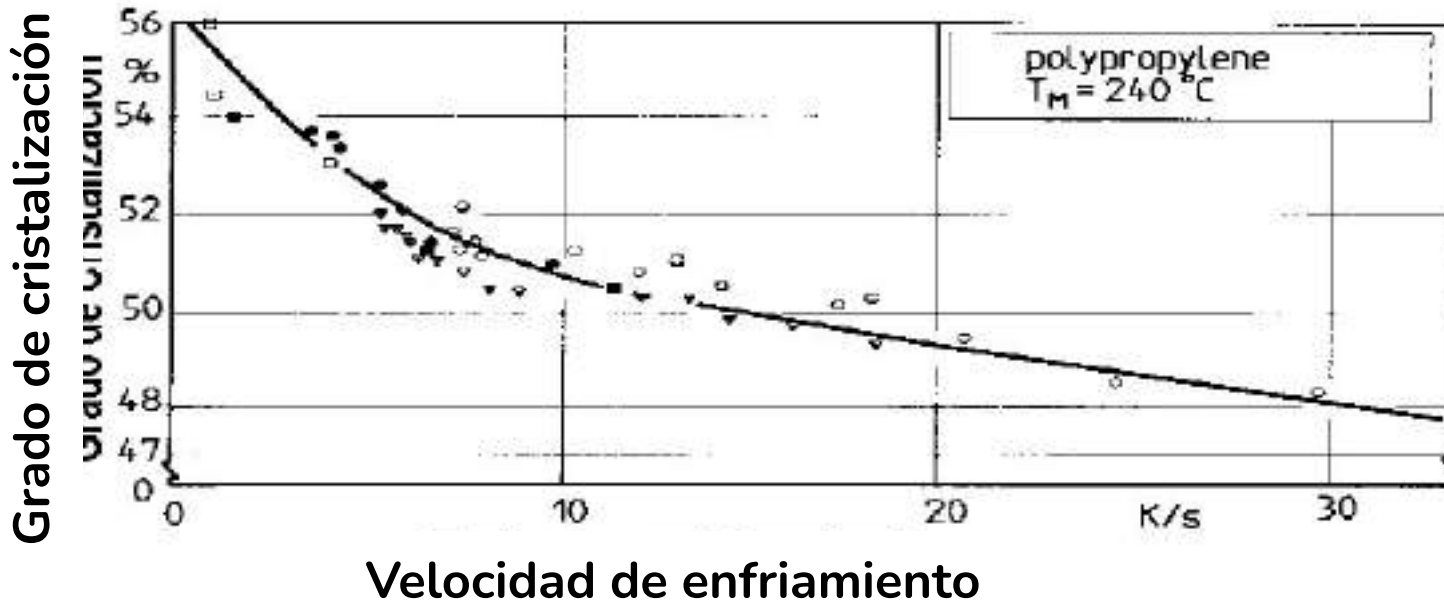
$$dT/dt = 10 \text{ K/s}$$

$$\text{densidad a } 20^{\circ}\text{C} = 0.891 \text{ g/cm}^2$$

$$\text{grado de cristalización} = 37\%$$

Control de la velocidad de enfriamiento

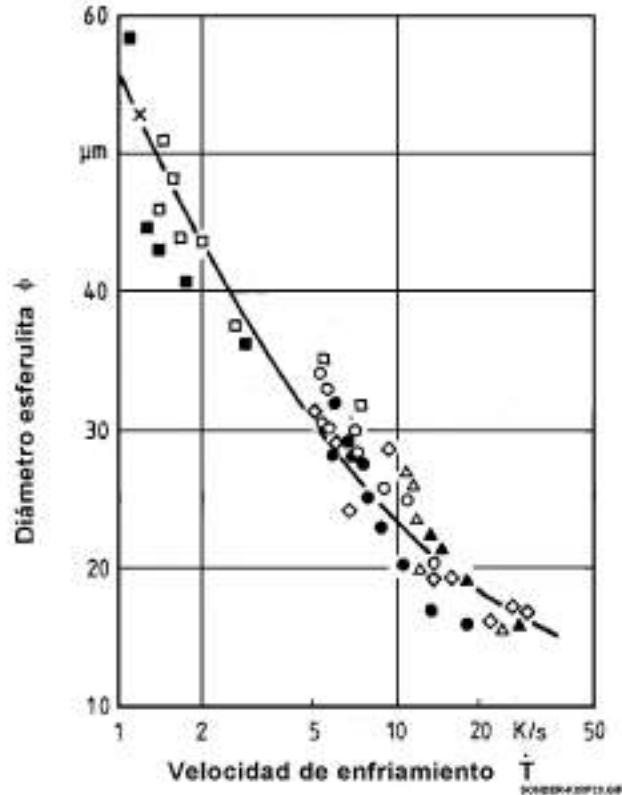
Ejemplo: Producción de películas de polipropileno



A mayor velocidad de enfriamiento se reduce el grado de cristalización del polipropileno

Control de la velocidad de enfriamiento

Ejemplo: Producción de películas de polipropileno

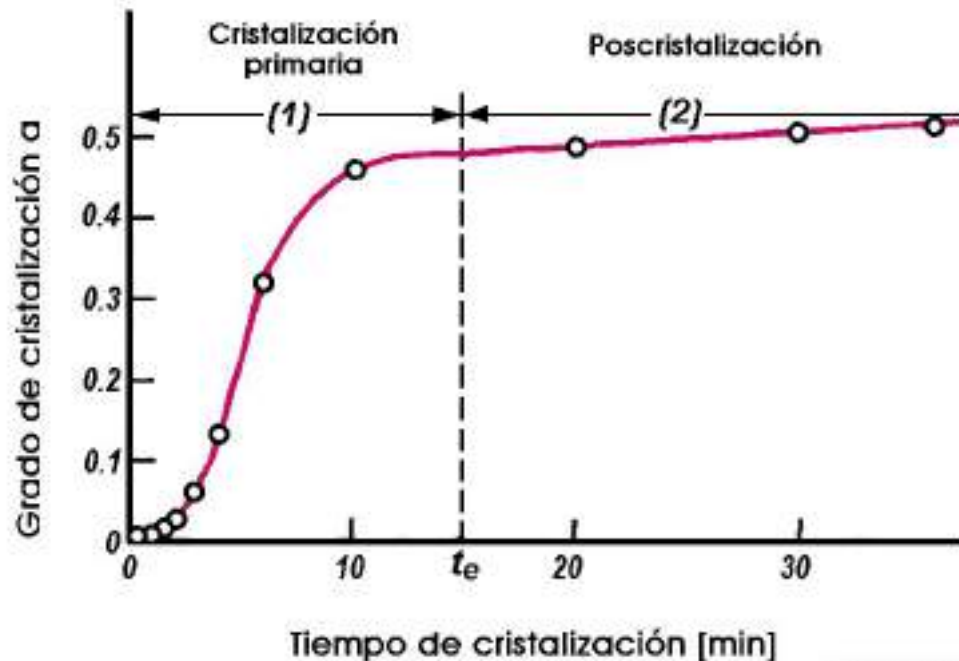


Con la velocidad de enfriamiento se puede modificar la transparencia, la resistencia al impacto, la curva esfuerzo - deformación, las propiedades de barrera, entre otros.

En general, todas las propiedades dependen del grado de cristalización.

Cristalización

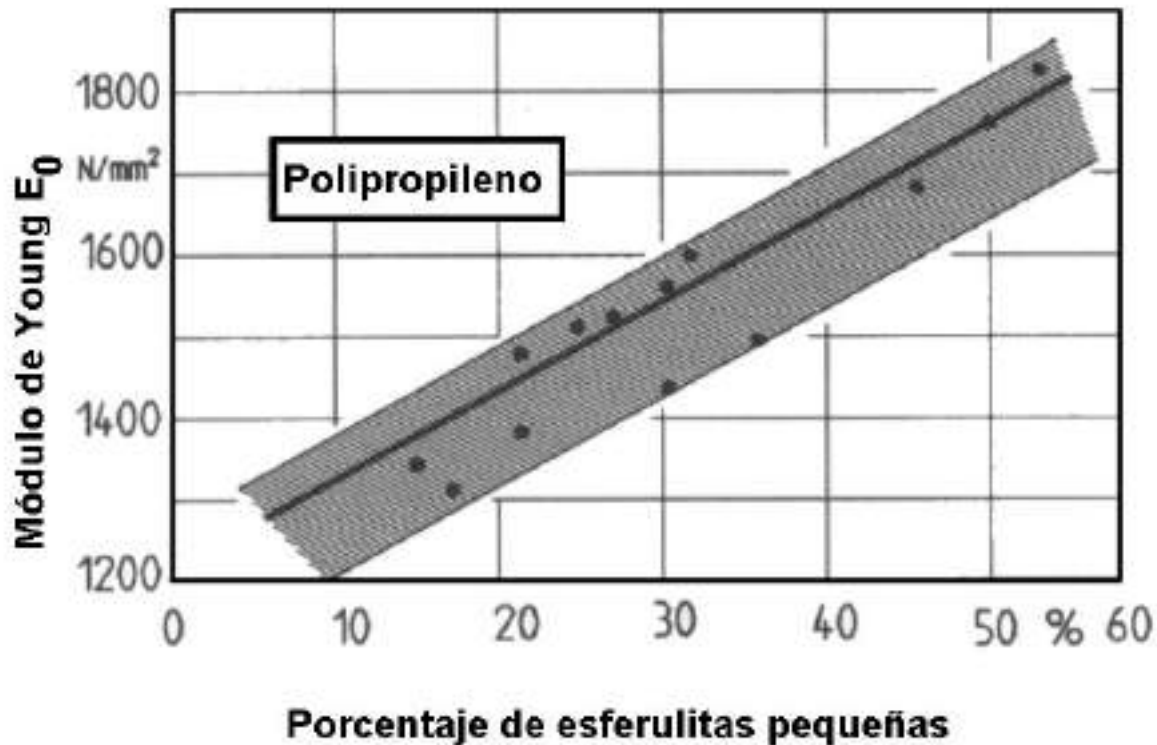
Pos-cristalización



El control de la pos-cristalización es un factor clave en la calidad del producto y reduce la aparición de problemas

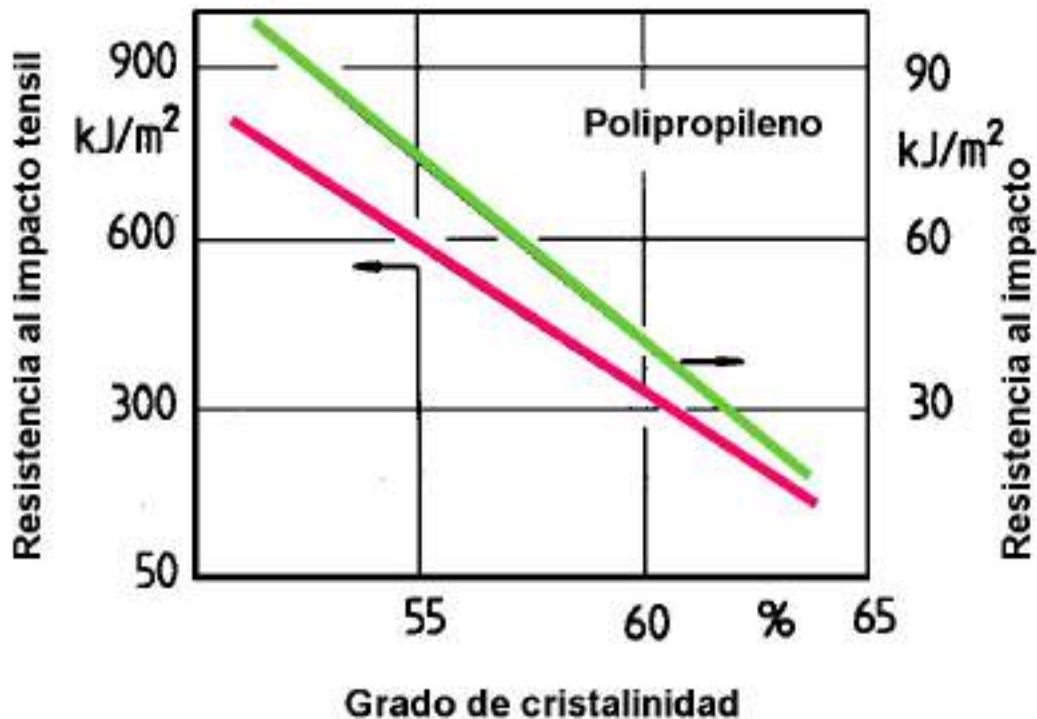


Influencia del grado de cristalización en la rigidez del PP



La rigidez aumenta con el grado de cristalización

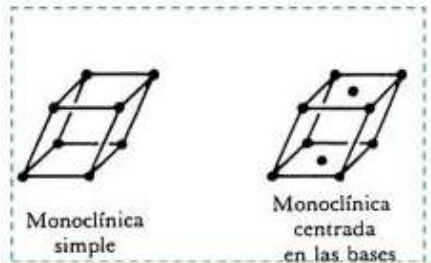
Influencia del grado de cristalización en la resistencia al impacto del PP



La resistencia al impacto disminuye con el grado de cristalización (la fracción amorfa favorece la resistencia al impacto)

El polipropileno tiene tres formas cristalinas principales:

Forma α



- No es la más estable termodinámicamente
- No la más favorecida cinéticamente
- Se presenta a muy altas y muy bajas velocidades de enfriamiento
- Presenta el mejor compromiso entre criterios cinéticos y termodinámicos por lo que es el estado más común
- Temperatura de fusión en el equilibrio $T_m^\circ = 186^\circ\text{C}$
- Densidad global a temperatura ambiente 0.946 g/cm^3
- Agentes nucleantes que favorecen este polimorfo: sorbitol, benzoato sódico y talco.



Polimorfismo

Diversidad de estructuras cristalinas

El polipropileno tiene tres formas cristalinas principales:

Forma β



- Menos estable termodinámicamente que la Forma α
- Mayor velocidad de crecimiento cristalino que la Forma α
- La formación de los polimorfos y la relación cuantitativa entre ambos están influenciadas por la cinética de cristalización o por la historia térmica aplicada
- El calentamiento transforma la estructura cristalina en Forma α a temperaturas superiores a los 110°C
- Temperatura de fusión en el equilibrio $T_m^{\circ} = 177^{\circ}\text{C}$
- Menor rigidez pero mayor resistencia al impacto y ductilidad.
- Agentes β nucleantes: El pigmento rojo γ -Quinacridona, ácido pimérico y estearato cálcico, N' - dicitclohexil - 2,6 - naftaleno - dicarboxamida, trisamidas, arilamidas, entre otros.

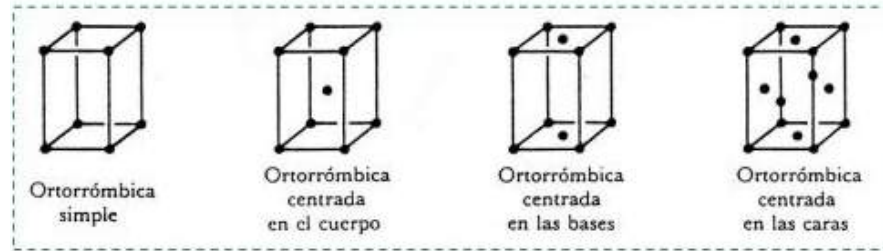


Polimorfismo

Diversidad de estructuras cristalinas

El polipropileno tiene tres formas cristalinas principales:

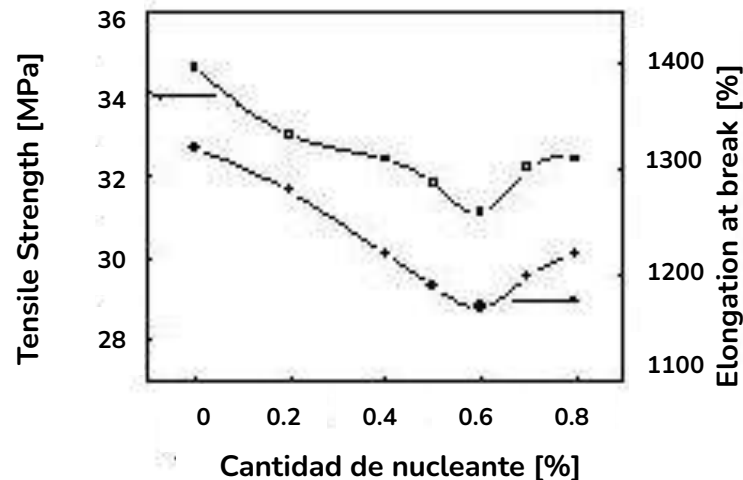
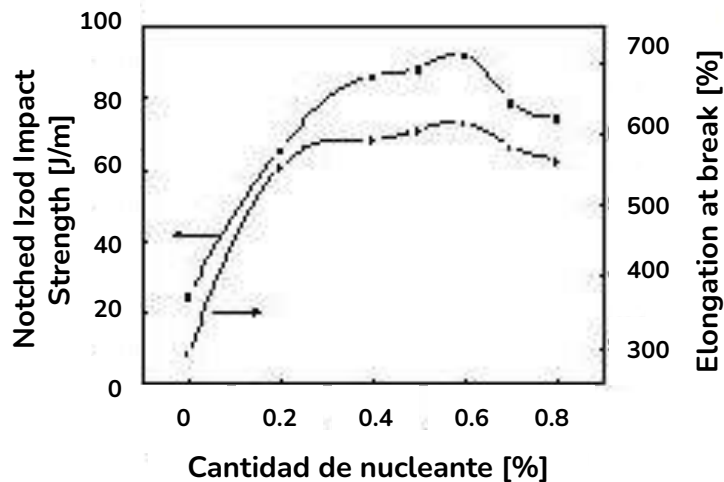
Forma γ



- En materiales con bajo peso molecular, en condiciones de alta presión, a velocidades de cristalización lentas o en cadenas con defectos regulares
- Temperatura de fusión en el equilibrio $T_m^\circ = 187.2 \text{ }^\circ\text{C}$
- La copolimerización con α -olefinas favorece su aparición

Table 2 The β phase fraction of PP and β -nucleated PP.

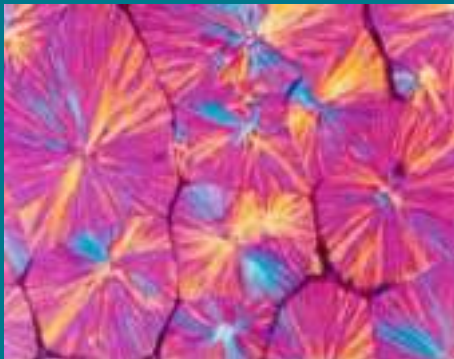
Item	amounts of β -nucleating agent/%			
	0	0.4	0.6	0.8
β - phase fraction /%	3.93	78.92	90.28	68.72



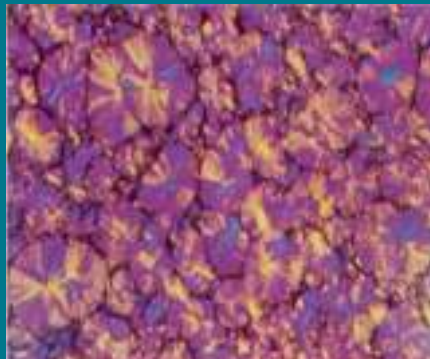
Cambios en la estructura cristalina por nucleación

La nucleación modifica el tipo y tamaño de los cristales

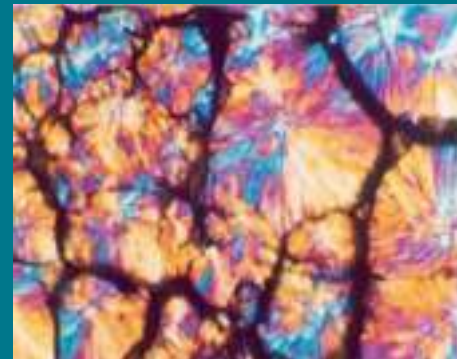
PP



PP con 1% wt. NC



PP con 5% wt. NC



NC: Nano Compuestos



Polipropileno copolímero

Copolimerización con etileno, 1-buteno y α -olefinas

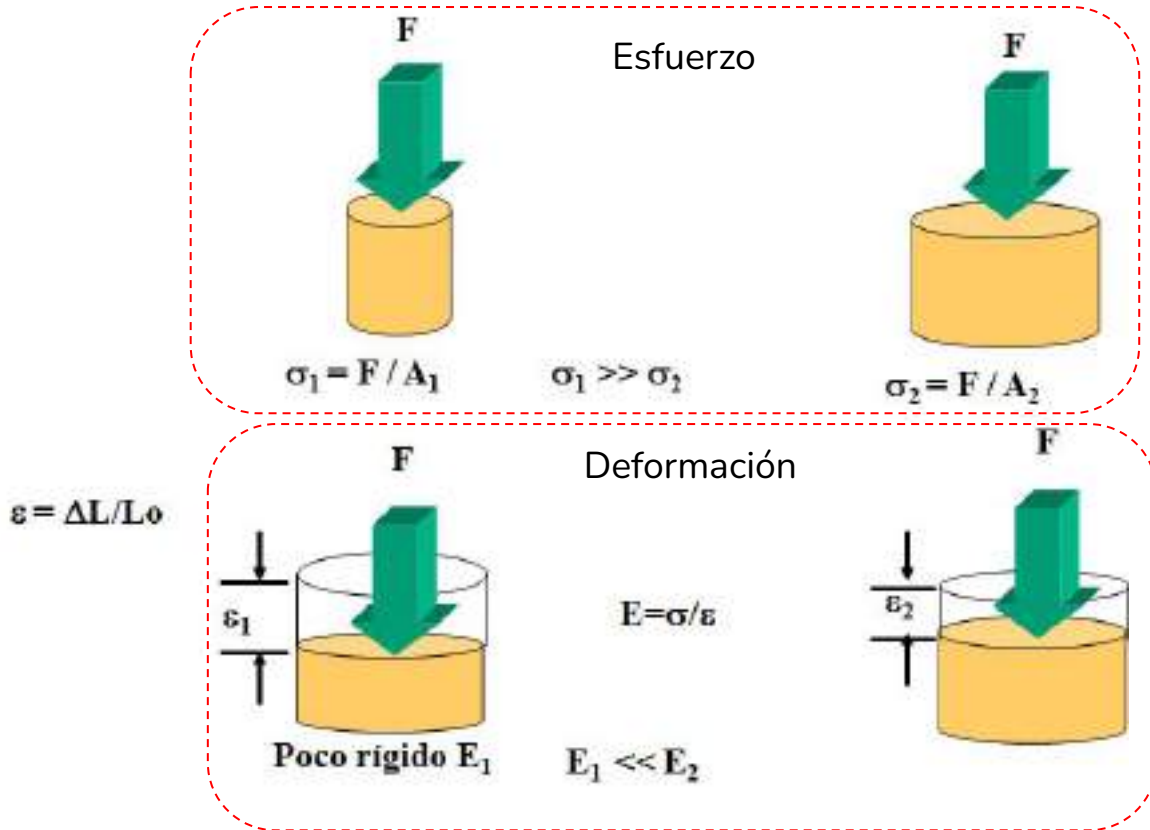
Copolímeros de bloque

- Muy alta resistencia al impacto.
- Mejores propiedades de flujo
- Menor hinchamiento en la extrusión
- Más resistentes a la radiación que el homopolímero
- Menores tiempos de ciclo en inyección (10 a 15%).
- Los tipos de distribución estrecha contraen menos y más uniformemente
- Poca transparencia, pero mejora en contacto con líquidos.
- Están enfocados a la producción de piezas plásticas por inyección



**Un pequeño concepto
antes de seguir...**

Curvas esfuerzo - deformación

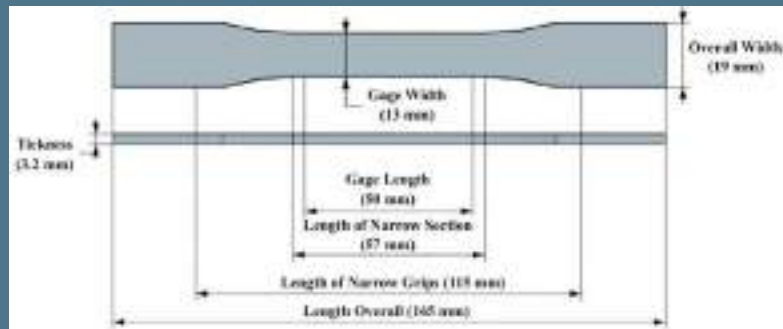


Resistencia a la tensión

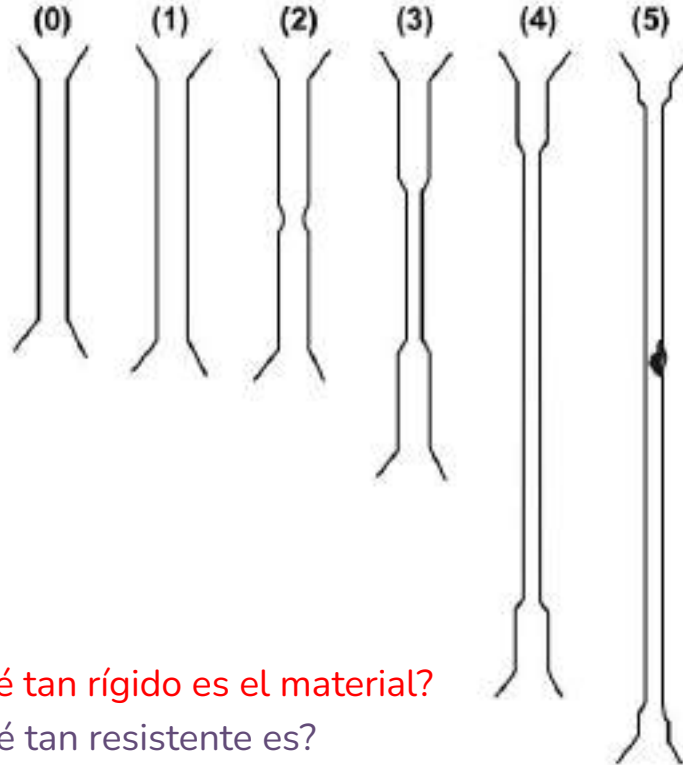
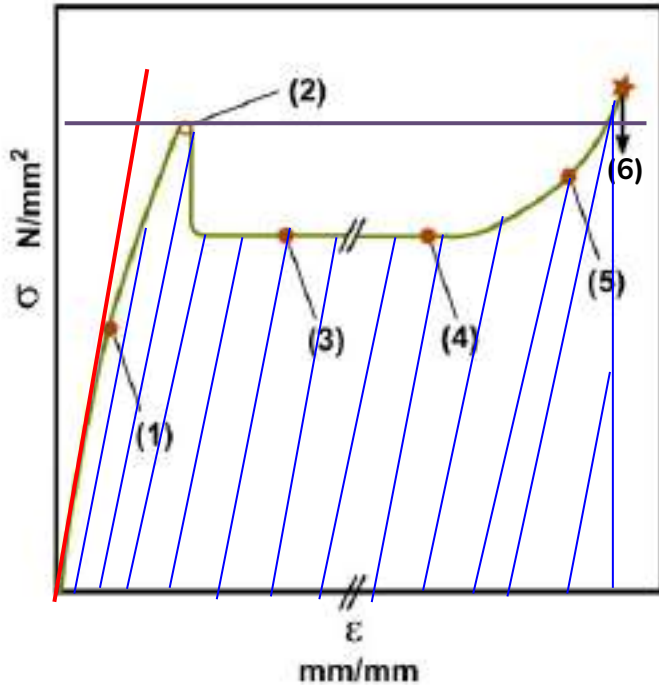


Para rígidos:

ASTM D638 e ISO 527



Curva esfuerzo - deformación



- (1) Punto en la región elástica
- (2) **Punto de cedencia (yield)**
- (3) Punto en la región plástica (**dúctil**)
- (4) Punto en la región plástica
- (5) Punto de inicio de rotura
- (6) **Punto de rotura (break)**

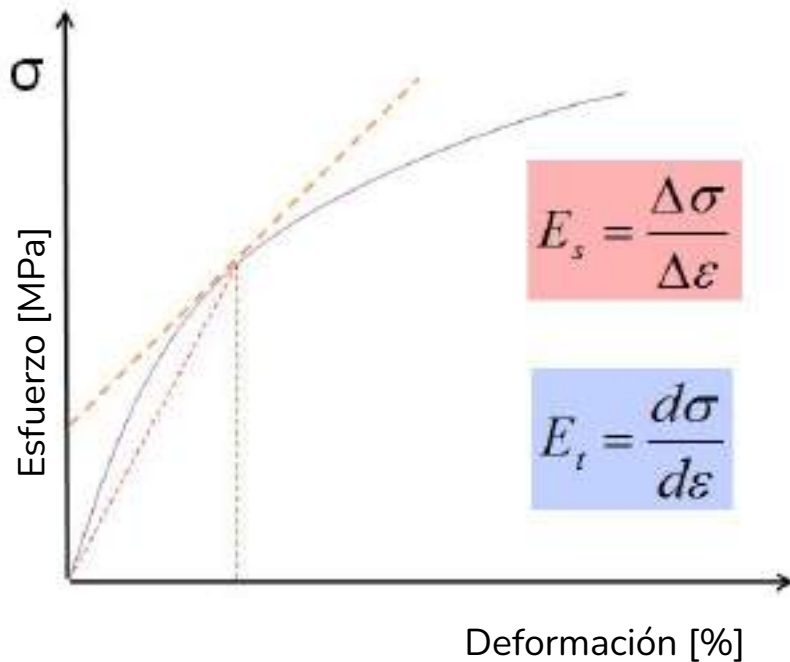
Qué tan rígido es el material?

Qué tan resistente es?

Qué tan tenaz es?



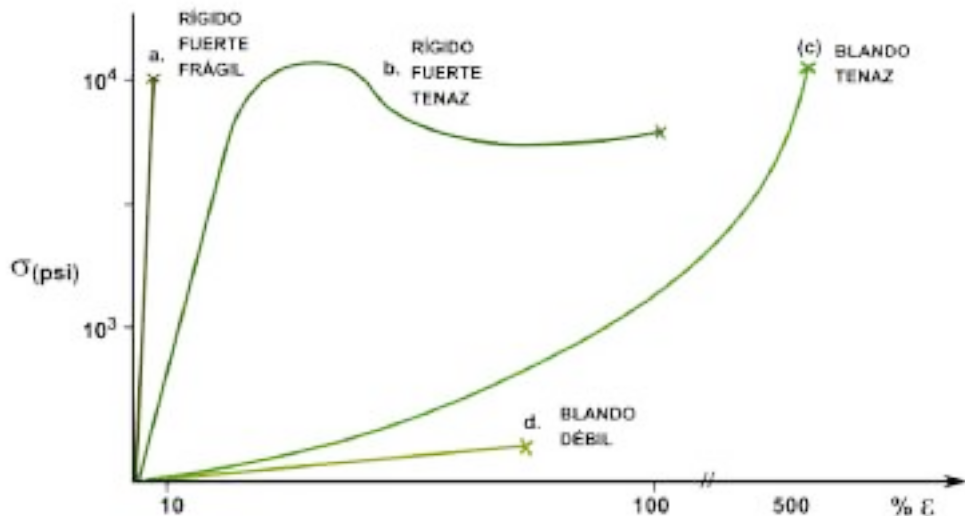
Módulo secante (E_s) y módulo tangente (E_t)



Los valores del módulo tangente y secante pueden variar en materiales con respuestas no lineales



Comportamiento del polímero en función de la curva esfuerzo-deformación



La curva esfuerzo-deformación tiene correlación con el desempeño del polímero

Mayor área bajo la curva:

- Mayor tenacidad
- Más capacidad de absorber energía

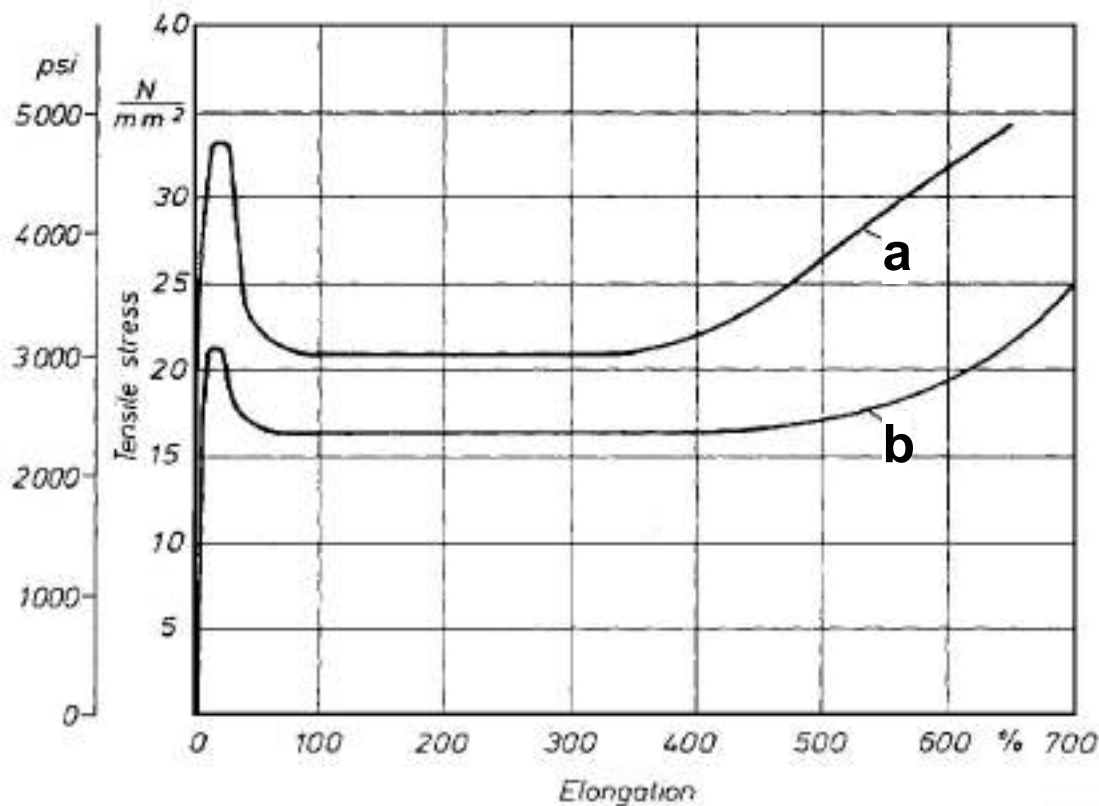




Sigamos...

Polipropileno copolímero

Copolimerización con etileno, 1-buteno y α -olefinas



a: Homopolímero
b: Copolímero de bloque



**Un pequeño concepto
antes de seguir...**

Viscoelasticidad

Sólidos ideales



<https://jnaceros.com.pe/blog/wp-content/uploads/jnaceros-acero-inoxidable-316.jpg>

Ley de Hooke (100% Elástico)

$$\sigma = E \varepsilon$$

Viscoelasticidad

σ	Esfuerzo
E	Módulo elástico
ε	Defromación
μ	Viscosidad
$\dot{\gamma}$	Velocidad de cizalladura

Líquidos ideales



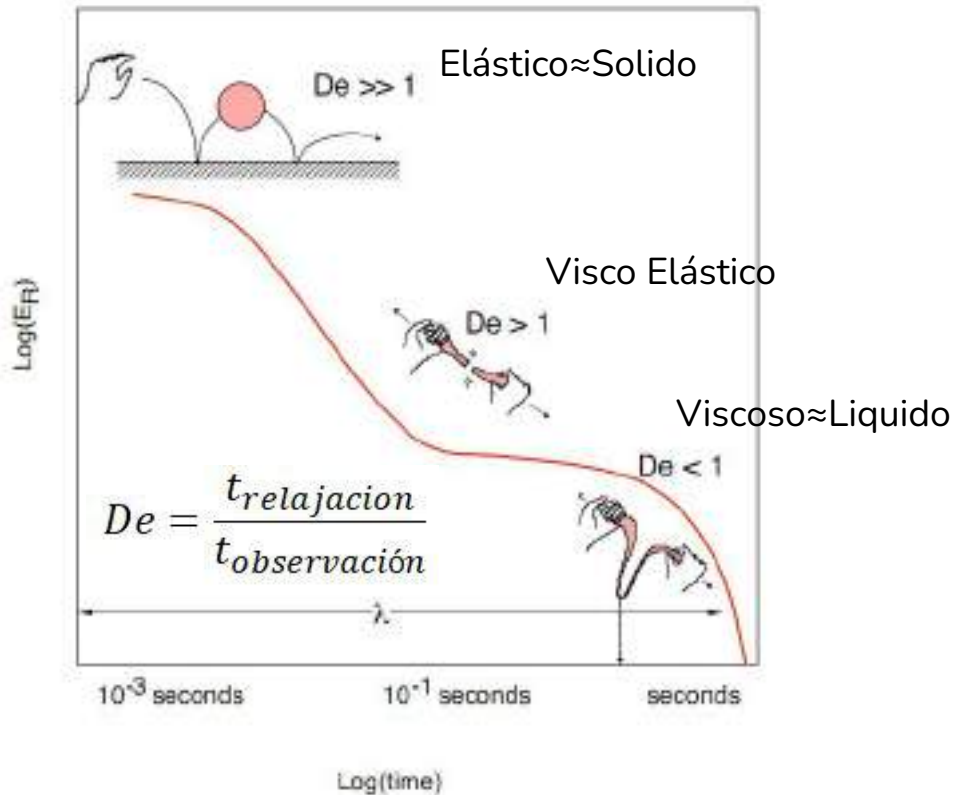
<https://www.expoknews.com/wp-content/uploads/2018/03/Una-de-CC%81cada-por-el-agua...-C2%A1a-partir-de-ahora-810x456.jpg>

Ley de Newton (100% viscoso)

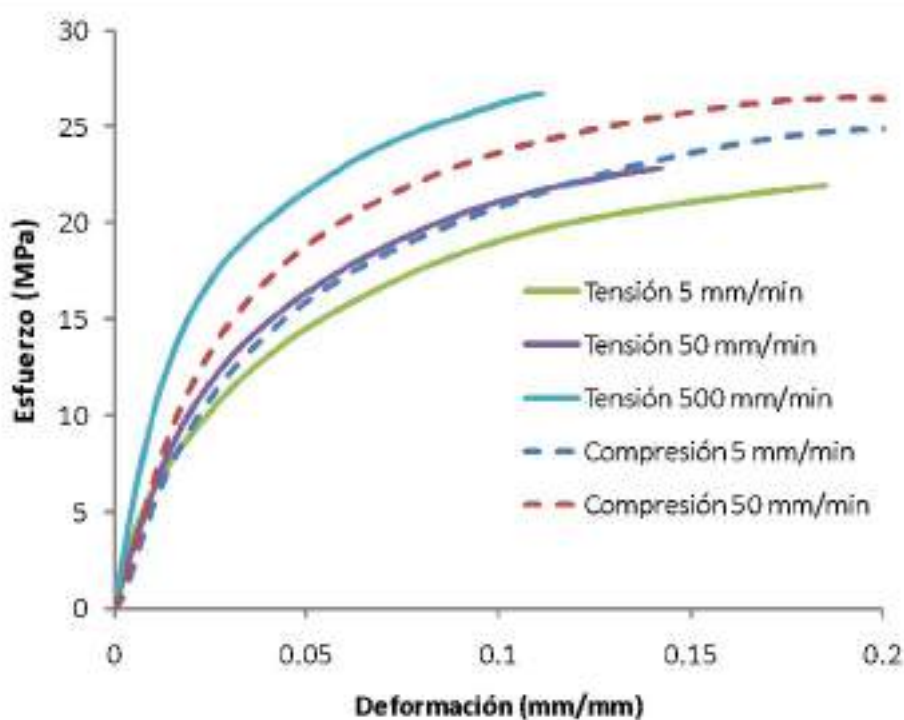
$$\sigma = \mu \dot{\gamma}$$

Viscoelasticidad

DEBORAH: La profeta de la Biblia: "Las montañas fluyeron delante del Señor" (Libro de Jueces 5:5)



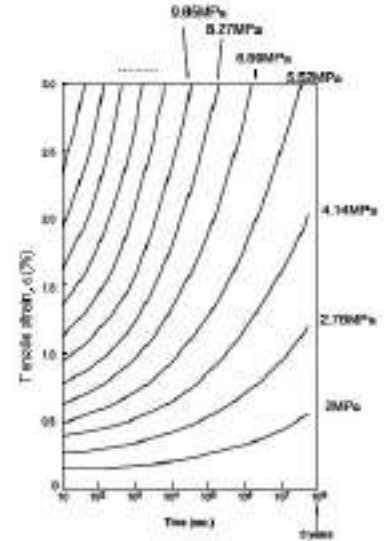
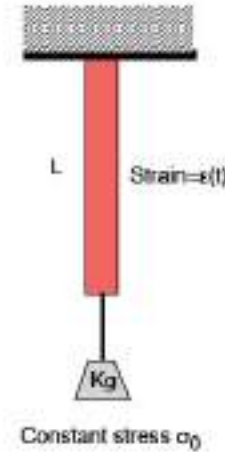
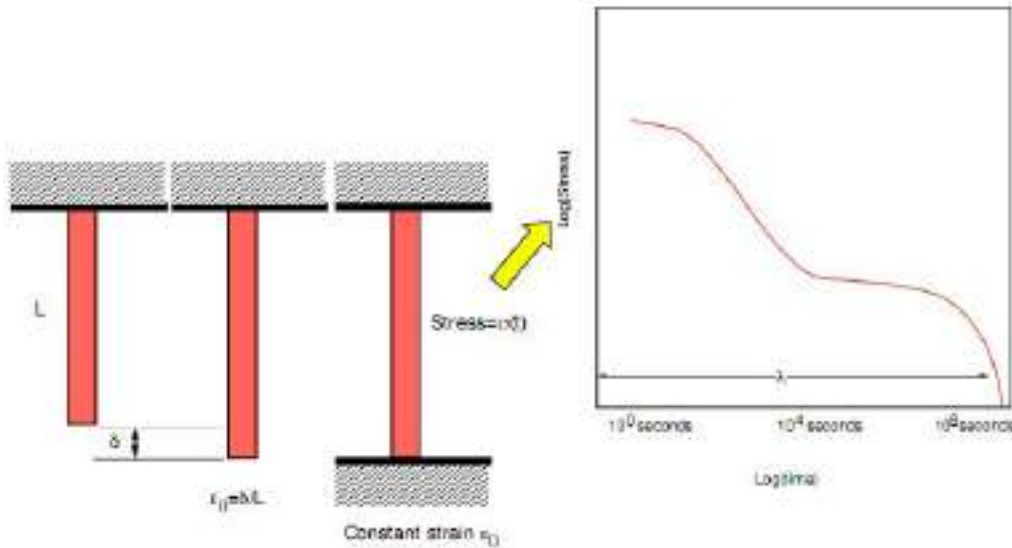
Curvas esfuerzo-deformación: dependencia de la velocidad de deformación



¡Para poder comparar las curvas esfuerzo-deformación de dos materiales, estas deben ser medidas a la misma temperatura y la misma velocidad!



Relajación y Creep



Relajación: [ASTM D2991](#)

Creep: [ASTM D2990](#)

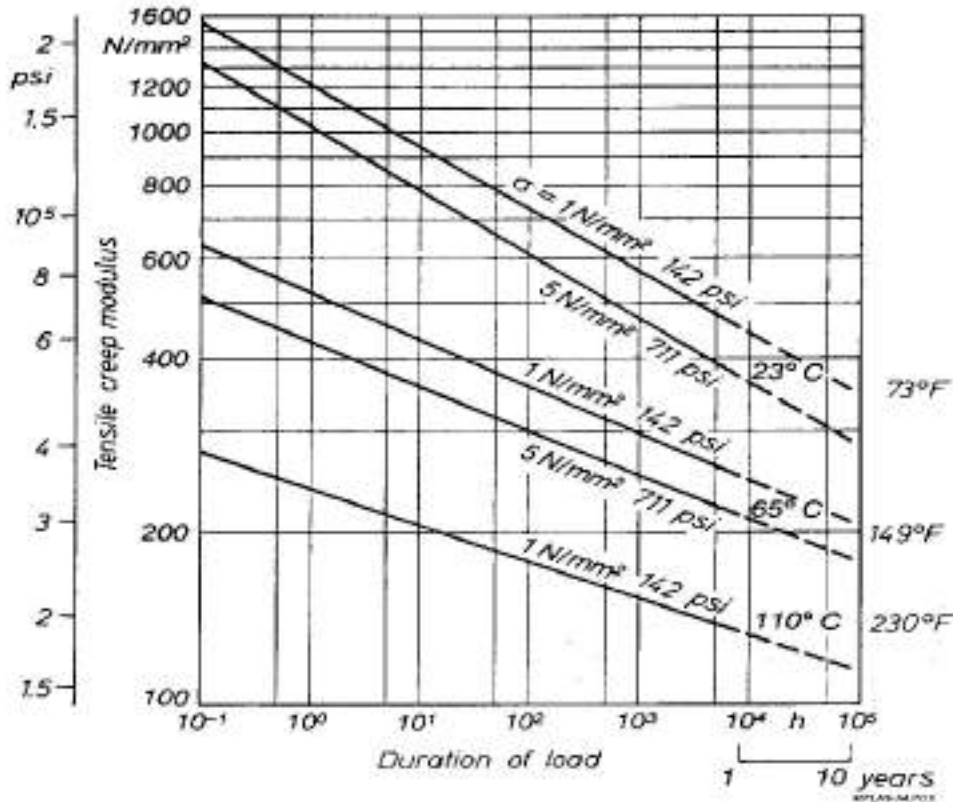


Sigamos...



Polipropileno homopolímero - Retardación

PPH 1050 Hoechst



Una pieza de polipropileno homopolímero sometida a un esfuerzo constante de 1N/mm² a 23°C, pierde el 75% de la rigidez en un año

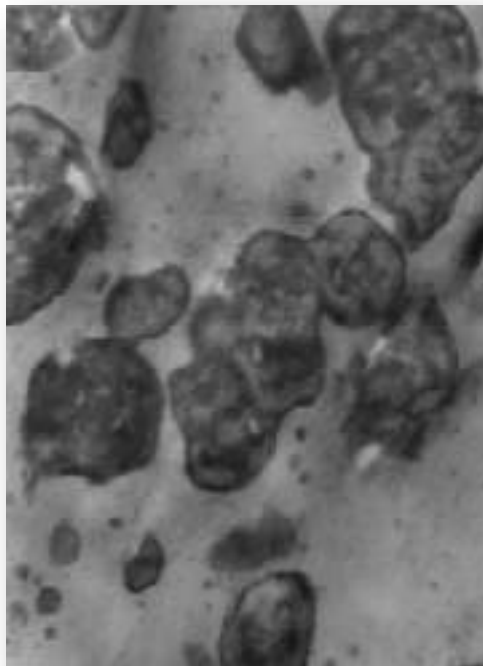


Polipropileno copolímero

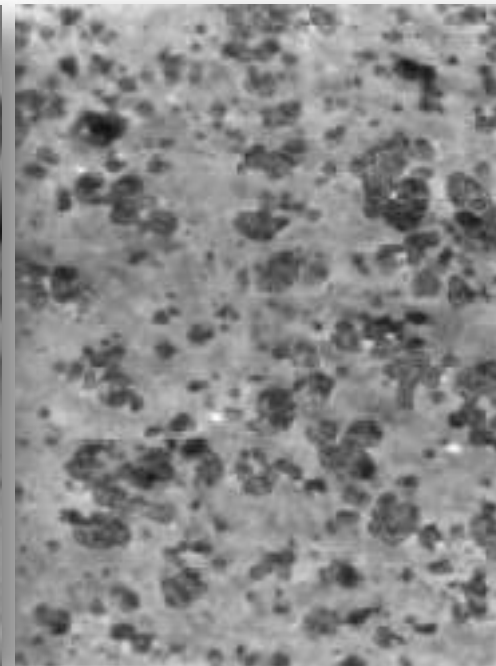
Copolimerización con etileno, 1-buteno y α -olefinas

Copolímeros de impacto

- Fase dispersa: Polipropileno copolímero de bloque
- Fase continua: Polipropileno homopolímero
- Tamaño de la fase dispersa: 0.5 a 2 μm
- Contenido de la fase dispersa: 5 - 30%
- Contenido de etileno en la fase dispersa: 40 - 60%
- Se obtiene mediante reactores en cascada



57,000X



10,000X



Polipropileno copolímero

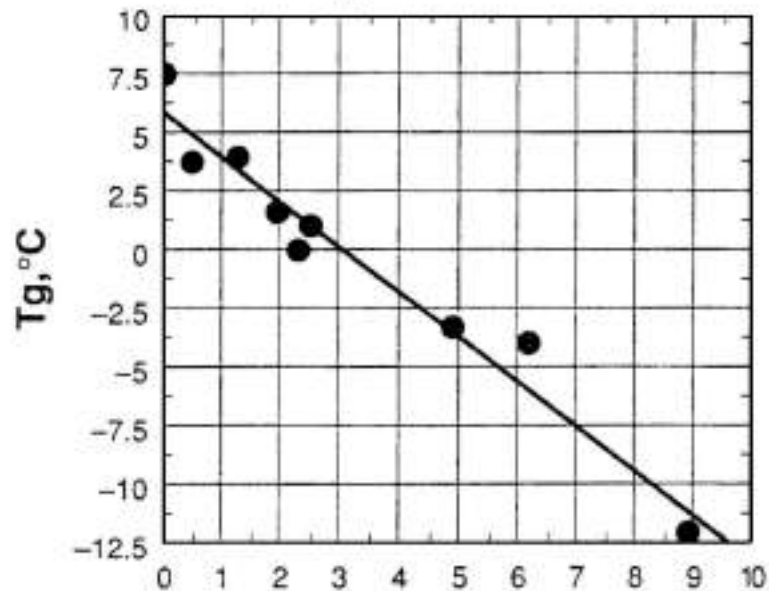
Copolimerización con etileno, 1-buteno y α -olefinas

Copolímeros de impacto

- Muy alta resistencia al impacto.
- Mejores propiedades de flujo
- Menor hinchamiento en la extrusión
- Más resistentes a la radiación que el homopolímero
- Menores tiempos de ciclo en inyección (10 a 15%).
- Los tipos de distribución estrecha contraen menos y más uniformemente
- Poca transparencia, pero mejora en contacto con líquidos.
- Están enfocados al proceso de inyección

Efecto del contenido de etileno en los copolímeros de polipropileno

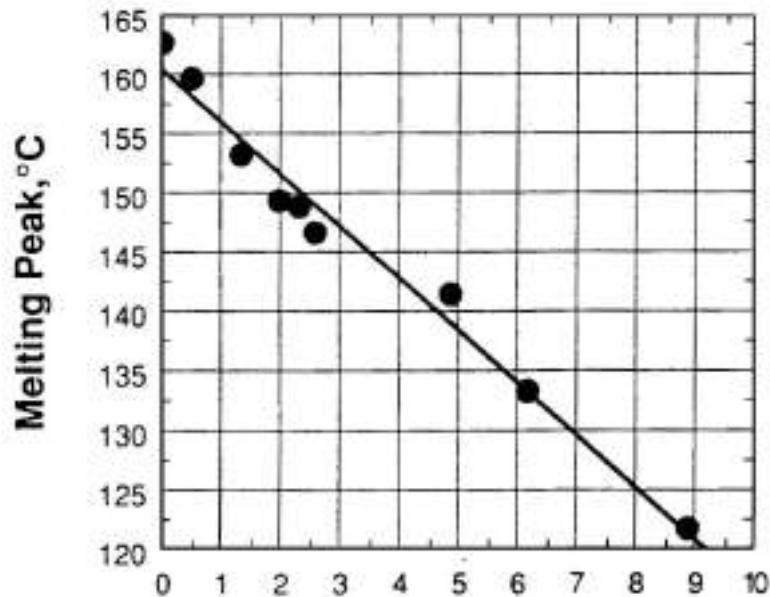
Glass Transition Temperature



ECU-F22.JPG-12/98

Wt. Percent Ethylene

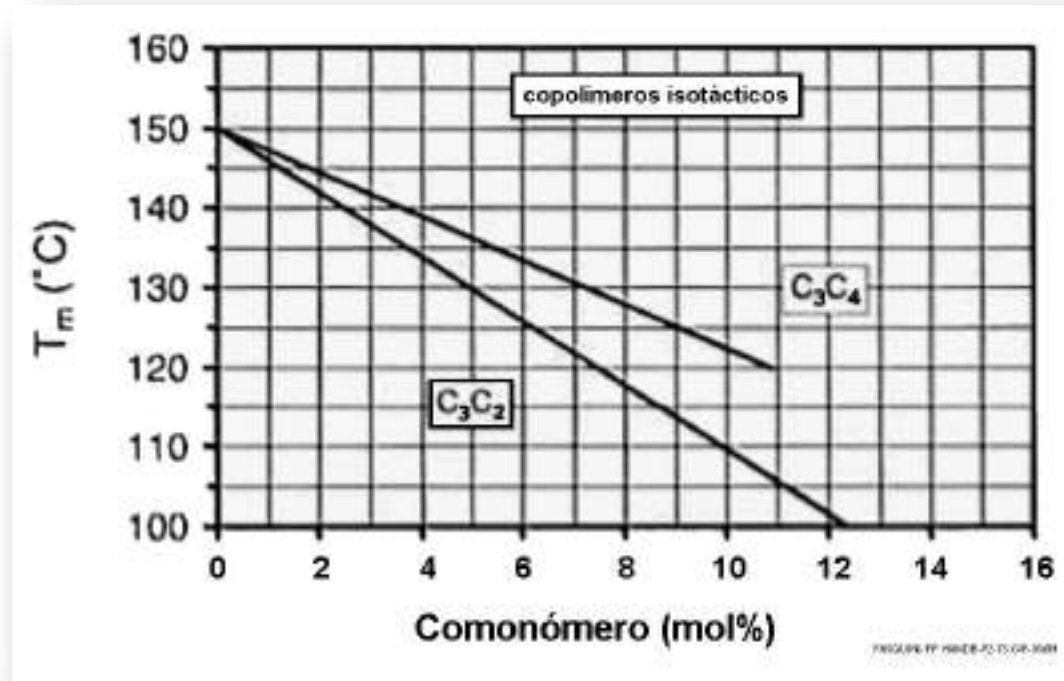
Melting point



ECU-F21.JPG-12/98

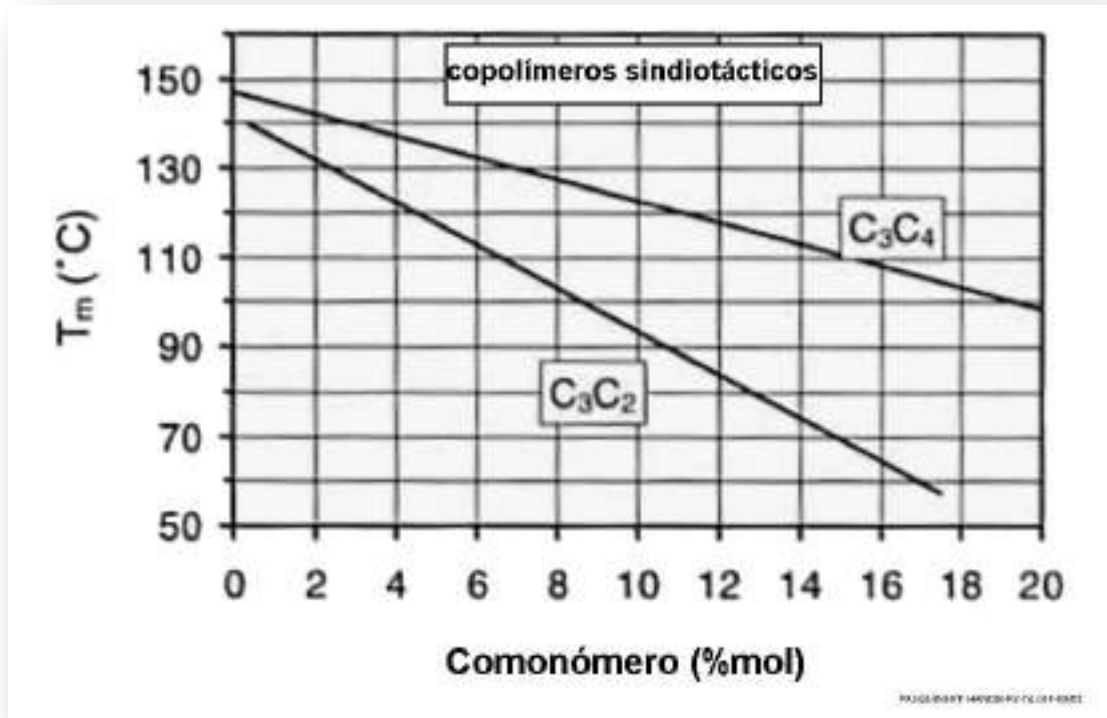
Wt. Percent Ethylene

Influencia del contenido molar de comonomero (etileno y 1-buteno) en un PP isotáctico



El contenido de comonomero de etileno tiene un efecto mayor sobre la reducción de la temperatura de fusión.

Influencia del contenido molar de comonomero (etileno y 1-buteno) en un PP sindiotáctico



El contenido de comonomero de etileno tiene un efecto mayor sobre la reducción de la temperatura de fusión.



Polipropileno copolímero

Copolimerización con etileno, 1-buteno y α -olefinas

Copolímeros random

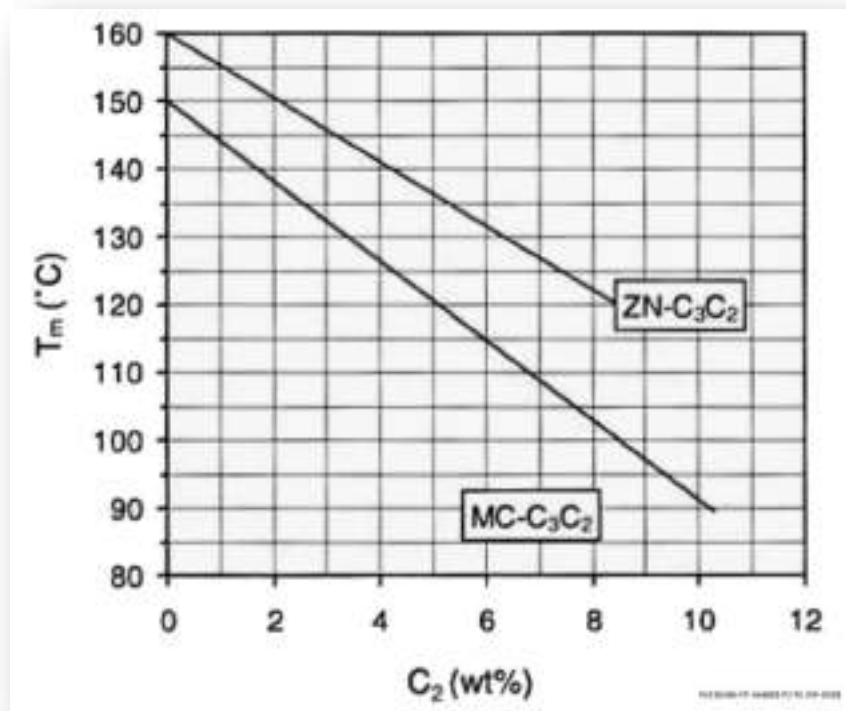
- Alta transparencia
- Menor cristalinidad
- Mejor resistencia al impacto que el PP-H
- Baja temperatura de fusión (145°C - 155°C)
- Contenido de etileno inferior al 8%

Aplicaciones

- Película sellable
- Envases transparentes
- Artículos para aplicaciones médicas
- Mangueras flexibles



Influencia del contenido de comonómero (etileno) en un i-PP random con diferentes catalizadores

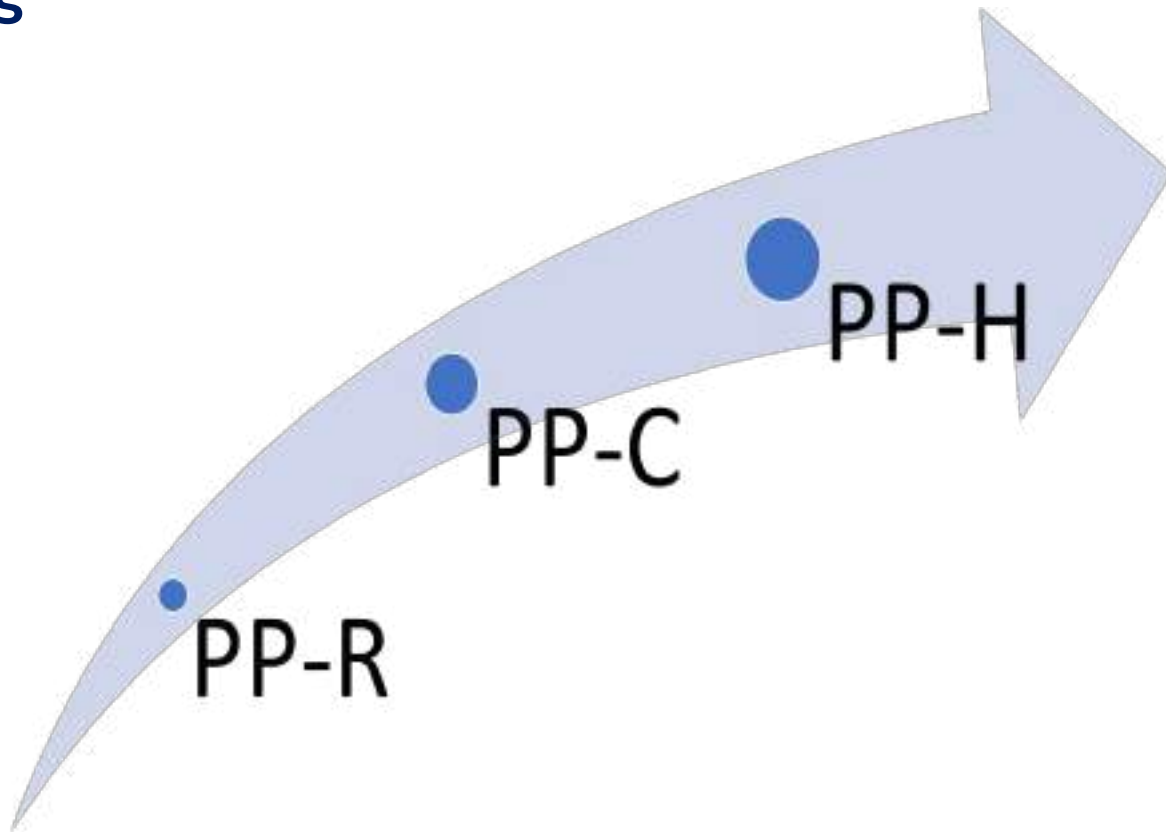


El contenido de etileno tiene un efecto mayor sobre la reducción de la temperatura de fusión sobre el PP catalizado con metallocenos.



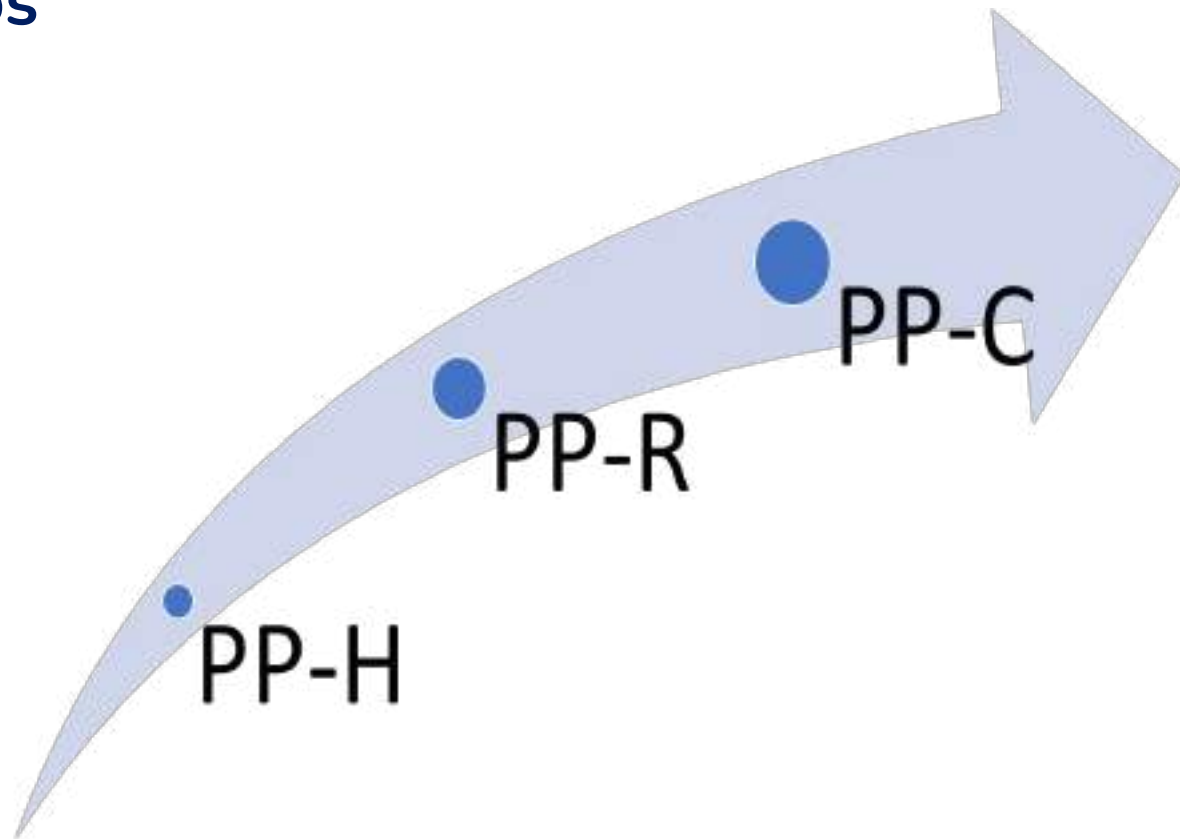
Sentido de aumento de las propiedades de los polietilenos

- Módulo de elasticidad (600 a 1800 MPa)
- Esfuerzo de cedencia (18 a 38 MPa)
- Temperatura de uso continuo (90 a 100°C)
- HDT - Temperatura de deflexión bajo carga (68-120°C)



Sentido de aumento de las propiedades de los polietilenos

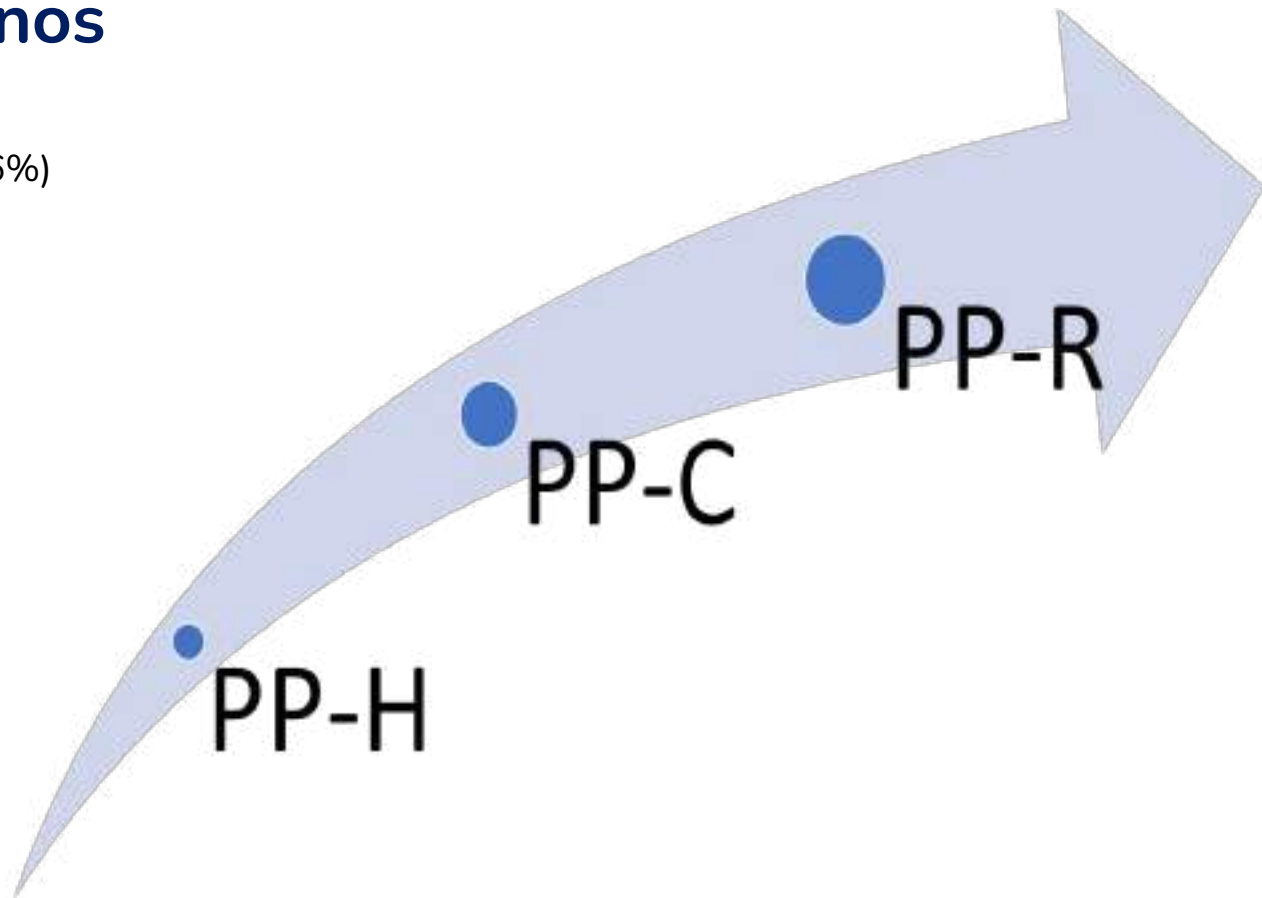
- Resistencia al impacto
Charpy con ranura a 24°C
(4 a 12 kJ/m²) y Izod (70 a
500 J/m)





Sentido de aumento de las propiedades de los polietilenos

- Transparencia (47 a 96%)



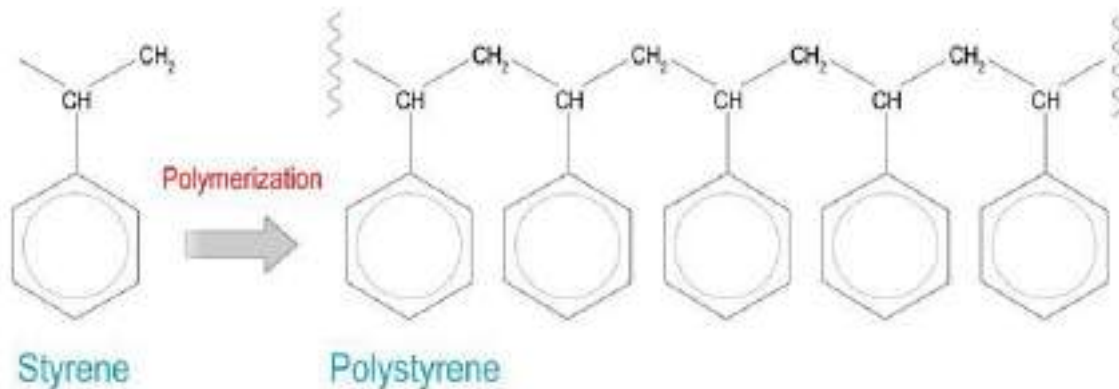
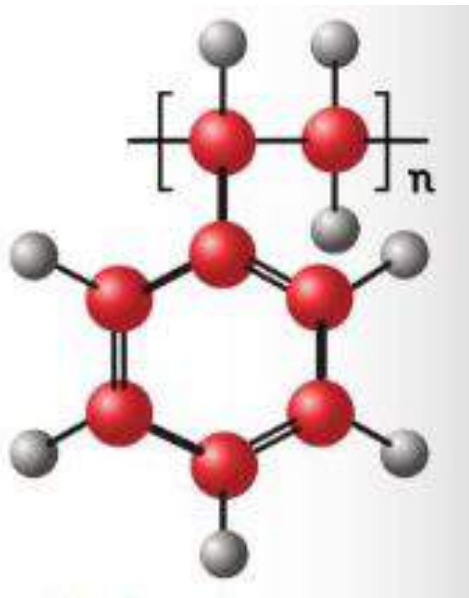


PROPIEDADES, USOS Y APLICACIONES DE LOS POLIESTIRENOS Y SUS COPOLÍMEROS



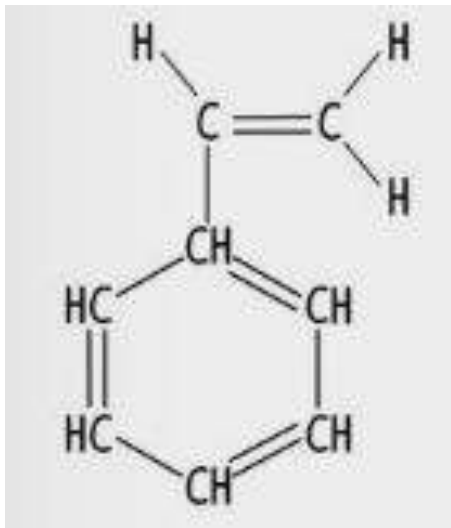
Poliestireno

Se obtiene de la polimerización del estireno

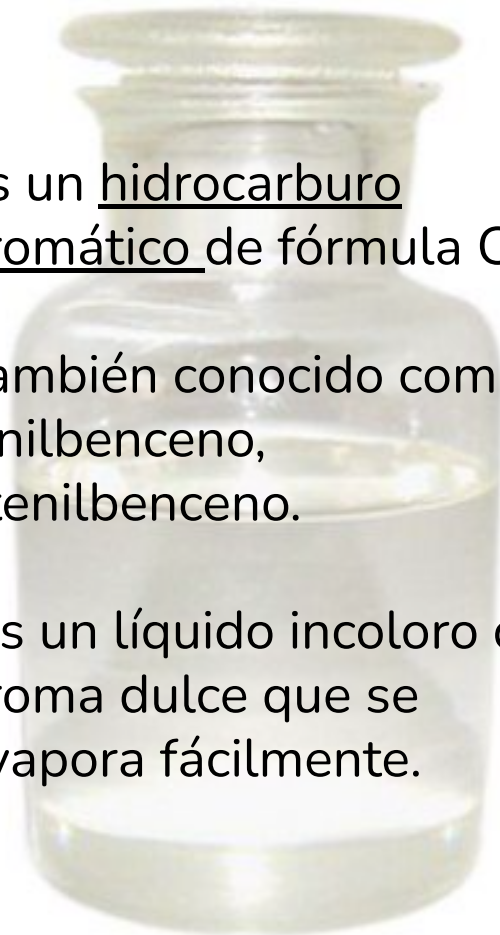


Desarrollado por DOW en 1937 y popularizado por sus buenas propiedades ópticas y dieléctricas

Estireno

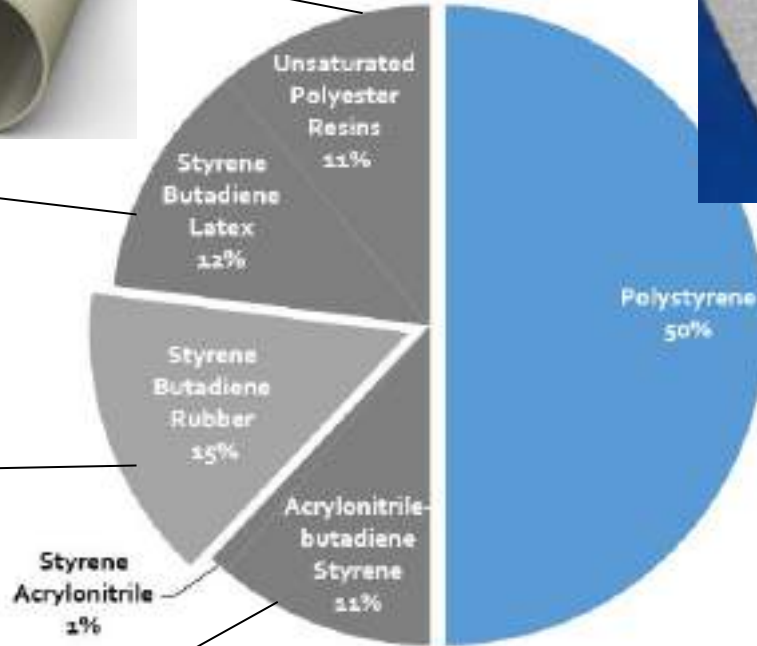
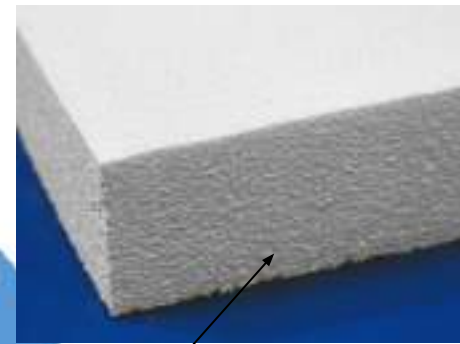


- Es un hidrocarburo aromático de fórmula C_8H_8 .
- También conocido como vinilbenceno, etenilbenceno.
- Es un líquido incoloro de aroma dulce que se evapora fácilmente.





Estireno



<https://www.pyrowave.com/>

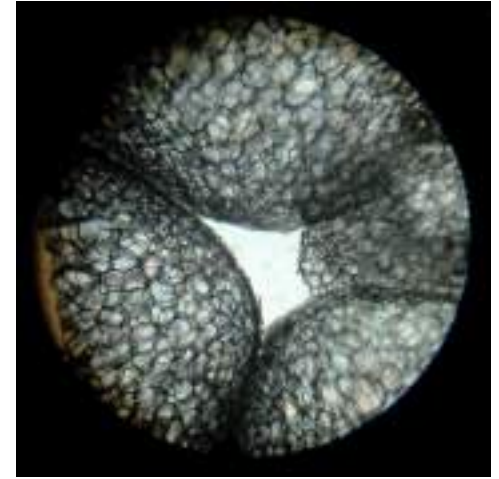
Cerca del 50% de su producción es para fabricación de PS. El 15% para caucho sintético (principalmente neumáticos), el látex sintético (12%) y el ABS (11%).



Poliestireno Expandido



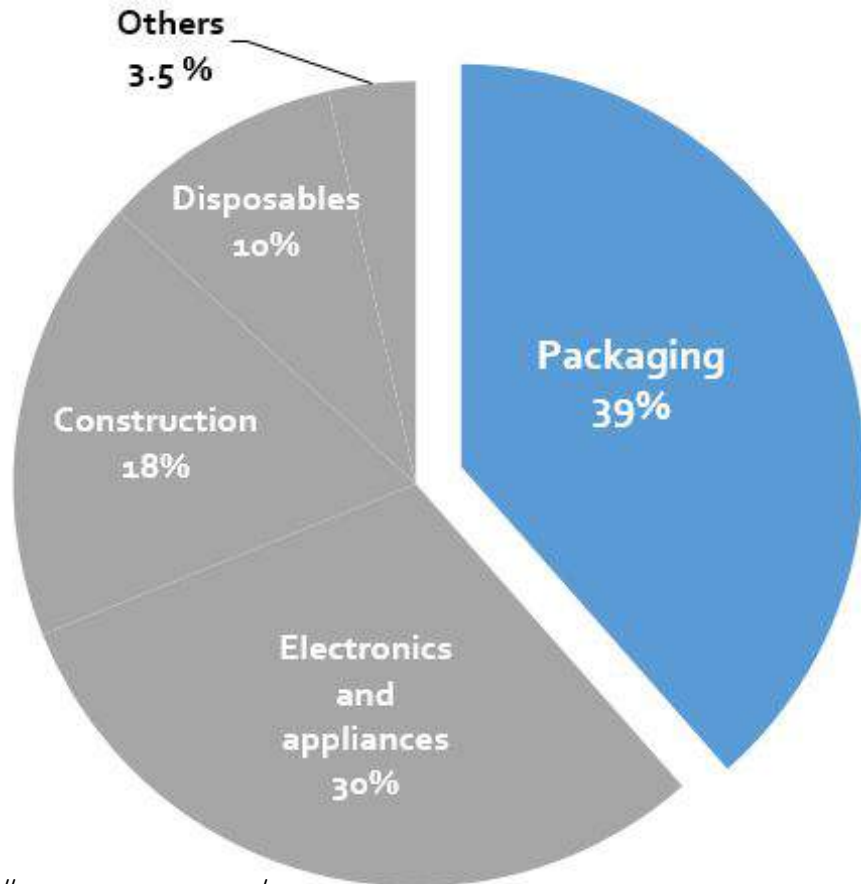
PS + Ciclopentano



[https://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene#/media/File:Microscopic_Section_of_Thermocol_block_\(Under_light-microscope,_bright-field,_Objective_10_X,_Eyepiece_10_X\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene#/media/File:Microscopic_Section_of_Thermocol_block_(Under_light-microscope,_bright-field,_Objective_10_X,_Eyepiece_10_X).jpg)



Poliestireno



El sector de empaques ocupa una gran parte del mercado de PS (39%), un 30% es para los productos electrónicos y electrodomésticos y el sector de la construcción tiene un 18%.



Aplicaciones del PS-expandido



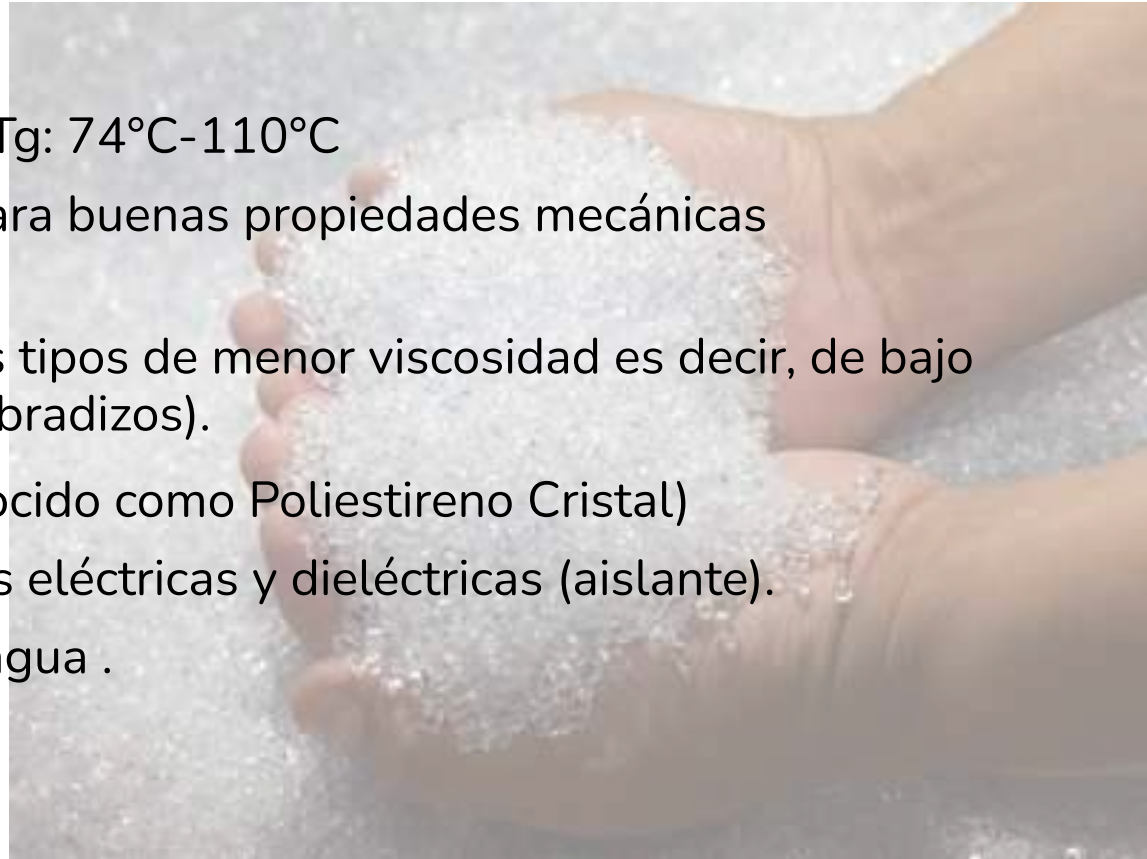
- Embalaje
- Aislamiento
- Neveras portatiles
- Desechables
- Paneles
- Rellenos para alivianar piezas.





Propiedades generales del PS

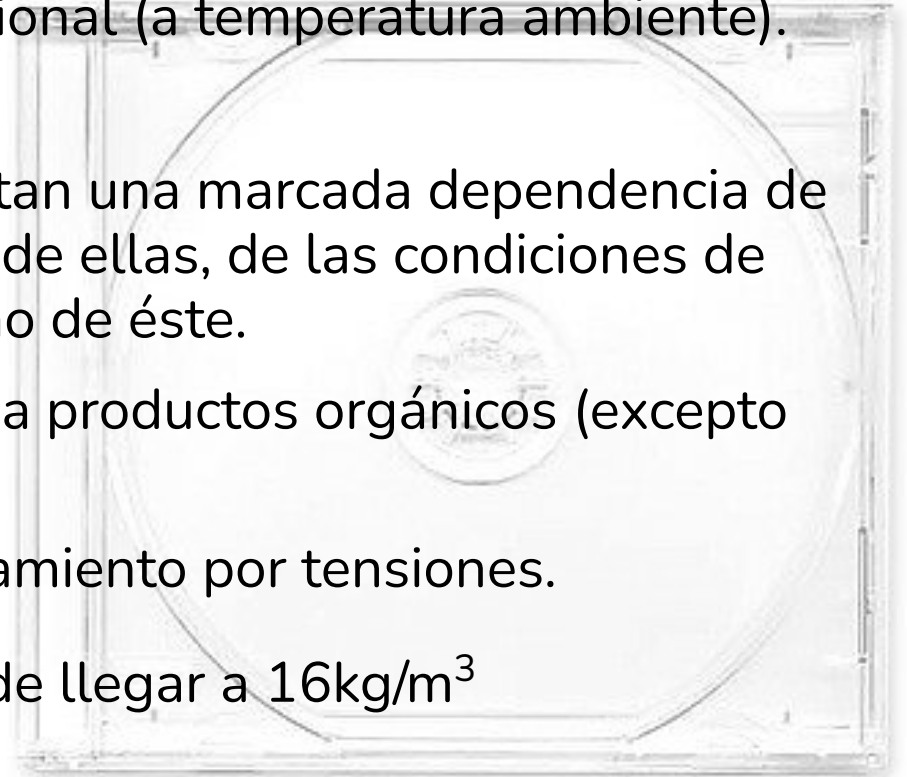
- Densidad: $1,05 \text{ g/cm}^3$
- Temp. Transición Vítrea T_g : 74°C - 110°C
- Peso molecular crítico para buenas propiedades mecánicas
 - M_w 80 000 g/mol
- Alta rigidez y dureza (los tipos de menor viscosidad es decir, de bajo peso molecular, son quebradizos).
- Alta transparencia. (conocido como Poliestireno Cristal)
- Muy buenas propiedades eléctricas y dieléctricas (aislante).
- Muy poca absorción de agua .
- Superficie muy brillante.





Propiedades generales del PS

- Magnífica estabilidad dimensional (a temperatura ambiente).
- Fácil procesamiento.
- Las piezas inyectadas presentan una marcada dependencia de sus propiedades, de la forma de ellas, de las condiciones de llenado del molde y del diseño de éste.
- Resistencia química limitada a productos orgánicos (excepto algunos aceites y grasas).
- Tendencia marcada al agrietamiento por tensiones.
- En su versión espumada puede llegar a 16kg/m^3

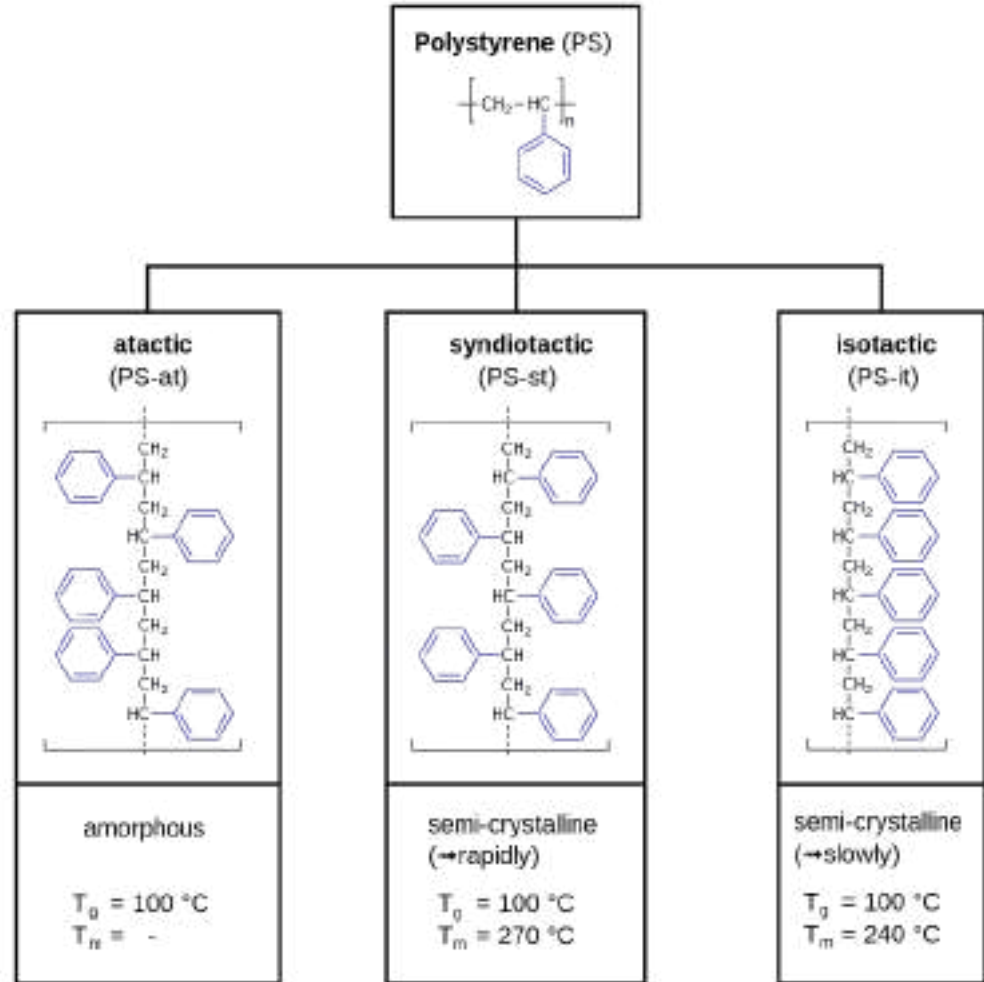


Poliestireno: Tacticidad

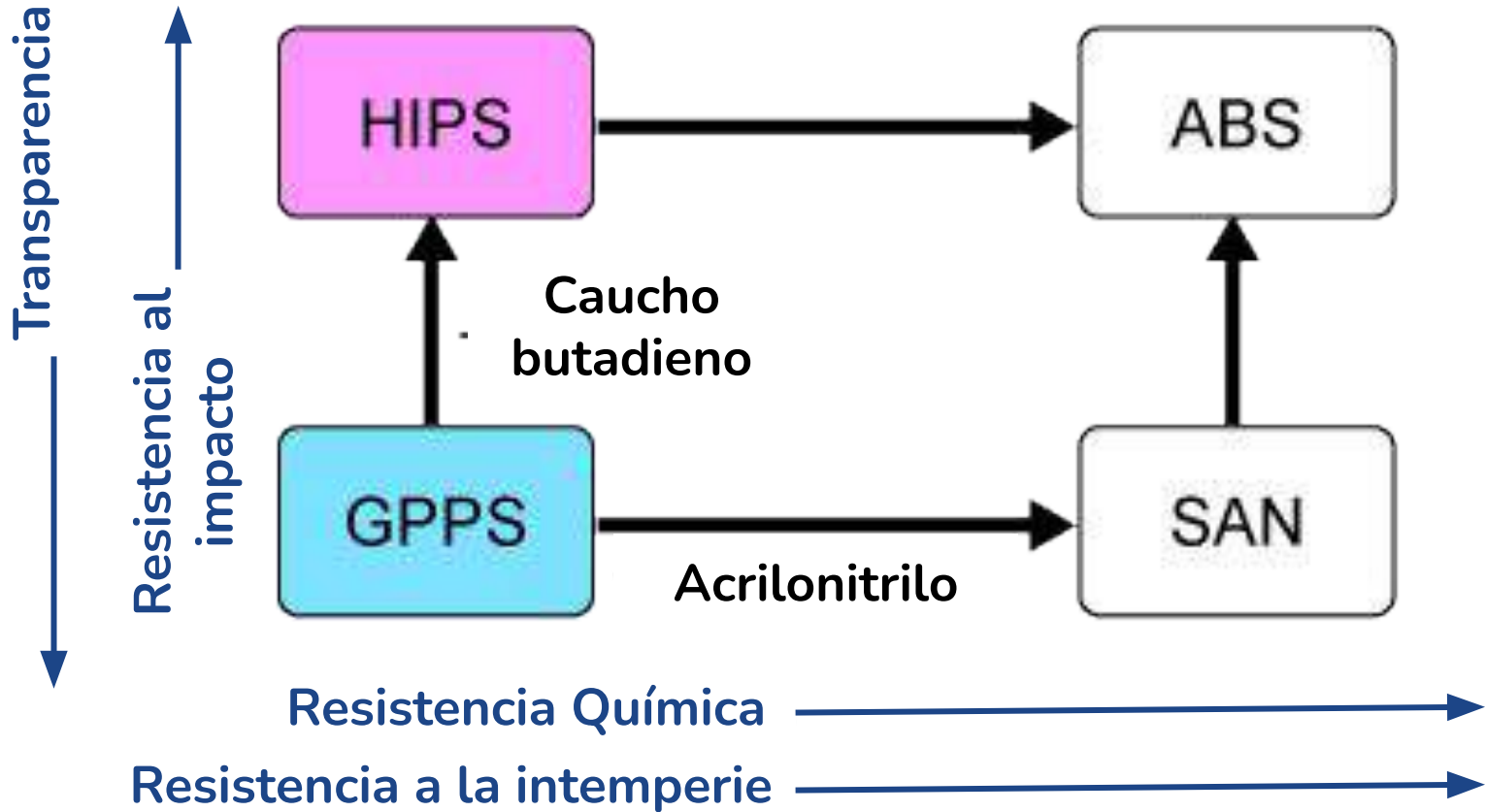
El s-PS y el i-PS son semicristalinos, mientras que el a-PS es amorfo.

El s-PS tiene alta velocidad de cristalización, alta cristalinidad y se considera un polímero de altas prestaciones.

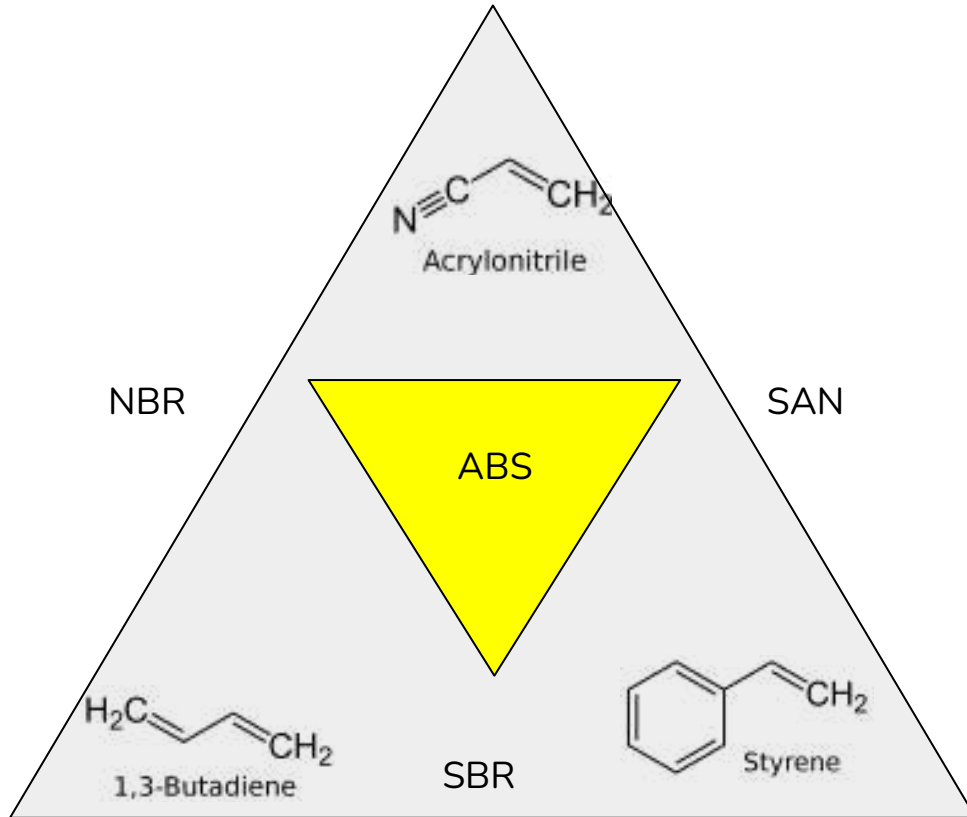
El i-PS es un polímero de ingeniería pero no se produce comercialmente.



Copolímeros del estireno



Familia de los Estirénicos



Acrylonitrilo: Aporta rigidez, resistencia a ataques químicos, resistencia a la intemperie, estabilidad a alta temperatura, dureza y transparencia.

Butadieno: Aporta tenacidad a cualquier temperatura, resistencia al impacto y resistencia a bajas temperaturas.

Estireno: Aporta resistencia mecánica y rigidez.



PS y sus copolímeros

PS:

Copolímeros del PS:

- Estireno co α -metil-estireno(SMS)
- Estireno co metil metacrilato (SMMA)
- Estireno co anhídrido maléico (SMA)
- Estireno/acrilonitrilo(SAN)

Resistentes al impacto:

- Estireno/polibutadieno (SB)
- Copolímeros de bloque SB (SB, SBS, BSB)
- Poliestireno de alta impacto HIPS
- Acrilonitrilo/butadieno/estireno (ABS)
- Acrilonitrilo/estireno/caucho acrílico (ASA)

Copolímeros del estireno

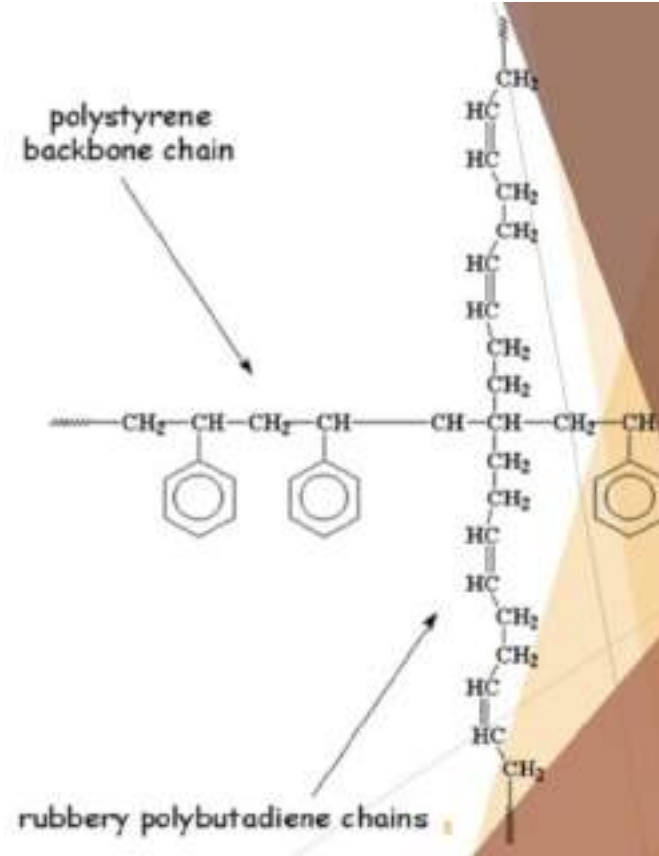
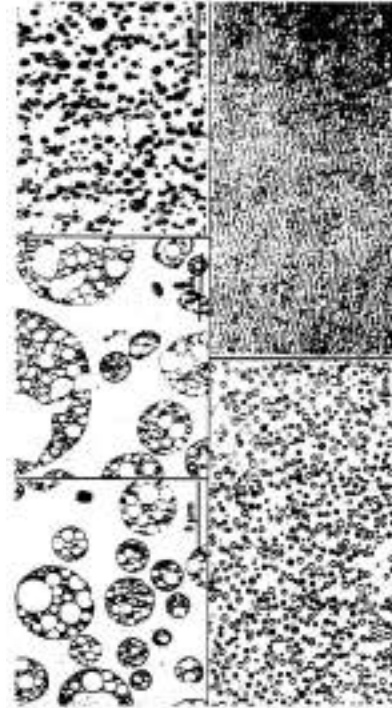
Comparación de propiedades

Propiedad	PS	SAN	S/B	ABS	ASA
Resistencia mecánica	+	++	0,-	0	-
Rigidez (módulo E)	+	++	-	0	-
Resistencia al impacto con entalla	--	-	+	++	+
Temperatura de uso continuo	-	++	-	+	+
Fragilidad en frío	-	0	+	++	++
Dilatación térmica	+	0	+	-	-
Transparencia	++	+	-	--	-
Aislamiento eléctrico	++	0	+	-	--
Resistencia a las corrientes parasitarias	--	-	+	++	++
Absorción de agua	++	0	+	-	-
Resistencia a la bencina	--	0	--	0	0
Sensibilidad de tensofisuración	-	+	-	++	++
Envejecimiento en intemperie	S/B	ABS	PS	SAN	SAN
Mezclas posibles con		ASA		ASA	ABS
Precio	++	0	+	-	--

Poliestireno de Alto Impacto (HIPS)

Propiedades

- Sistema heterofásico: matriz continua de poliestireno y una fase de caucho (SB) dispersa.
- Densidad: $1,04\text{g/cm}^3$
- Excelente termoformabilidad
- Excelente imprimibilidad
- Temperatura de uso continuo $60\text{-}80^\circ\text{C}$
- Buena resistencia al Impacto



Poliestireno de Alto Impacto (HIPS)

Aplicaciones

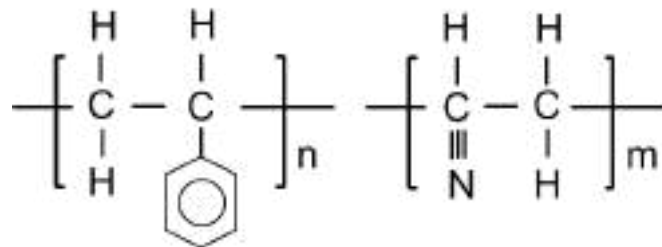
- Juguetes
- Embalajes
- Artículos para el hogar
- Piezas de electrodomésticos
- Interior de neveras
- Artículos desechables para catering
- Envases para lácteos
- Laminas publicitarias
- Envases termoformados



Estireno - Acrilonitrilo (SAN)

Propiedades

- Mayor rigidez y dureza
- Mejor resistencia a cambios de temperatura
- Mayor tenacidad
- Mejor resistencia química contra aceites, grasas y aromáticos
- Mayor resistencia al agrietamiento por tensiones
- Menores propiedades eléctricas como aislante
- Mayor absorción de agua
- Su color es ligeramente amarillo (traslúcido). Por ello se le suministra en tonalidades transparentes ligeramente azules para mejorar su apariencia





SAN

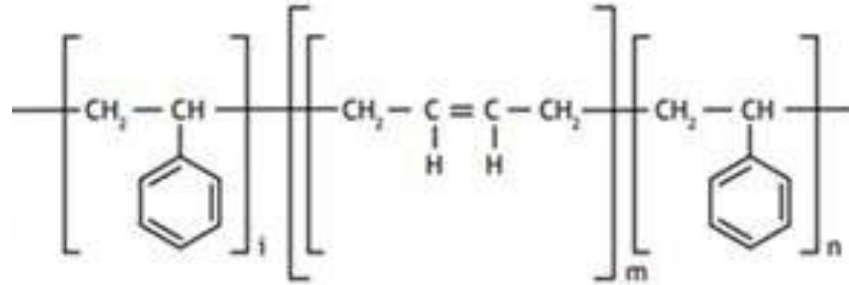
Aplicaciones

- Empaques para alimentos, drogas y cosméticos
- Cuerpos o carcasas de aparatos
- Ruedas de contadores y mirillas
- Aparatos telefónicos
- Reglas e implementos de dibujo
- Luces traseras de automóviles
- Vajillas para el Hogar
- Bolígrafos
- Soportes de filtro para cafeteras etc.

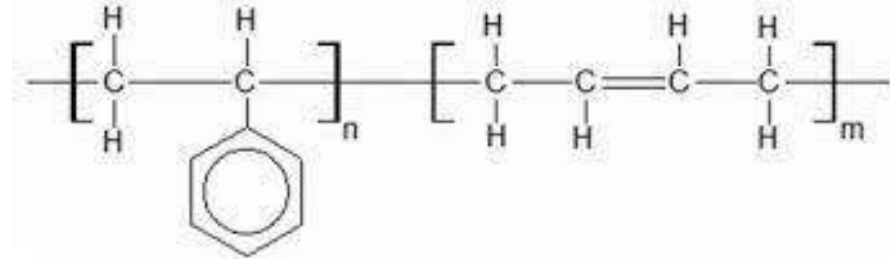


Copolímeros de bloque estireno- butadieno y estireno-butadieno-estireno

- Se consideran elastómeros termoplásticos.
- Alta resistencia al impacto
- Opacidad (excepto nuevos tipos transparentes)
- Mayor tendencia a absorber agua que el PS
- Más resistencia al agrietamiento por tensiones
- No es resistente a la intemperie



SBS



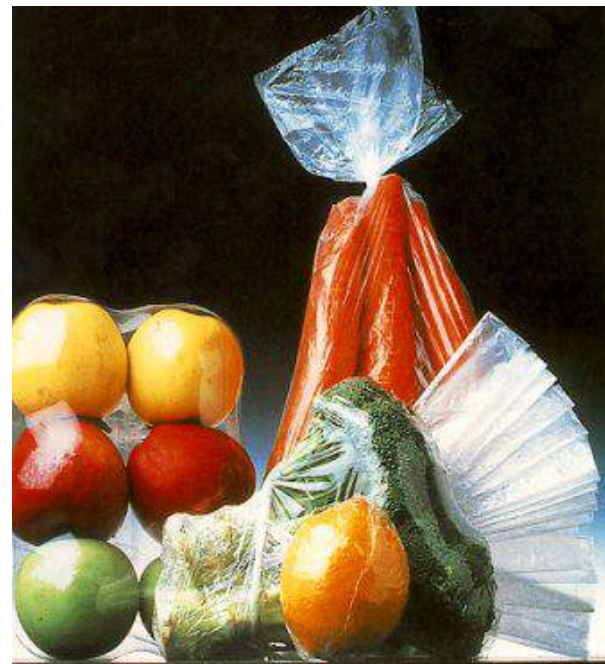
SB



SB - Estireno - Butadieno

Aplicaciones

- Envases desechables para alimentos y drogas
- Implementos de oficina
- Envases para cosméticos
- Cajas de máquinas y aparatos electrodomésticos
- Conos para hilos
- Canales de ventilación en automóviles
- Muebles pequeños
- Juguetes
- Películas similares al papel

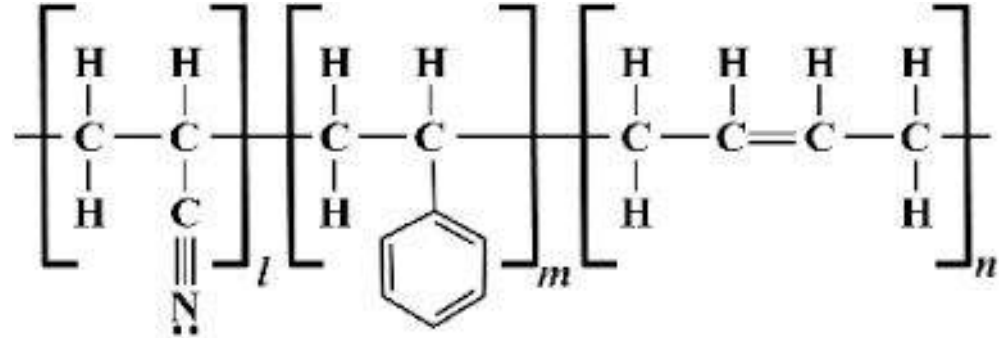


Acrilonitrilo-butadieno-estireno ABS

5 a 10 veces mayor resistencia al impacto que el PS

- **Tipos:**

- Polimerización de injerto de estireno con acrilonitrilo en látex de polibutadieno.
- Mezcla del copolímero de injerto y el SAN
- Material Heterofásico: Matriz dura: SAN. Fase dispersa: partículas de caucho Butadieno con injertos de SAN poli(Butadieno-g-(Estireno-co-Acrilonitrilo))



- **Diferencias con el SB:**

- Con bajo contenido de AN se asemeja al SB.
- Con AN 15% ya lo supera en impacto, resistencia a grasas
- Diferenciable claramente con contenidos de AN entre el 20% y el 35%



ABS

Aplicaciones

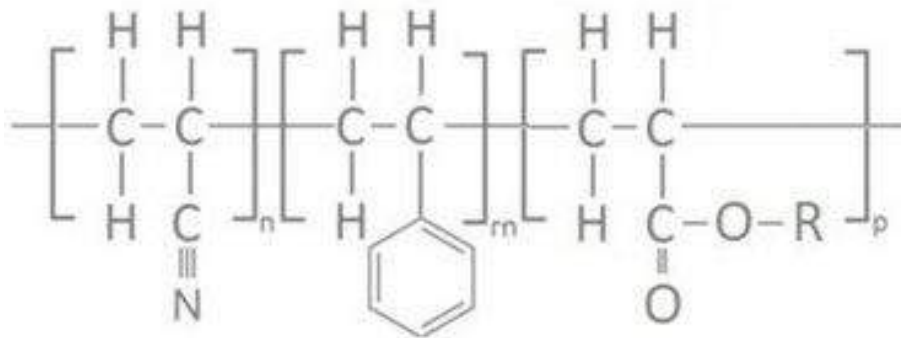
- Maletas y recipientes de transporte,
- Bobinas para hilos,
- Artículos de oficina y para el hogar
- Cascos de seguridad
- Piezas para el interior de vehículos y aviones
- Juguetes
- Los tipos galvanizables, en perillas, tapas etc.
- Los tipos espumables, en marcos, manijas, partes de muebles etc.





Acrlonitrilo-estireno-acrilato (ASA)

- Alta rigidez y magnífica resistencia al impacto
- Alta estabilidad térmica y alto brillo
- Buen comportamiento antiestático
- **Buena resistencia a la intemperie, al envejecimiento y amarillamiento**
- Alta resistencia química
- Absorbe algo de humedad (carácter polar)
- Matriz dura: SAN. Fase dispersa: partículas de caucho acrílico con injertos de SAN (poli (Acrilato -g- (Estireno -co- Acrlonitrilo))).



10 veces mayor resistencia a la intemperie que el ABS



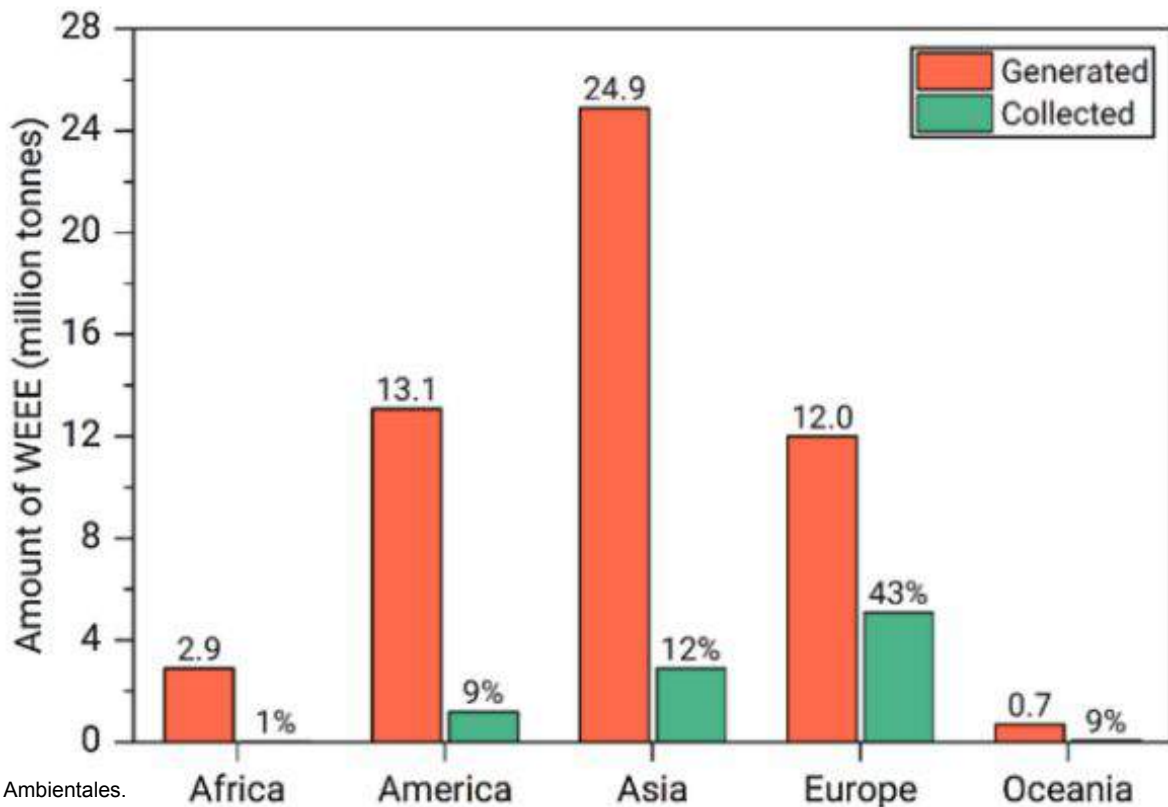
ASA

Aplicaciones

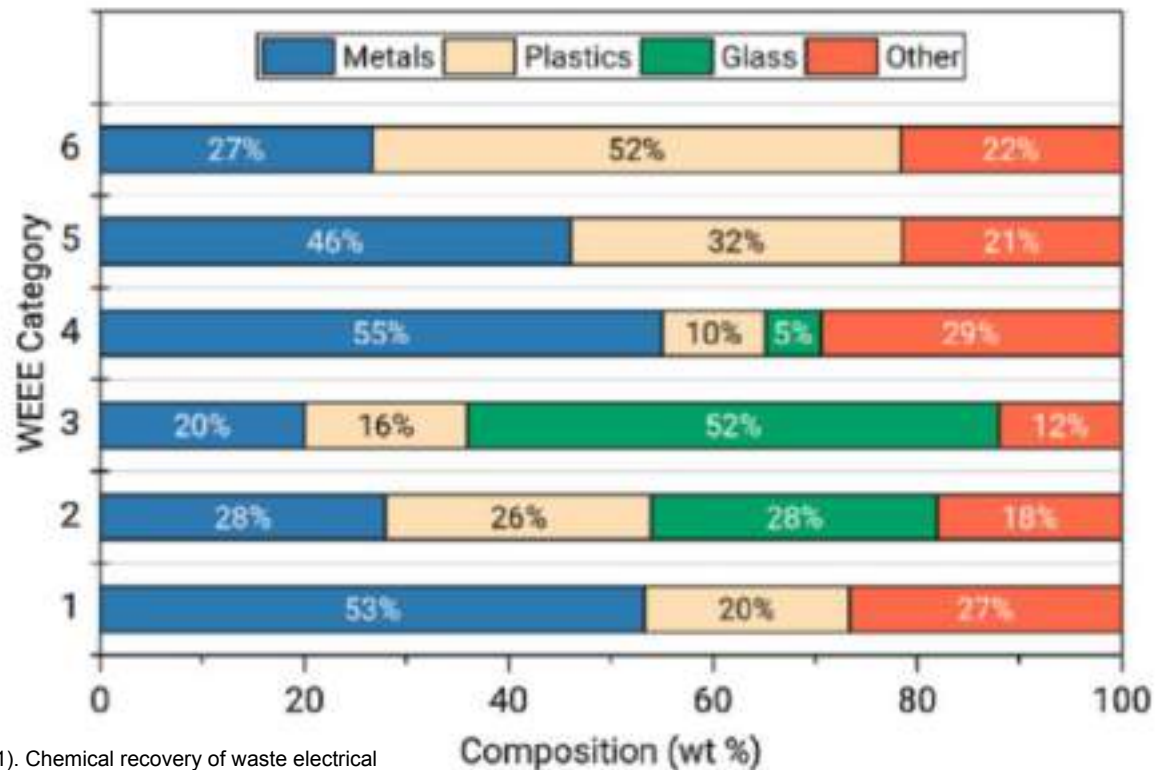
- Artículos eléctricos, teléfonos portátiles, carcasas de cortacéspedes y pequeños motores a gasolina. Lámparas para iluminación pública.
- En la industria de automóviles para la fabricación de espejos exteriores, rejillas frontales, luces traseras, vidrios laterales para casas remolque.
- Artículos para el hogar y la oficina, acoples para mangueras de jardín.
- Tubería de drenajes resistentes al agua caliente, avisos públicos, buzones



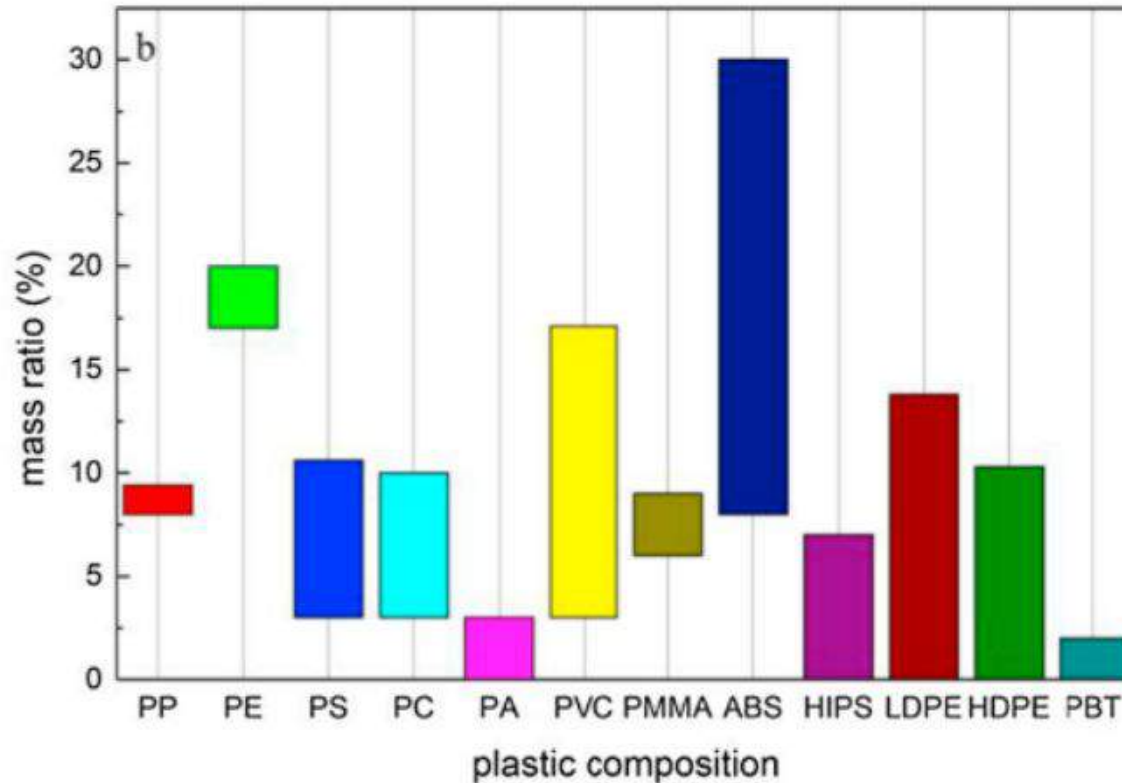
Los polímeros estirénicos en los RAEE's



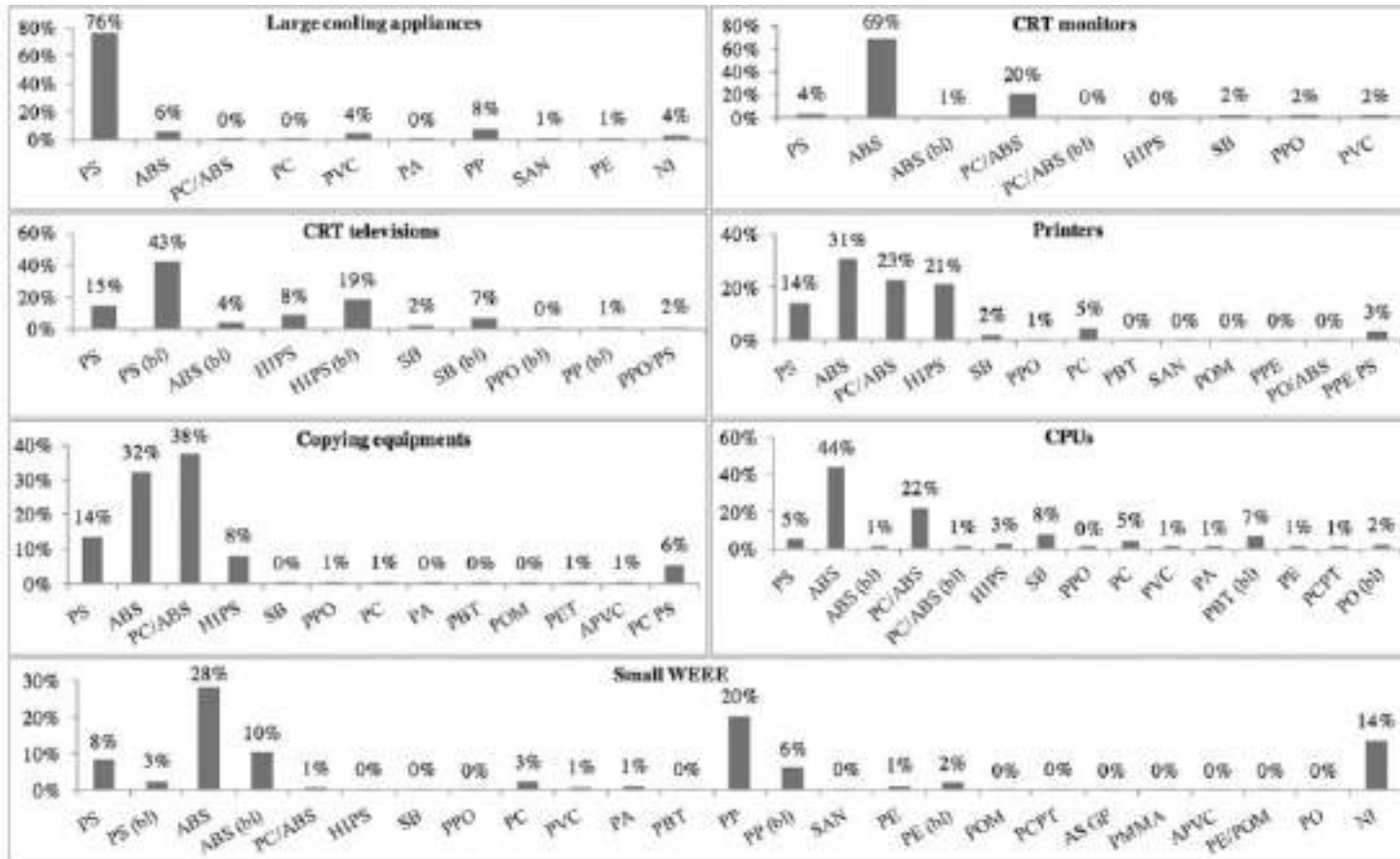
Los polímeros estirénicos en los RAEE's



Los polímeros estirénicos en los RAEE's



Los polímeros estirénicos en los RAEE's

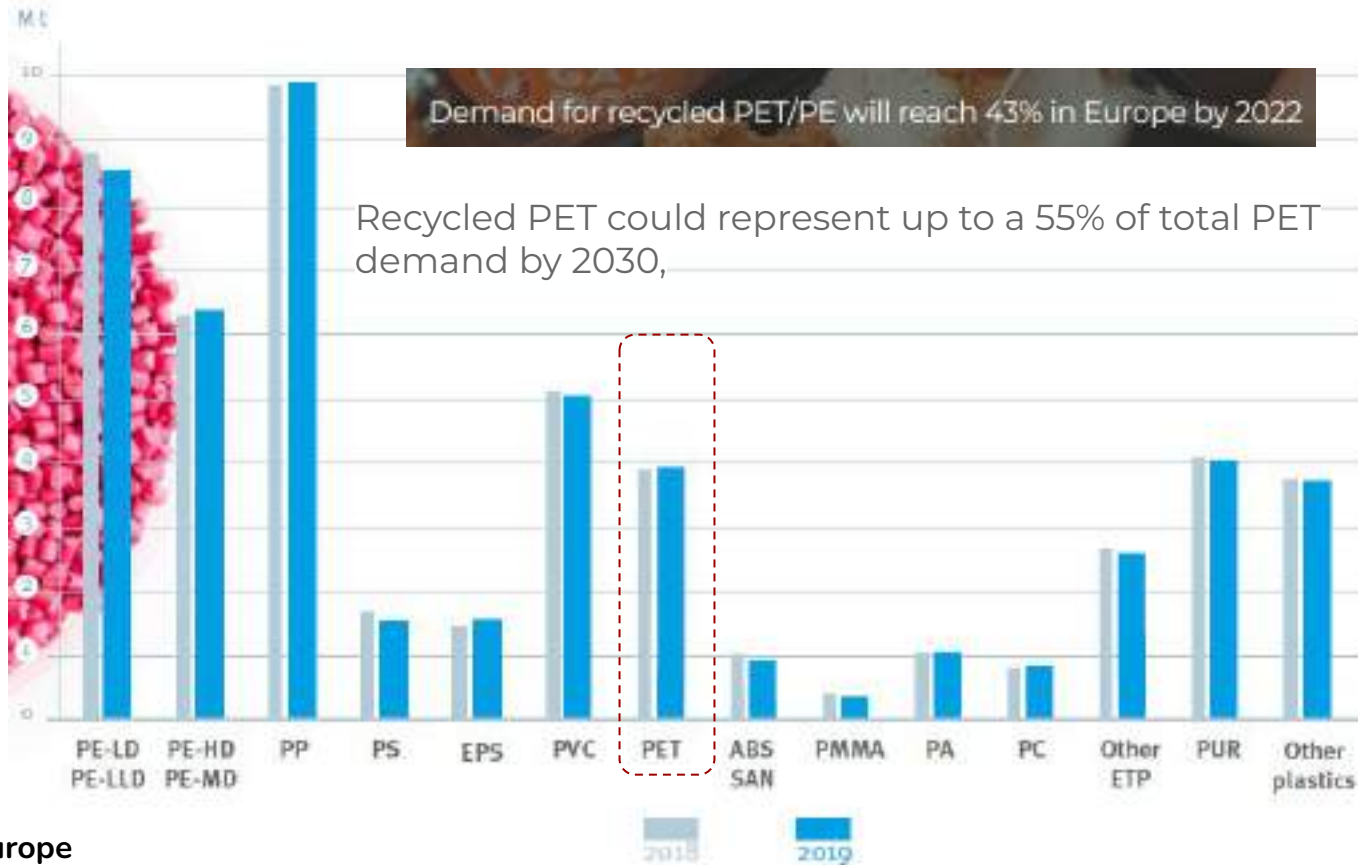


Wang, H., Zhang, Y., & Wang, C. (2019). Surface modification and selective flotation of waste plastics for effective recycling—a review. Separation and Purification Technology, 226(October 2018), 75–94. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.05.052>



PROPIEDADES, USOS Y APLICACIONES DEL PET

Demanda Europea de plásticos por tipo de resina 2019



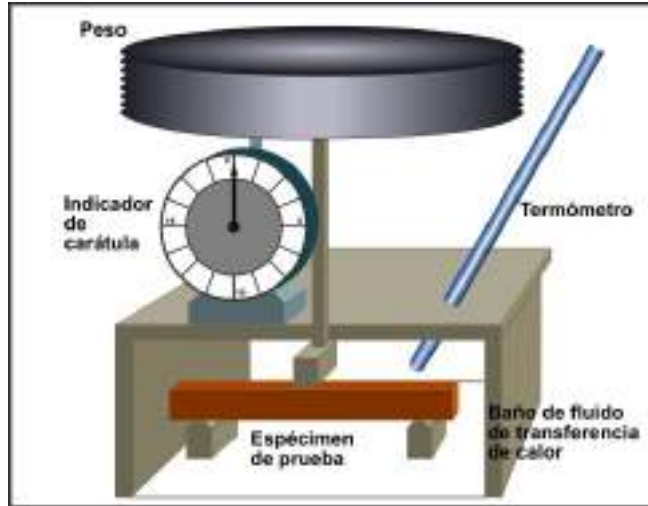
Distribución de la demanda Europea de plásticos por tipo de resina 2019





**Un pequeño concepto
antes de seguir...**

Temperatura de deflexión bajo carga (HDT) y Temperatura VICAT



HDT

VICAT



HDT ASTM D648

- Velocidad de calentamiento: 120° C/h
- Esfuerzos: 0,455 MPa y 1,82 MPa
- Se registra la temperatura a la que ocurre una deflexión de 0,25 mm

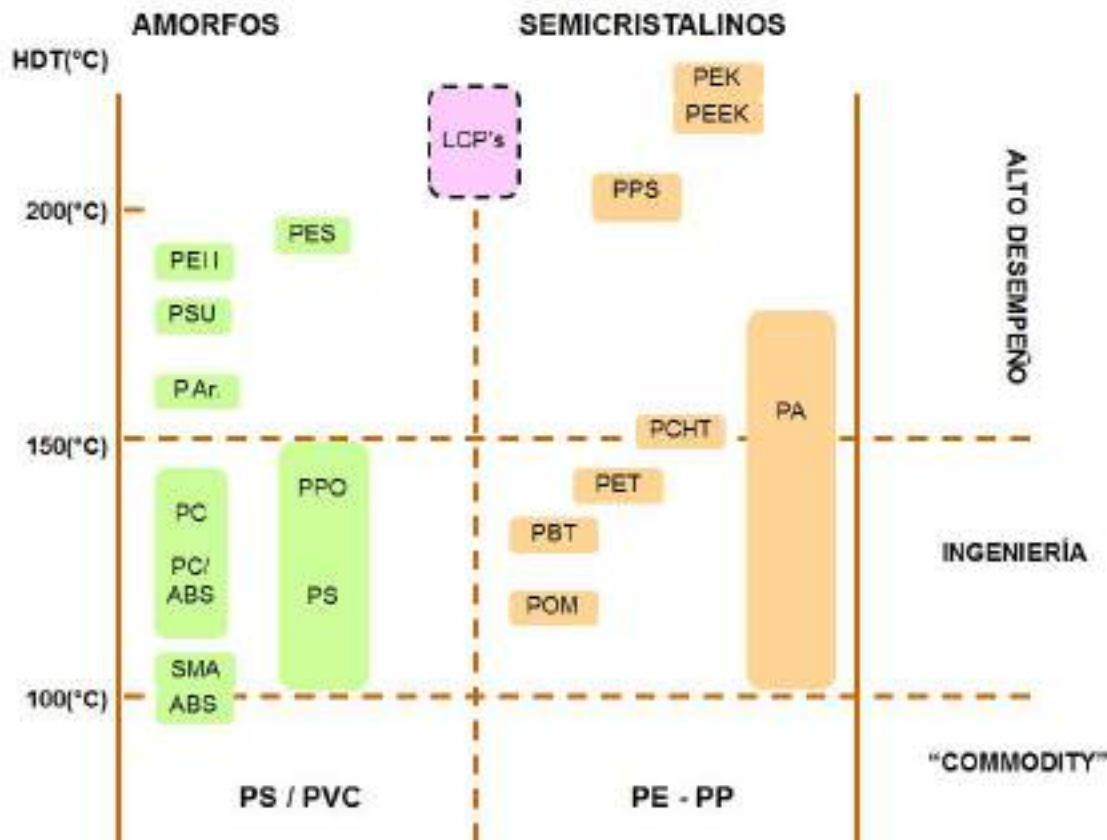
Vicat: ASTM D1525

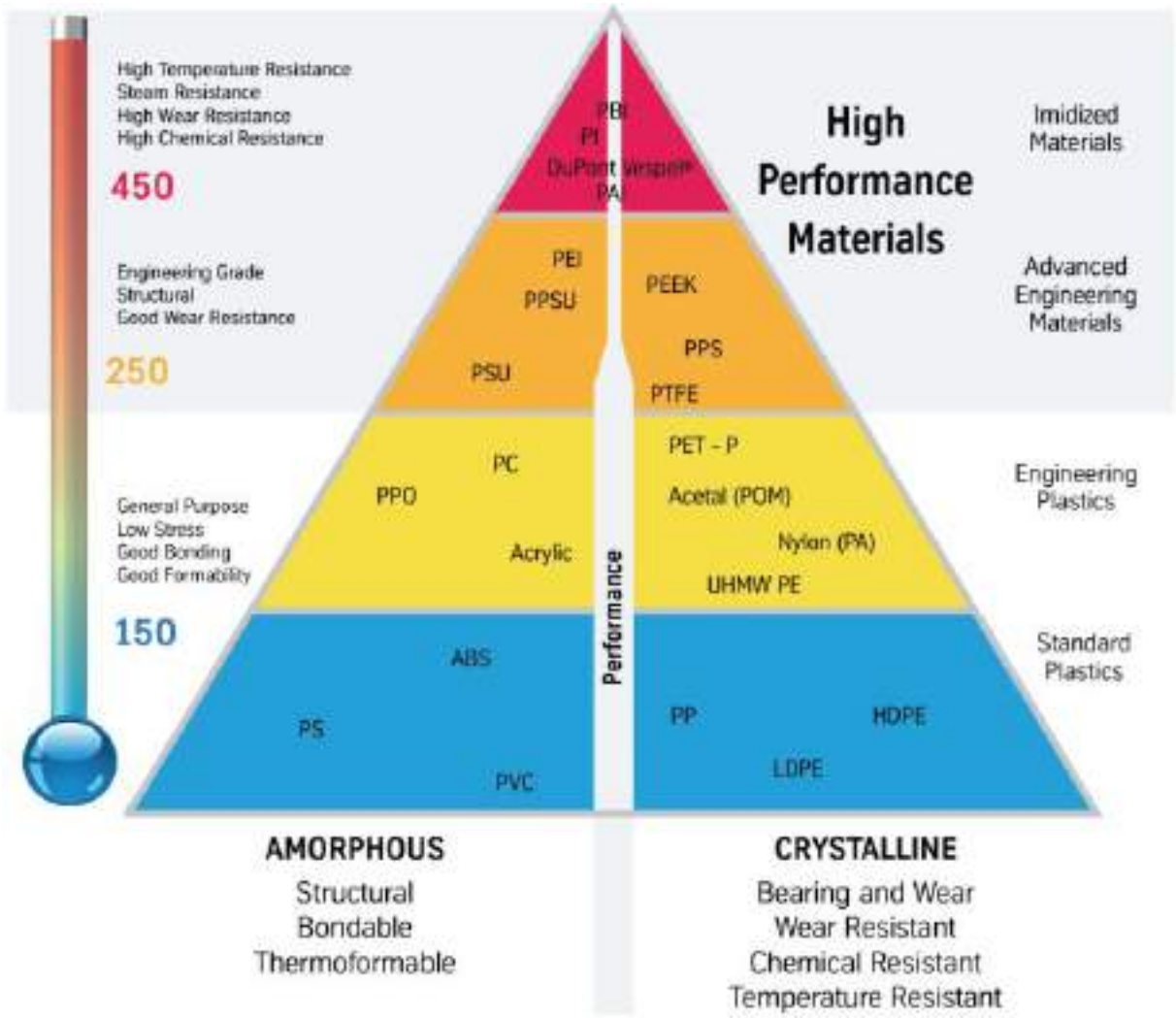
- Velocidad de calentamiento: 50 y 120°C/h
- Carga: 10 y 50 N
- Penetración de 1 mm



Sigamos...

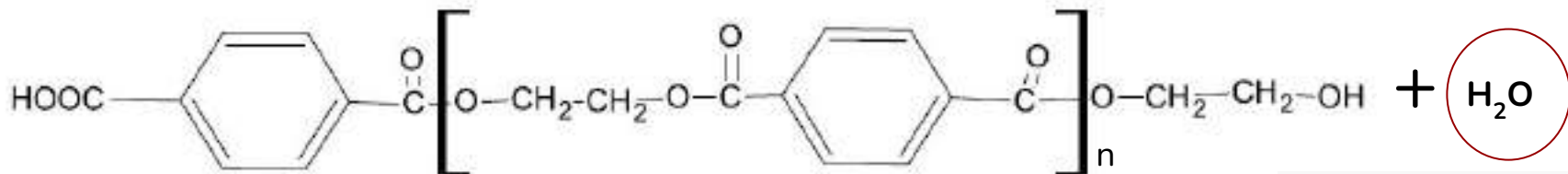
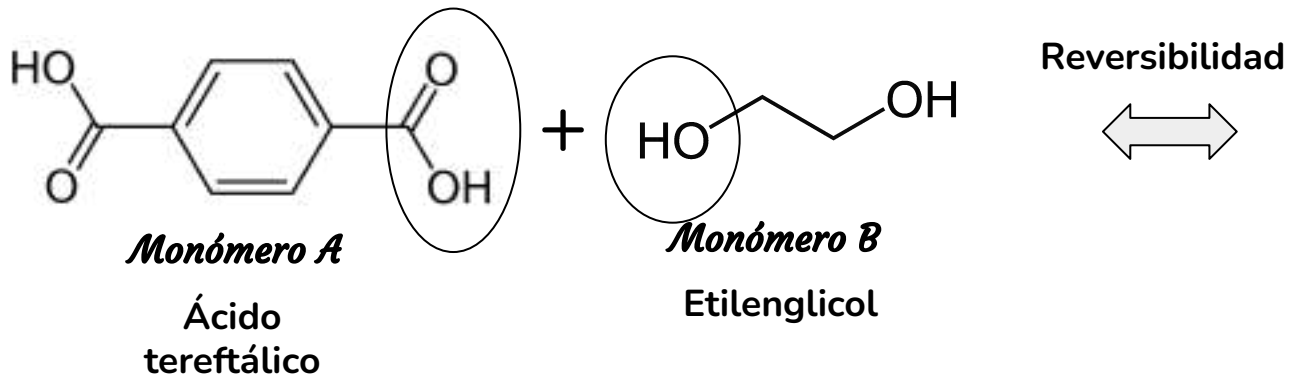
HDT polímeros amorfos y semicristalinos





Clasificación de los polímero acorde con su resistencia térmica

Obtención de PET a partir del PTA-Condensación



Unidad estructural que se repite n veces
 Polietilentereftalato (PET)





PET - Características

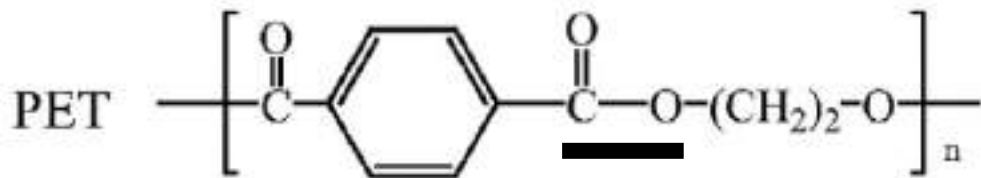
- Material "cristalizable", puede ser amorfo o semicristalino, dependiendo de las condiciones de proceso utilizadas.
- Velocidad de cristalización baja
- Grado de cristalización entre 30% y 40%.
- Polímero Rígido, y de buena estabilidad dimensional
- Posee buenas barreras al Oxígeno
- Baja Absorción de agua
- Buena resistencia química excepto a **los álcalis que lo hidrolizan**
- Altamente transparente (Amorfo)



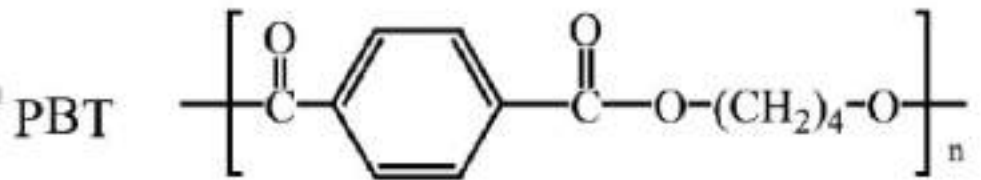
<https://www.interempresas.net/Envase/Articulos/54032-El-diseño-de-envases-PET-reune-forma-y-funcionalidad.html>

Densidad alta (1,30 g/cm³)

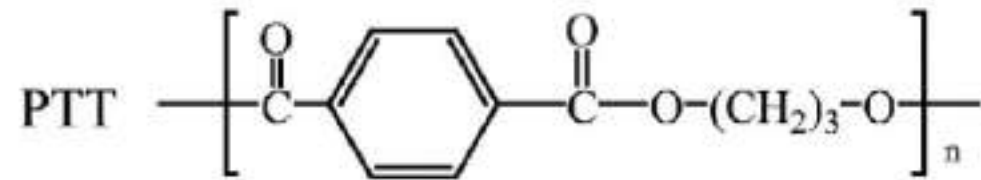
Poliester-Tipos de resinas



PET poly-ethylene terephthalate



PBT Polybutylen terephthalate



PTT Polytrimethylene terephthalate



**Un pequeño concepto
antes de seguir...**

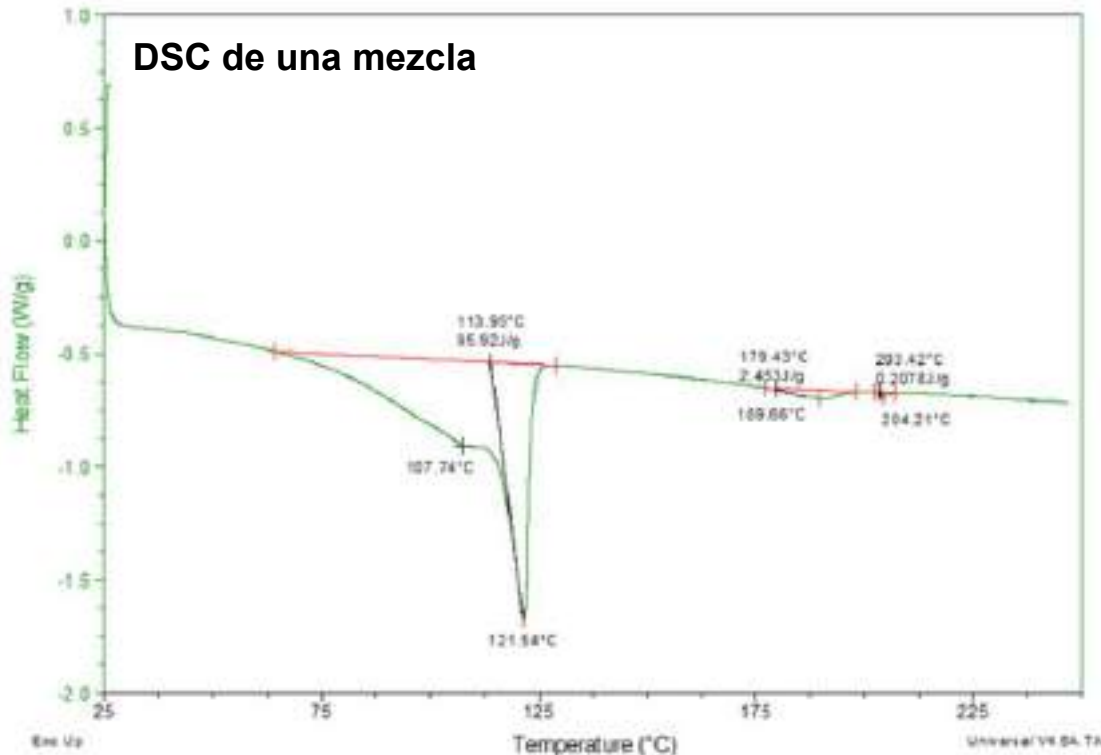
Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

¿Cómo se mide?



ASTM D3418

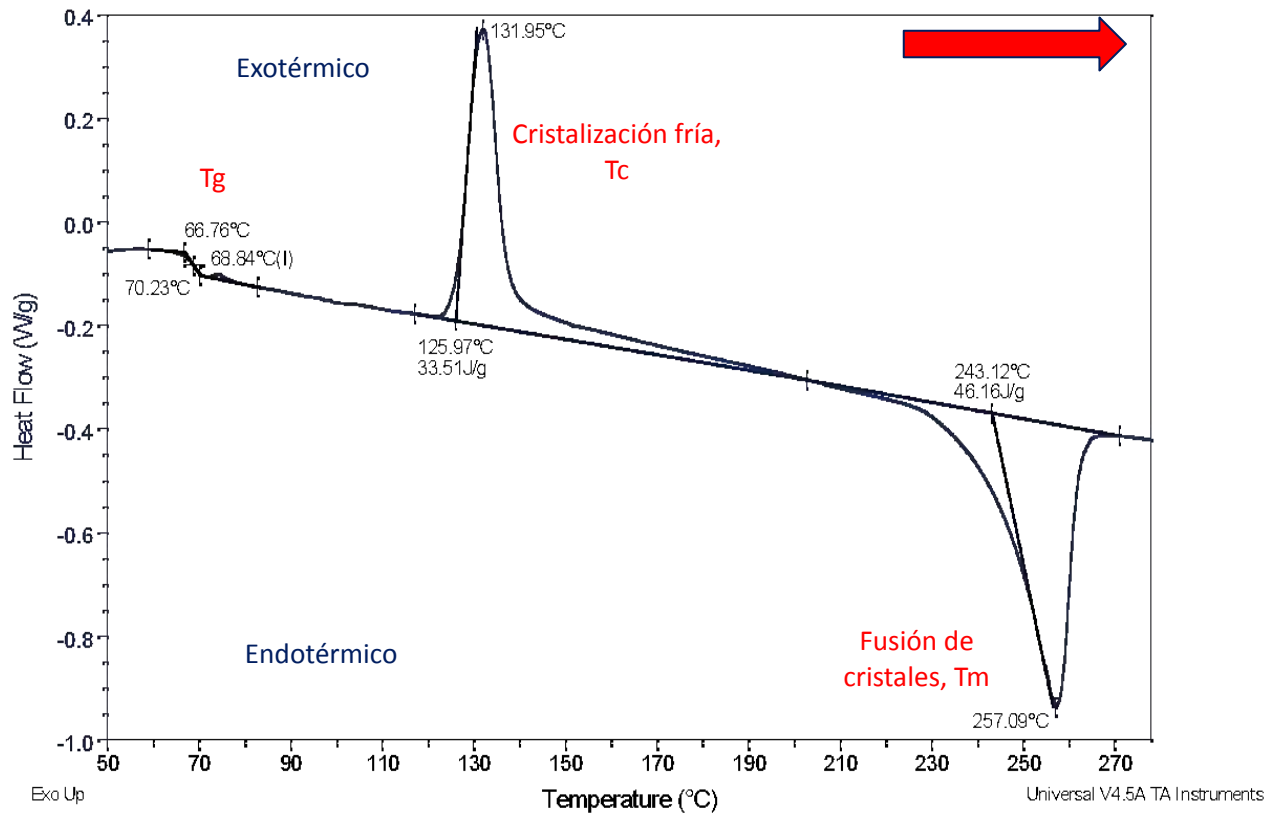
Temperaturas de transición y entalpías de fusión y cristalización de polímeros por medio de un DSC



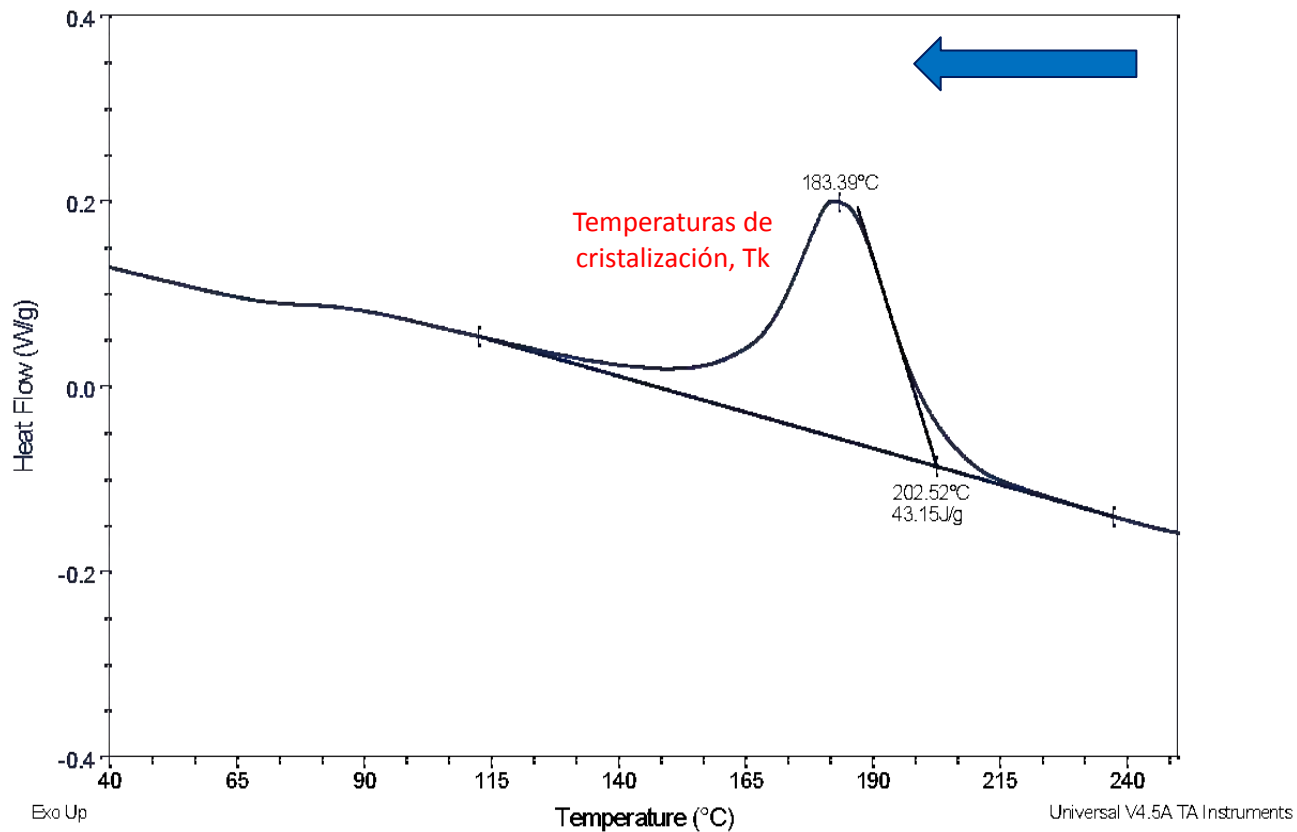


Sigamos...

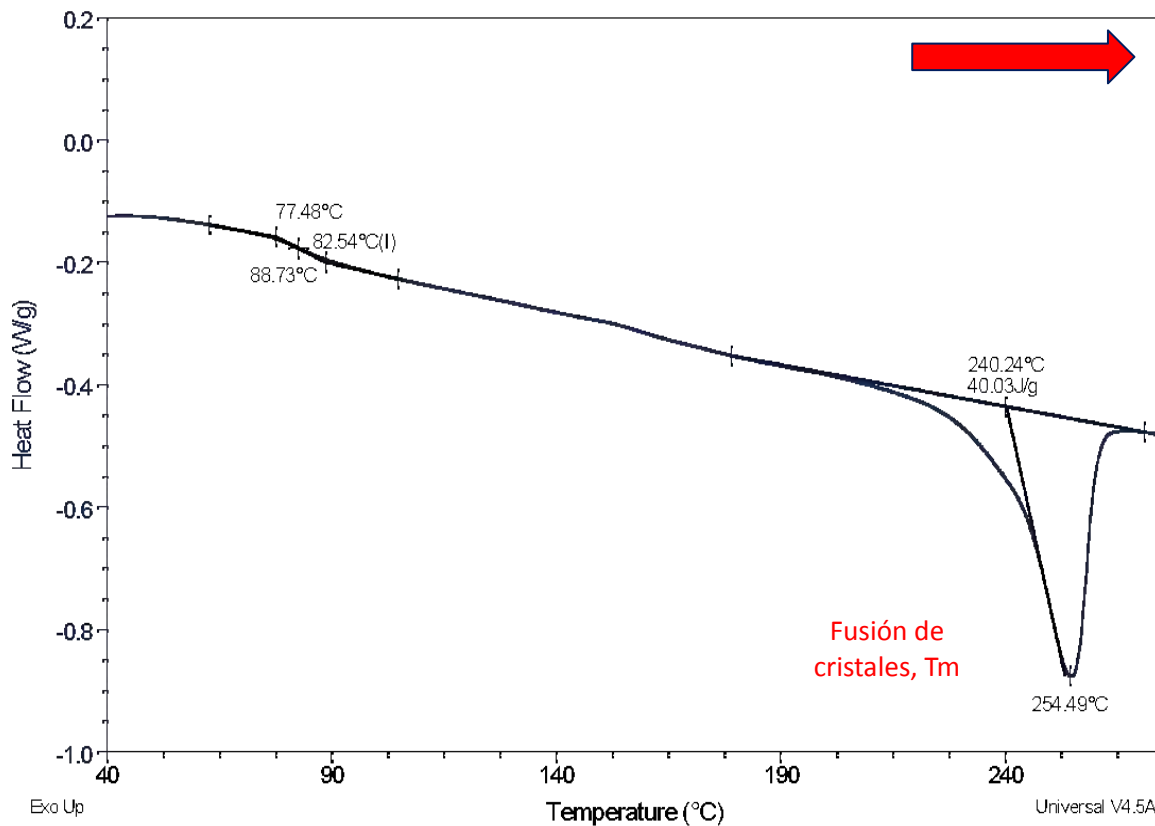
DSC PET primer calentamiento



DSC PET en enfriamiento



DSC PET en segundo calentamiento

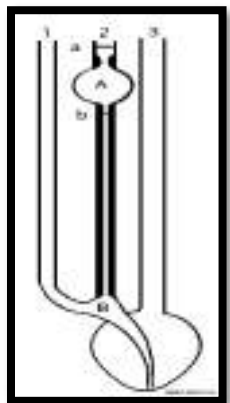


Tg [°C]	82.5
Tk [°C]	183
Tm [°C]	240
Tk_frio [°C]	125



**Un pequeño concepto
antes de seguir...**

Viscosidad intrínseca v.s. Peso molecular (Medidas indirectas)

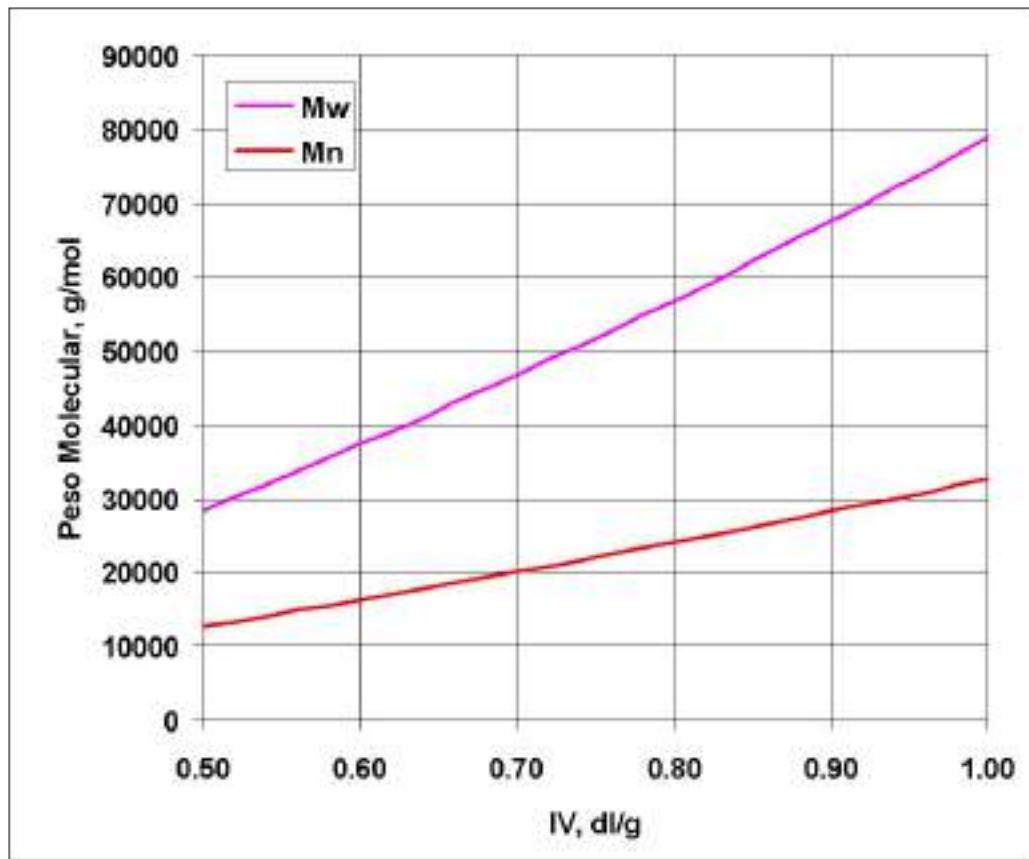


$$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{(\eta_{rel} - 1)}{c} = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\eta_{sp}}{c}$$

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_0} \quad \frac{\eta}{\eta_0} = \frac{t}{t_0}$$

$$\eta_{sp} = \eta_{rel} - 1 = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0}$$

$$[\eta] = KM_v^a$$

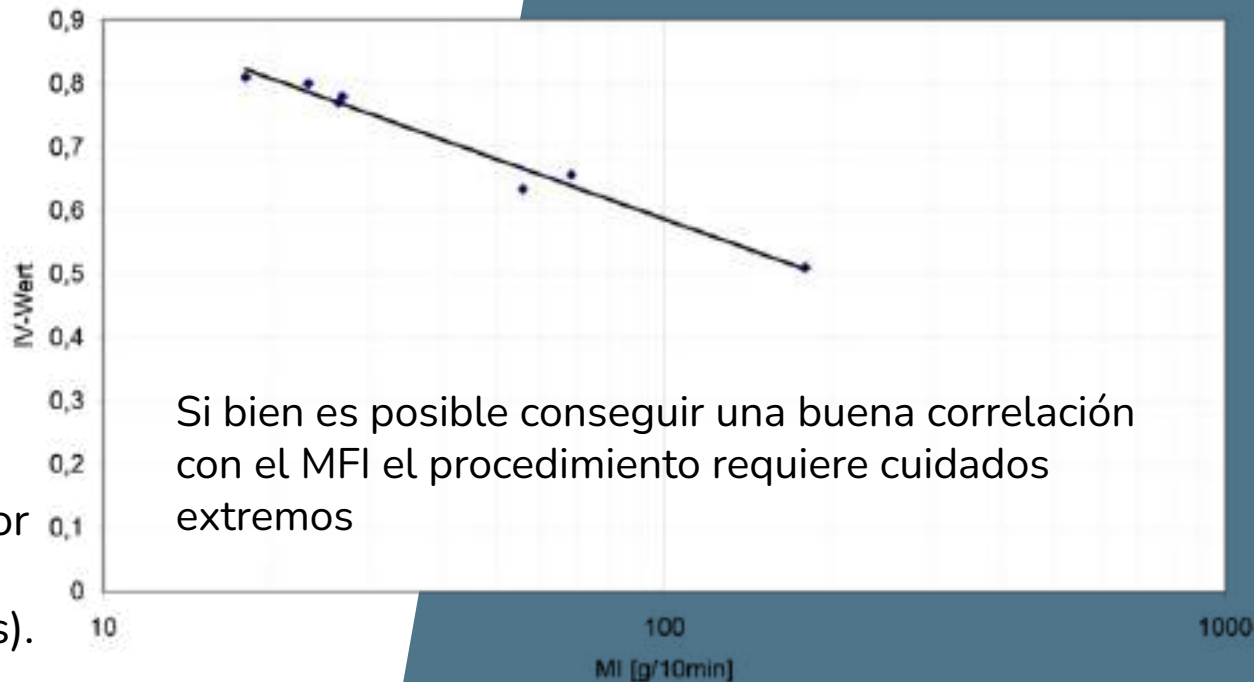


Poliester-PET-Peso Molecular

No se mide el MFI, el parámetro que se reporta y controla es la Viscosidad Intrínseca (Iv)

- Medida indirecta del peso molecular promedio.
- El procesamiento y el presecado debe ser tal que la caída en viscosidad no sea mayor a 0.03 dl/g (Pérdida de propiedades mecánicas).

Korrelation zwischen Schmelzindex- und IV-Wert für PET





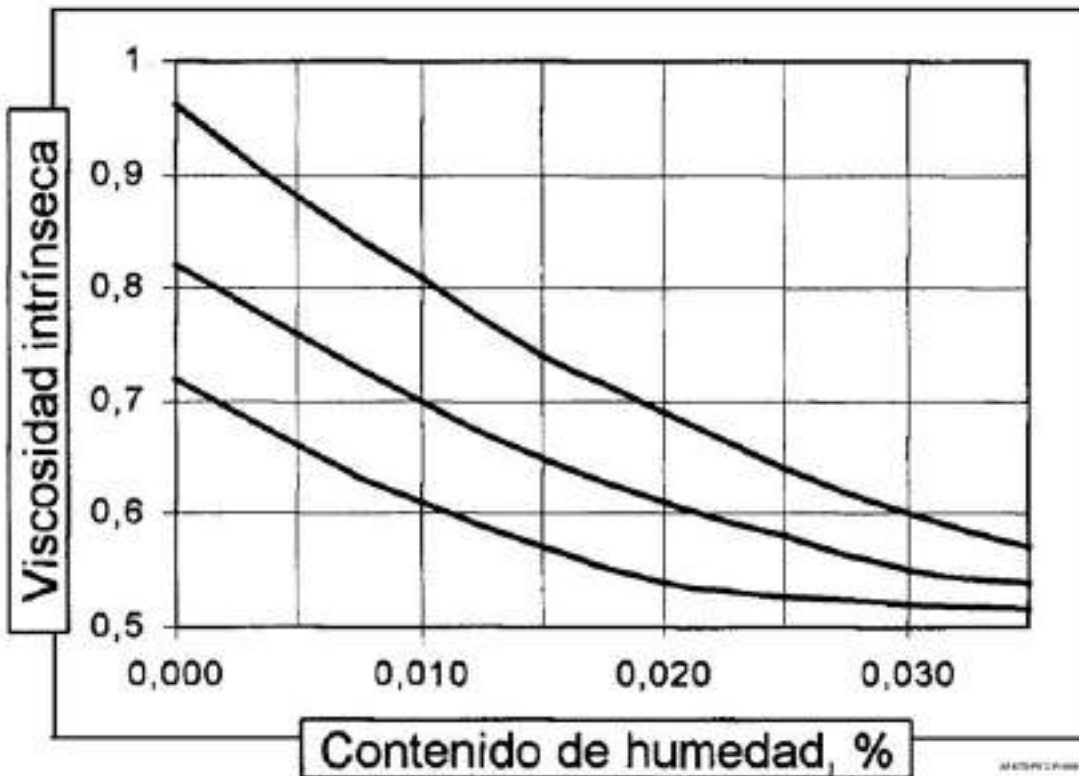
Sigamos...

Viscosidad intrínseca: aplicaciones del PET

	PET	[η] (dL.g⁻¹)
Fibers	Textiles	0.40 – 0.70
	Techniques	0.72 – 0.98
	bi-oriented	0.60 – 0.70
	Thermoforming	0.70 – 1.00
Bottles	for water	0.70 – 0.78
	for soft drinks	0.78 – 0.85

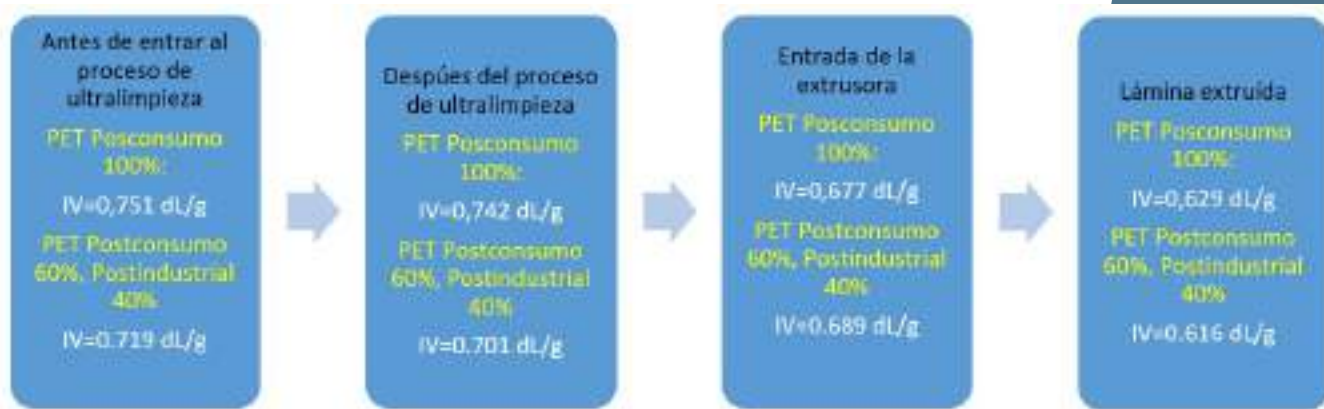
Aplicación	Viscosidad intrínseca η_v [dl/g]
Cintas de grabación	0,60
Fibras	0,65
Botellas de refresco	0,73 – 0,80
Tejidos para llantas	0,85
Micro y nano espumados para paneles multicapa	0,70 – 1,1
Áreas donde se requieran propiedades mecánicas excepcionales	>1

PET Acondicionamiento

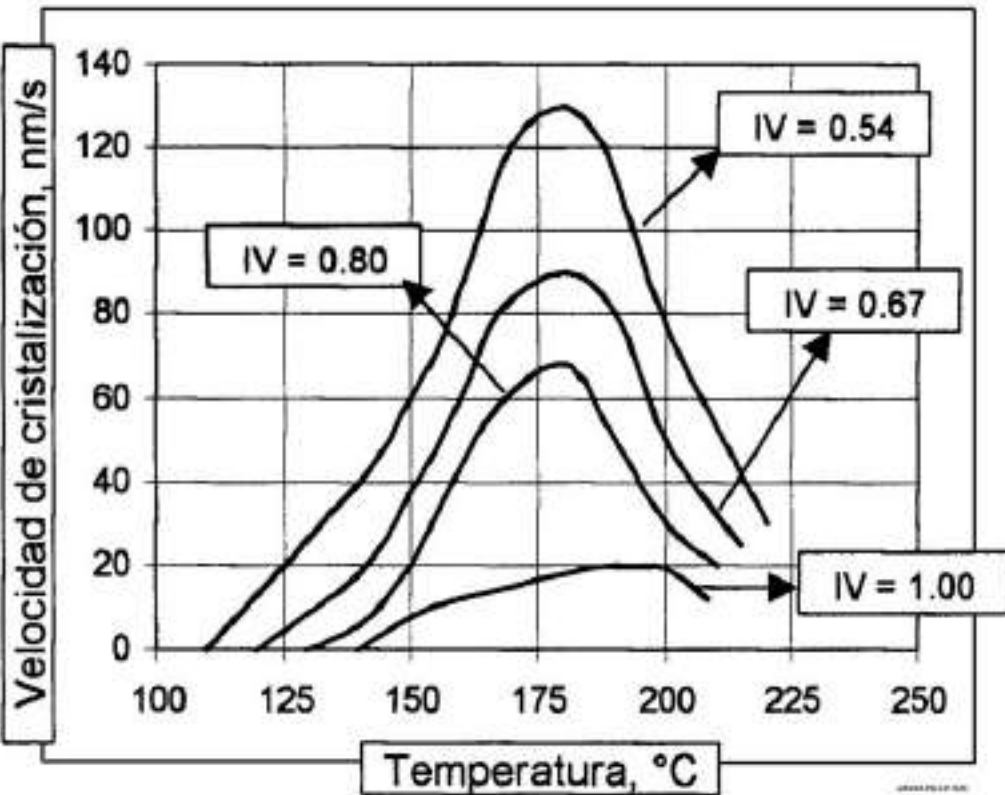


El contenido de Humedad tienen un efecto directo en la Viscosidad Intrínseca

Bandejas de PET termoformadas

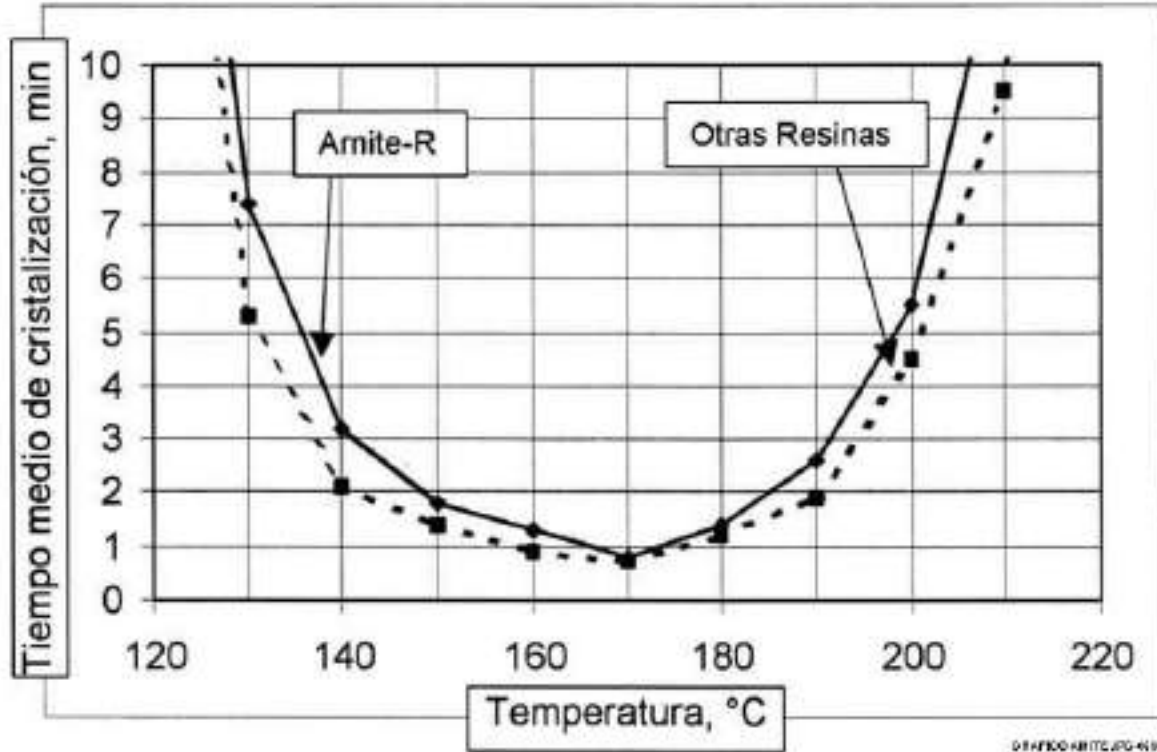


Efecto de la variación del IV



Variaciones en la Viscosidad Intrínseca tienen un efecto dramático en el desempeño del PET

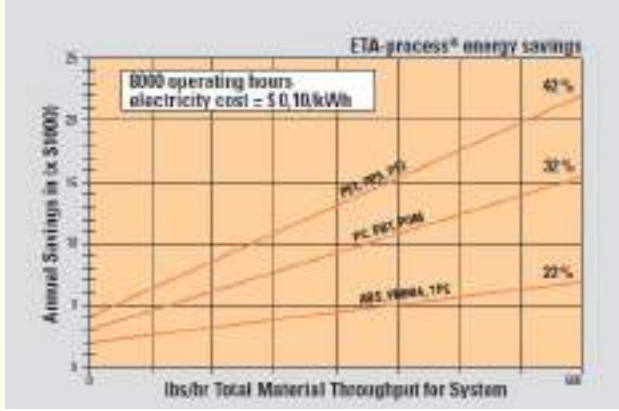
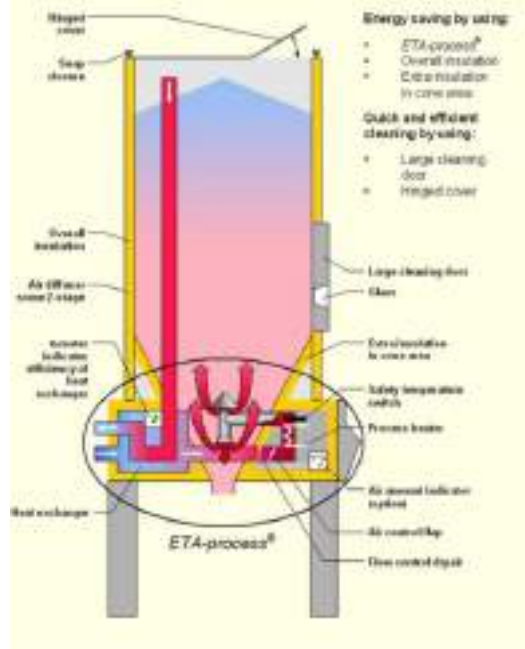
TIEMPO DE CRISTALIZACIÓN DEL PET COMO FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA



- Sistemas de aire caliente
- Doble cama desecante.
- Aire comprimido y membrana
- Calentamiento y Vacío.
- Rayos infrarrojos.
- Rueda desecante.
- Sistema de secado central.



PÉRDIDAS POR BOTAR SUSTANCIAS CALIENTES AL AMBIENTE: Secadores ETA Process®

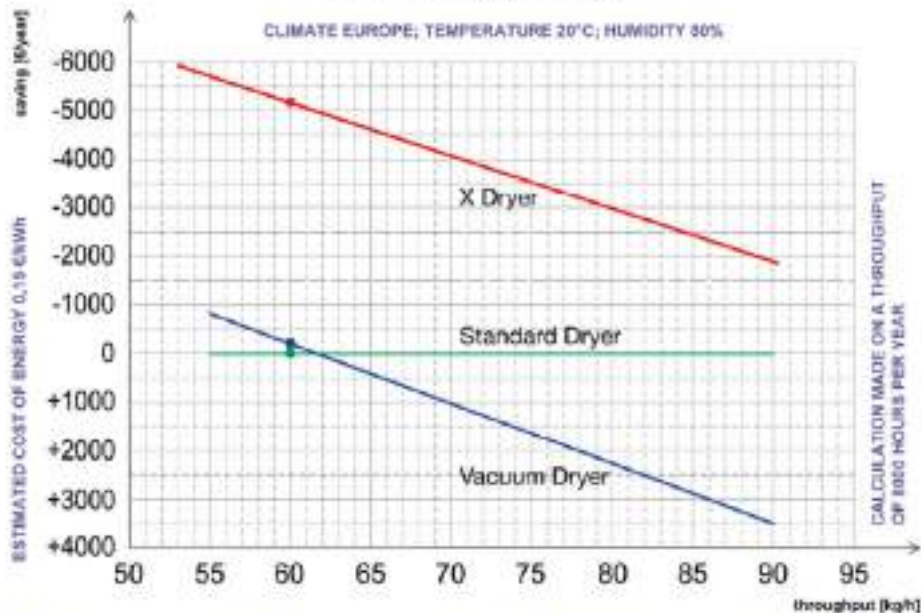


- En los sistemas convencionales se estiman pérdidas de energía del 47%. ETA-process® los puede reducir al 22%.
- El proceso de secado del aire reduce los requerimientos de enfriamiento logrando ahorros de energía totales superiores al 40%.

La corriente de aire caliente a la salida es utilizada para precalentar el aire de alimentación, aprovechando la energía remanente.

SECADORES – X DRY PROCESS

SAVING PER YEAR



REFERENCE DRYER WITH AIRFLOW CAPACITY OF 150 m³/h
MATERIAL: PEEK DRYING TEMPERATURE: 150°C

REFERENCE THROUGHPUT: 60 kg/h
TREATMENT TIME: 4h



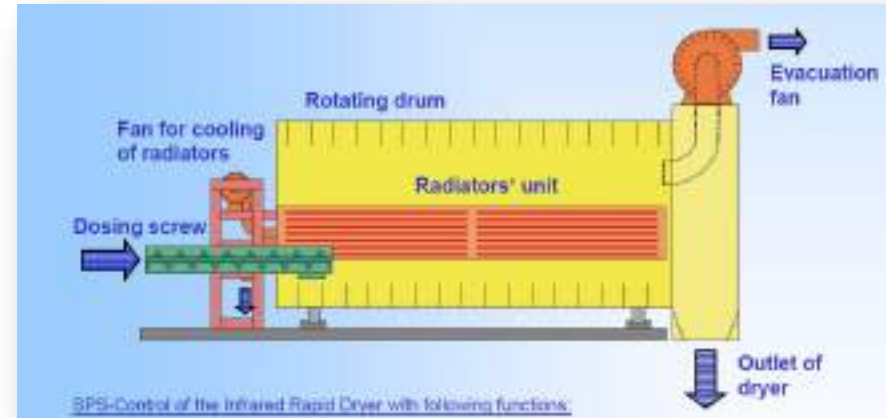
Hasta -70°C de temperatura de rocío.

Hasta 180°C de temperatura del aire de secado.

Basado en una tecnología de zeolitas que no requiere aire comprimido ni agua de refrigeración

Secadores IR

Para PET en escamas con contenido inicial de humedad del 1%, es posible secar vía IRD hasta 0.03% de humedad en 15 minutos, consumiendo solo 0.13 kW/kg/hr. Reducir los niveles por debajo de 0.005% puede ser logrado con una hora adicional de secado en un deshumidificador.



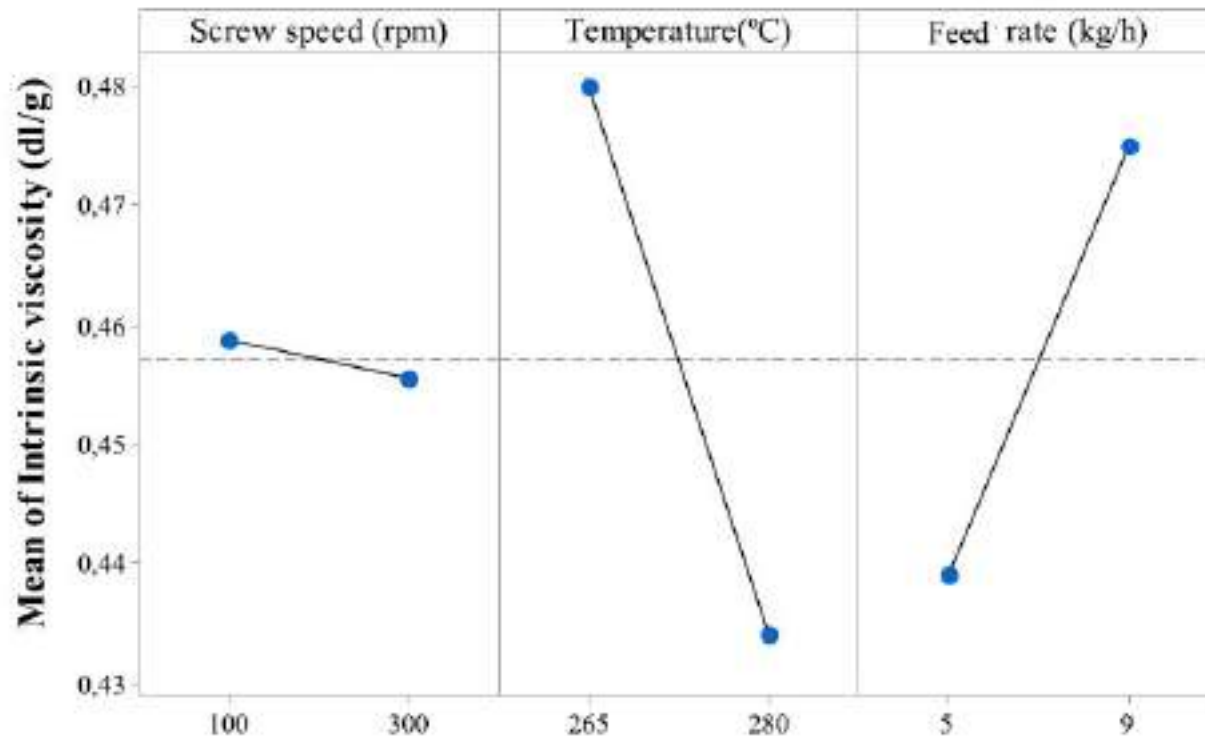


Algunas consideraciones para el secado del PET

- Debe ser secado adecuadamente antes de ser procesado, para prevenir la degradación hidrolítica del polímero, (pérdida de propiedades).
 - Contenido de humedad antes de ser procesado: 0.005 % o menor (50 ppm).
 - Algunos fabricantes recomiendan bajar hasta 0.003%.
- Para un adecuado secado se requiere lo siguiente:
 - Temperatura correcta para los gránulos de polímero: entre 145 y 175°C (muchos fabricantes recomiendan 170°C)
 - Temperatura del aire a la entrada del secador: cercana a 180°C
 - Punto de rocío del aire: de -30°C o menor (típicamente de -40 °C medida a la entrada del secador)
 - Adecuado flujo de aire: 1 CFM por cada lb/h de PET secado.
 - Tiempo de residencia: entre 6 y 8 horas. Algunos fabricantes recomiendan 4 horas.

Efecto de los parámetros de proceso en IV

Main Effects Plot for Intrinsic viscosity (dl/g)



Tensiones residuales y homogeneidad del espesor



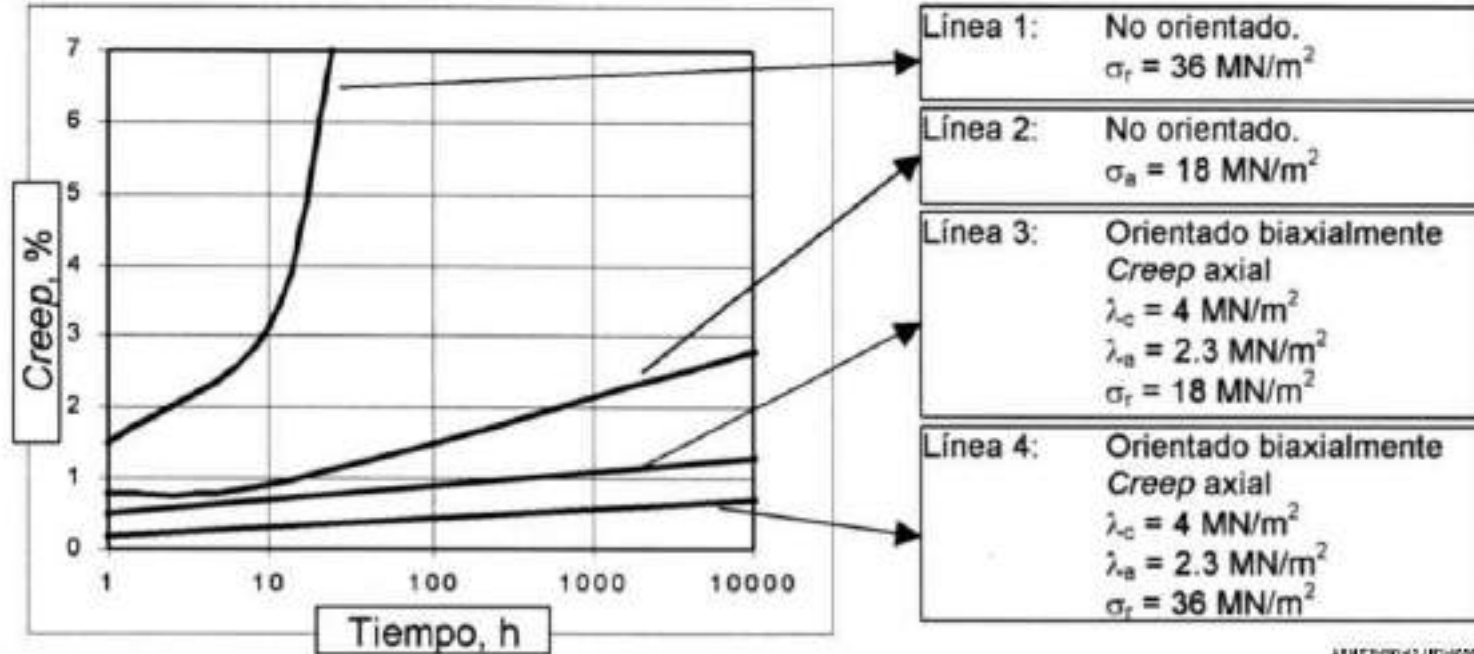
Estado de orientaciones y tensiones residuales de la preforma

Dimensiones y perfil de espesores de la preforma



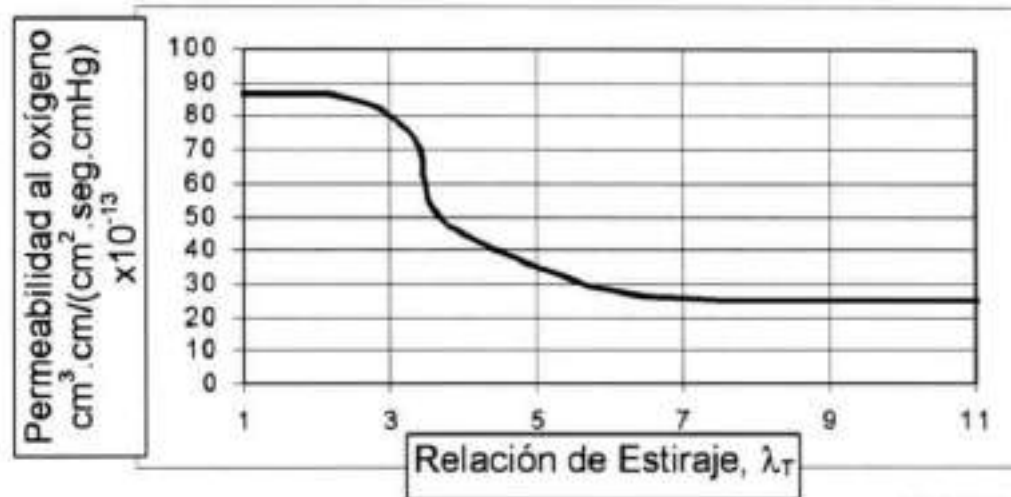
¿POR QUÉ SE ORIENTA BIAXIALMENTE EL PET?

Por la reducción considerable de la plastodeformación o Creep



¿POR QUÉ SE ORIENTA BIAIXIALMENTE EL PET?

Por el incremento de las propiedades de barrera (se reduce la permeabilidad al O_2 y al CO_2 en un factor de 3 y al vapor de agua en un factor de 2).





¿POR QUÉ SE ORIENTA BIAXIALMENTE EL PET?

Por el incremento de las propiedades mecánicas (incremento de la rigidez en un factor de 3 y mejora sustancial de la resistencia al impacto).

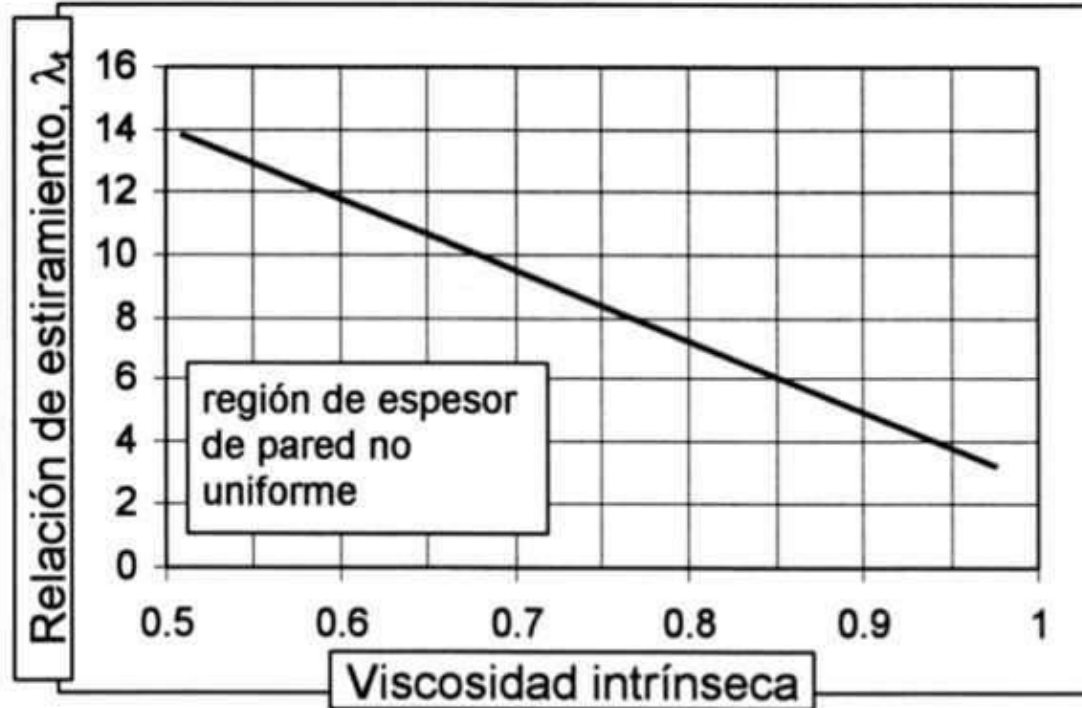
PROPIEDAD		NO ORIENTADO				ORIENTADO			
		PVC	PAN	PP	PET	PVC	PAN	PP	PET
Módulo de elasticidad	MPa	2800	3400	1500	2200	3500	5000	2000	7000
Esfuerzo al límite elástico	MPa	55	60	25	50	75	140	150	140
Energía de impacto	KJ	200	250	200	120	1200	1000	2000	2000



¿POR QUÉ SE ORIENTA BIAXIALMENTE EL PET?

- Por el incremento de la resistencia química y el “stress cracking”. Una botella de PET tiene secciones con baja orientación o sin ella, en las que el “stress cracking” puede ser un problema.
- Por el mejoramiento de propiedades es posible reducir el peso del envase.

RELACIÓN DE ESTIRAMIENTO MÁXIMO COMO FUNCIÓN DEL IV DEL PET





Desodorización

Refresher

HOME AND
HEALTHCARE
PACKAGING

MADE OUT OF
100%
POST
CONSUMER
RECYCLATE



Tecnologías de post condensación para PET

ViscoSTAR
Incremento de la
viscosidad intrínseca
para reciclaje
botella a botella





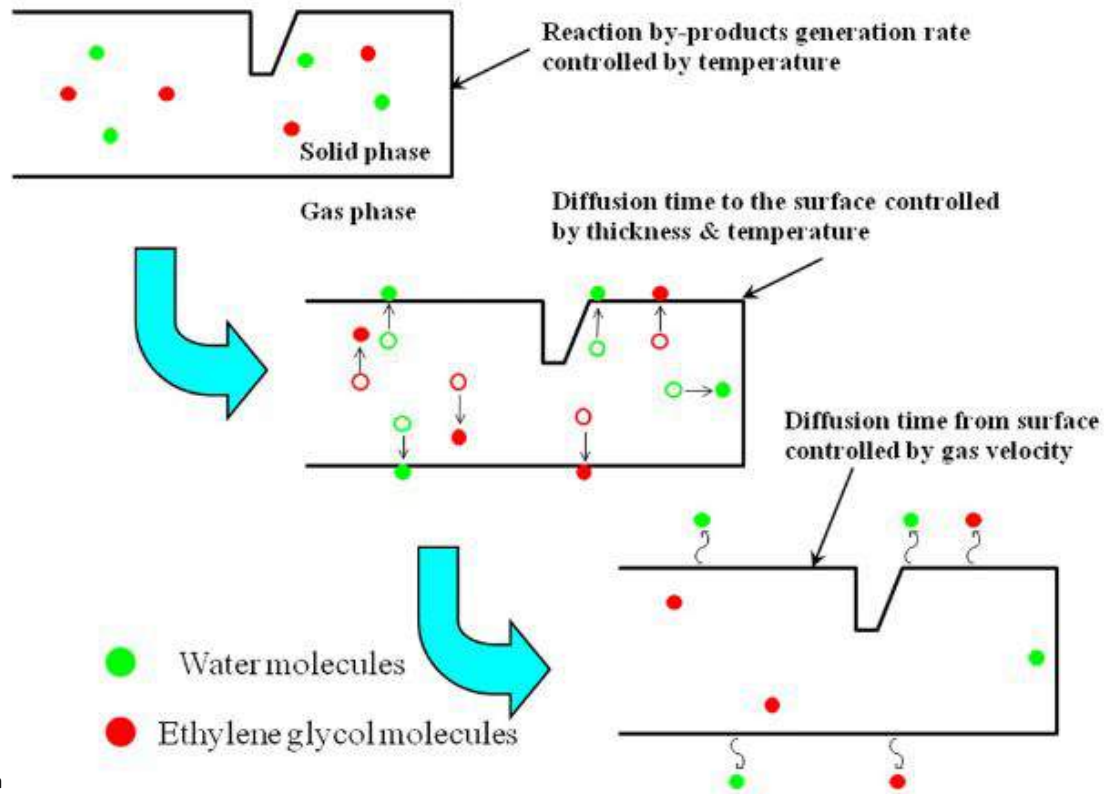
Tecnologías de post condensación para PET

MPR Reactor para
secado,
cristalización e
incremento del IV



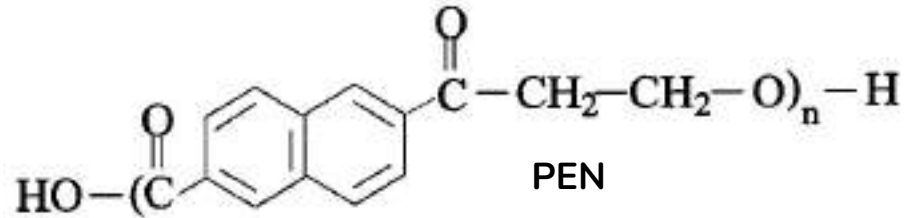
Postcondensación - Aumento PM

Mediante calentamiento del polímero en estado sólido, por encima de la T_g y por debajo de T_m , se promueven reacciones de esterificación y transesterificación, el subproducto de la reacción se remueve mediante vacío con gas inerte.



PET modificado

- PET puede ser mezclado con PEN (Polietilen naftalato):
 - Mejora importante en OTR y WVTR (hasta 5 veces mejor)
 - Mayor resistencia a la tensión (35% mayor)
 - Mayor rigidez (50% mayor)
 - Mayor resistencia química y a la hidrólisis
 - Posibilidad de llenado en caliente
 - Bloqueo de radiación UV
 - Costo del PEN tres veces mayor
- PET puede ser copolimerizado con:
 - Un glicol adicional (PETG) ó Un diácido adicional (PETA)
 - Objetivo
 - Mejorar viscosidad elongacional
 - Reducir la cristalinidad
 - Esterilización (rayos gamma y óxido de etileno)





PROPIEDADES, USOS Y APLICACIONES DEL PVC



PROPIEDADES, USOS Y APLICACIONES DE LOS POLÍMEROS DE INGENIERÍA Y ALTAS PRESTACIONES



ADITIVOS HABITUALES EN LOS POLÍMEROS Y SU FUNCIÓN



TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN RÁPIDA DE MATERIALES PLÁSTICOS: USO DE POLYGUESS

Muchos métodos de separación de plásticos

Y cada uno de ellos se recomienda para cierto tipo de mezclas...

¡Pero la composición de las mezclas de reciclados es muy variable!

1

Separación electrostática

Dos tipos de plásticos se cargan con cargas opuestas cuando los materiales se frotran entre sí y tienden a separarse.

2

Separación disolución

Generalmente incluye cuatro procedimientos: triturar y eliminar contaminantes e impurezas, disolución, extracción y precipitación

3

Separación por densidad

El equipo más utilizado es el hidrociclón. Los rangos de densidad de muchos materiales se superponen.

4

Separación espectroscópica

Con un sensor se detecta una propiedad única de los plásticos y activa un actuador en el sistema de separación que separa este tipo de plástico de la mezcla.

5

Separación por flotación

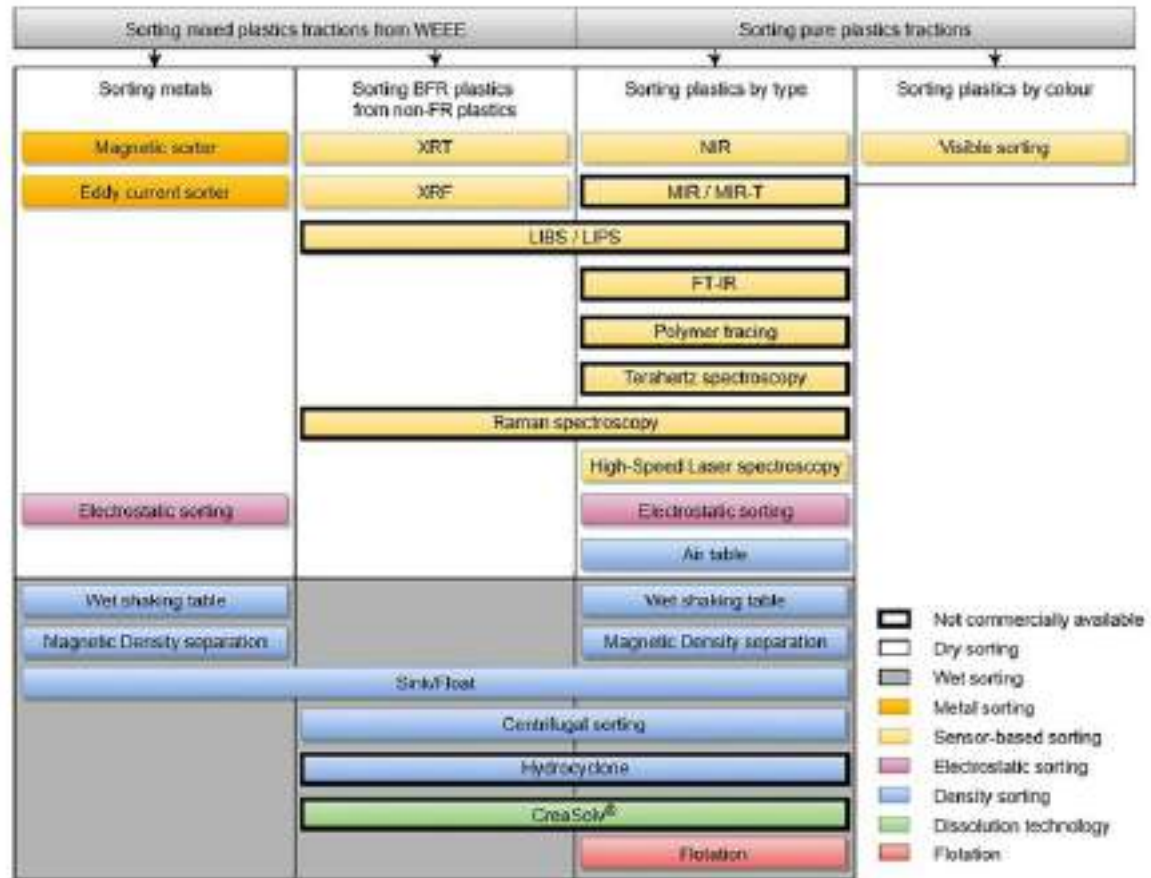
La flotación separa el plástico objetivo de las mezclas dependiendo de la diferencia de humectabilidad del plástico.

6

Separación por densidad magnética

Al usar un líquido magnético (que contiene óxido de hierro) como medio de separación, la densidad del líquido se puede variar mediante el uso de un campo magnético especial.

Separación - Método recomendado a la necesidad



Maisel, F., Chancerel, P., Dimitrova, G., Emmerich, J., Nissen, N. F., & Schneider-Ramelow, M. (2020). Preparing WEEE plastics for recycling – How optimal particle sizes in pre-processing can improve the separation efficiency of high quality plastics. *Resources, Conservation and Recycling*, 154(March 2019), 104619. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104619>



Separación

Intensiva en Mano de
Obra = \$\$\$\$



<http://www.allenwaste.co.uk/recyclables.html>





Identificación de materiales

Codificación de los materiales - (ASTM D7611-20)

El código sólo indica la familia del material que está fabricado. No da más información relevante para el reciclaje.

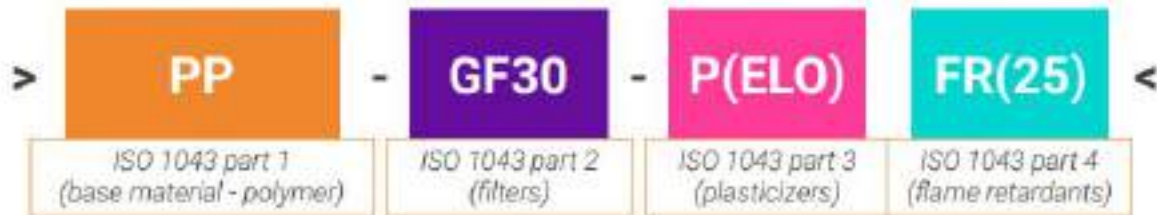


Resin Identification Number	Resin	Resin Identification Code -Option A	Resin Identification Code -Option B
1	Poly (ethylene terephthalate)	 PETE	 PET
2	High density polyethylene	 HDPE	 PE-HD
3	Poly (vinyl chloride)	 V	 PVC
4	Low density polyethylene	 LDPE	 PE-LD
5	Polypropylene	 PP	 PP
6	Polystyrene	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

Marcación de piezas plásticas según ISO 11469 de 2016



Un identificador completo según la norma consta de 4 términos que indican el tipo de plástico (ISO 1043-1), materiales de relleno (ISO 1043-2), plastificantes (ISO 1043-3) y retardantes de llama (ISO1043-4).





ISO 11469 de 2016 - Muestra de la tabla de polímeros básicos

Tabla 7.
ISO 1043-1,
polímeros
básicos.

Símbolo	Material	Símbolo	Material
E/P	Etileno-propileno	PBN	Naftalato de polibutileno
PBS	Succinato de polibutileno	PEN	Naftalato de polietileno
PBSA	Adipato de succinato de polibutileno	PEOX	Óxido de polietileno
PBT	Tereftalato de polibutileno	PES	Succinato de polietileno
PC	Polycarbonato	PESTUR	Polietersulfona
PCDE	Poli(ciclohexileno dimetileno ciclohexanodicarboxilato)	pesu	Polietersulfona
PCO	Policicloolefina	PET	Tereftalato de polietileno

[Directrices Técnicas para el manejo de materiales plásticos recuperados de RAEE's y vehículos desintegrados: Manual que tiene una sección sobre identificación rápida de materiales plásticos.](#)



ISO 11469 de 2016 - Muestra de la tabla de materiales de refuerzo o relleno

Tabla 8.

ISO 1043-2, cargas y materiales de refuerzo.

Símbolo	Material	Símbolo	Material
A	Aramida	B	Perlas, esferas, bolas
B	Boro	C	Virutas
C	Carbon	CM	Feltro de vidrio
D	Trihidrato de alúmina	D	Finos, polvos
E	Arcilla	EM	Tapete de hebras continuas (sin fin)
G	Vidrio	F	Polietersulfona
K	Carbonato de calcio	G	Tereftalato de polietileno
L	Celulosa	K	Fibra
M	Mineral	L	Tela tejida

[Directrices Técnicas para el manejo de materiales plásticos recuperados de RAEE's y vehículos desintegrados: Manual que tiene una sección sobre identificación rápida de materiales plásticos.](#)



ISO 11469 de 2016 - Muestra de la tabla de plastificantes

Tabla 9.
ISO 1043-3,
plastificantes.

Abreviación	Nombre común	Equivalente IUPAC*	CAS-RN**
ASE	Éster de ácido alquisulfónico	Alquisulfonatos o alcanosulfatos de alquilo	No conocido
ATBC (o TBAC)	Tributilo-acetilcitrato (o acetiltributilcitrato)	Tributilo acetilcitrato	77-90-7
ATEC (o TEAC)	Trietil o-acetilcitrato (o acetil trietil citrato)	Trietil o-acetilcitrato	77-89-4
ATEHC	Citrato de acetiltri-(2-etilhexilo)	Tris (2-etilhexil) 2-acetiloxi- propano 1,2,3- tricarboxilato	144-15-0
BAR	Butilacetilironooleato	Butil-12-acetoxioleato	140-04-5
BBP	Ftalato de bencilo butilo	Igual	85-68-7

[Directrices Técnicas para el manejo de materiales plásticos recuperados de RAEE's y vehículos desintegrados: Manual que tiene una sección sobre identificación rápida de materiales plásticos.](#)



ISO 11469 de 2016 - Muestra de la tabla de retardantes a la llama

Tabla 10.
ISO 1043-4,
retardantes de llama.

Los códigos numéricos se encuentran agrupados dependiendo de la composición química del retardante de llama

Compuestos halogenados

10	Compuestos clorados alifáticos / alicíclicos
11	Compuestos clorados alifáticos / alicíclicos en combinación con compuestos de antimonio
12	Compuestos aromáticos clorados
13	Compuestos aromáticos clorados en combinación con compuestos de antimonio
14	Compuestos bromados alifáticos / alicíclicos
15	Compuestos bromados alifáticos / alicíclicos en combinación con compuestos de antimonio
16	Compuestos aromáticos bromados (excepto difenil éter bromado y bifenilos)
17	Compuestos aromáticos bromados (excepto difenil éter bromado y bifenilos) en combinación con compuestos de antimonio
18	Éter difenílico polibromado
19	Éter difenílico polibromado en combinación con compuestos de antimonio
20	Bifenilos polibromados

[Directrices Técnicas para el manejo de materiales plásticos recuperados de RAEE's y vehículos desintegrados: Manual que tiene una sección sobre identificación rápida de materiales plásticos.](#)

Técnicas de identificación rápida



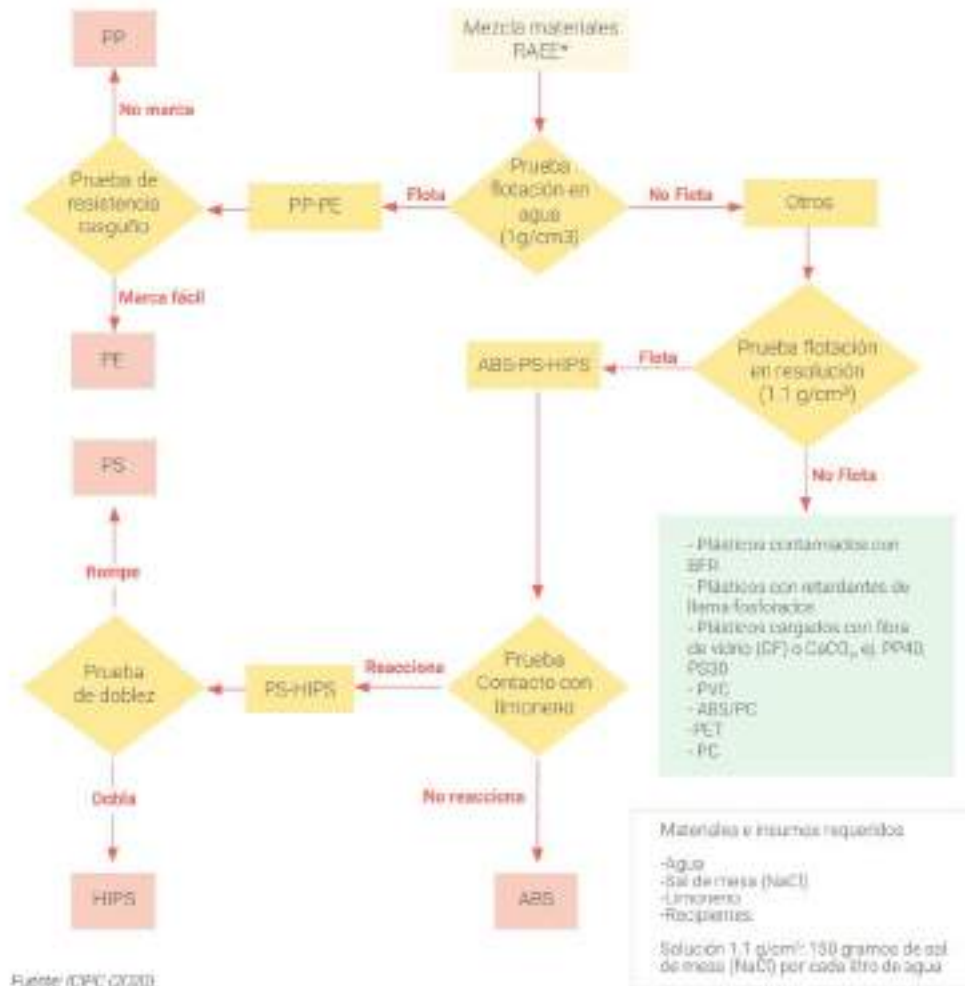
Arbol de decisiones

Figura 20.
Diagrama de flujo para la identificación de materiales en sitio.

Convenciones

- Producto Intermedio
- Materiales aptos para reciclajes, libres de contaminantes
- Método de separación/ identificación de plásticos
- Mezcla de material no aprovechables. Se pueden hacer procesos posteriores de clasificación si es requerido.

*Se parte de una mezcla de los materiales comúnmente encontrados en fuentes: RAEE, ABS, ABS/PC, PS, PE, PS, HIPS, PC, ABS/BFR, PS-BFR y en menor cantidad PVC, PMMA, PU y otros.

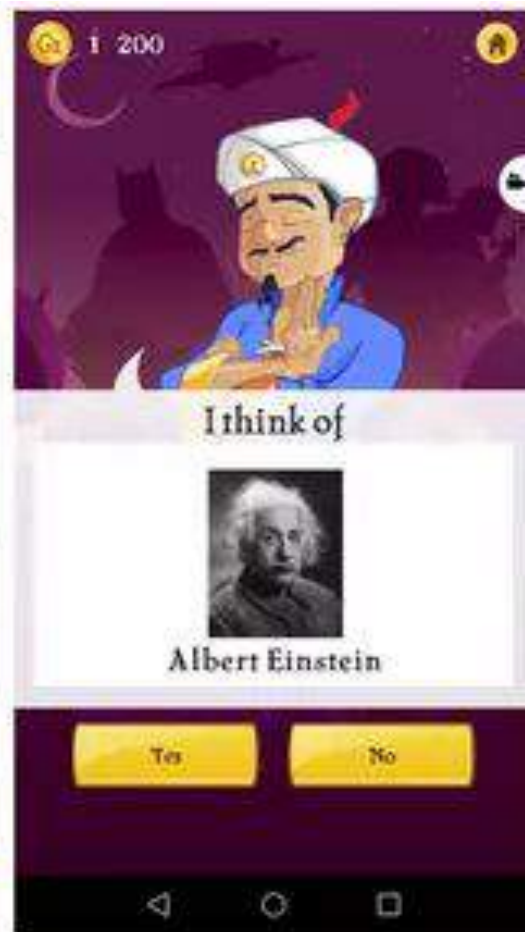


Mientras tanto los gestores...





**Técnicas de
identificación rápida
+
Un pequeño juego...**





Entendamos la inferencia Bayesiana

La inferencia bayesiana utiliza aspectos del método científico, que implica recolectar evidencia que se considera consistente o inconsistente con una hipótesis dada. A medida que la evidencia se acumula, el grado de creencia en una hipótesis se va modificando usando el teorema de Bayes. Con evidencia suficiente, la probabilidad que valida o invalida la hipótesis se vuelve muy alta o muy baja.

Hora de programar





Separación

Solución de apoyo - Aplicación Polyguess

Utiliza pruebas al alcance del gestor, basado en propiedades como Densidad, Dureza, Goteo y color de llama, para identificar materiales.



Proyecto: UNDP-COL 98842



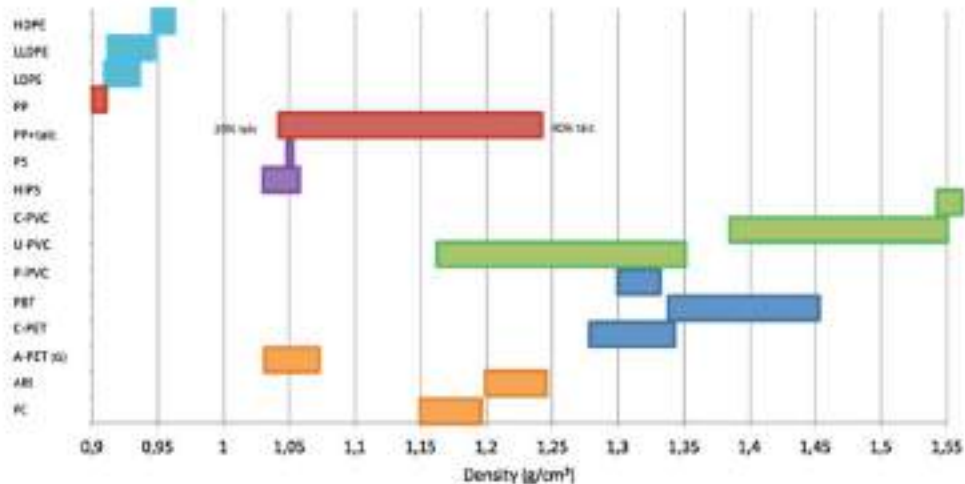
Polyguess es una solución de identificación **rápida** de familias de materiales que ofrece la oportunidad de **fortalecer** la cadena de **reciclaje** del país



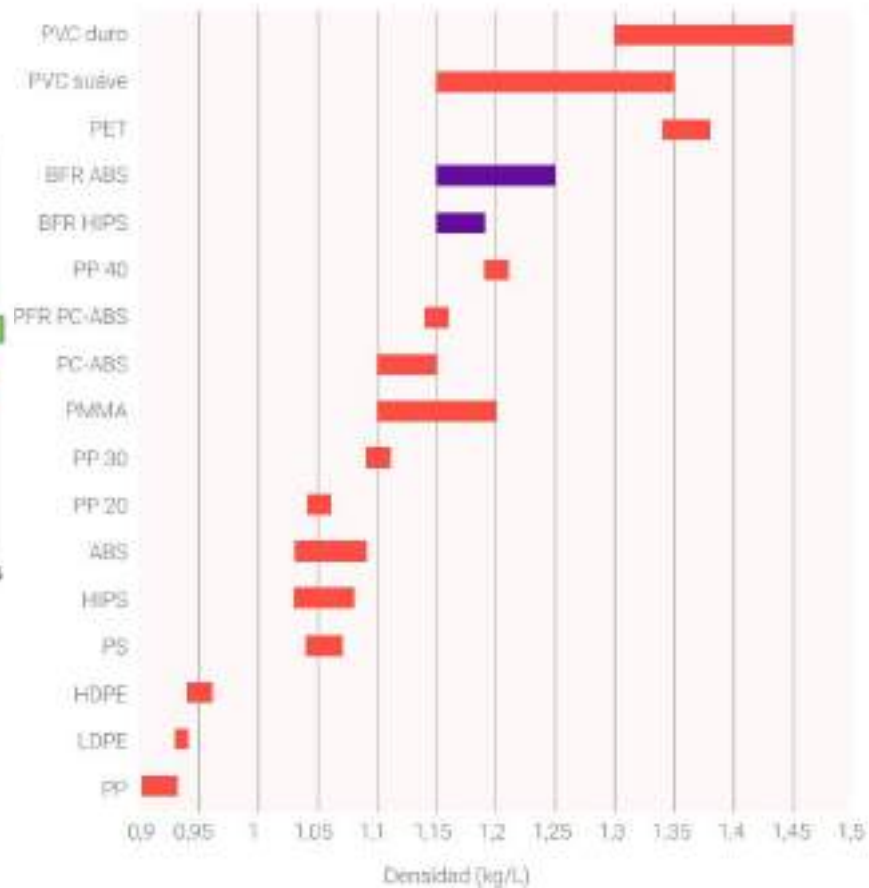
***Las técnicas rápidas de
identificación no reemplazan las
técnicas analíticas***



Identificación por densidad



Rangos de densidad



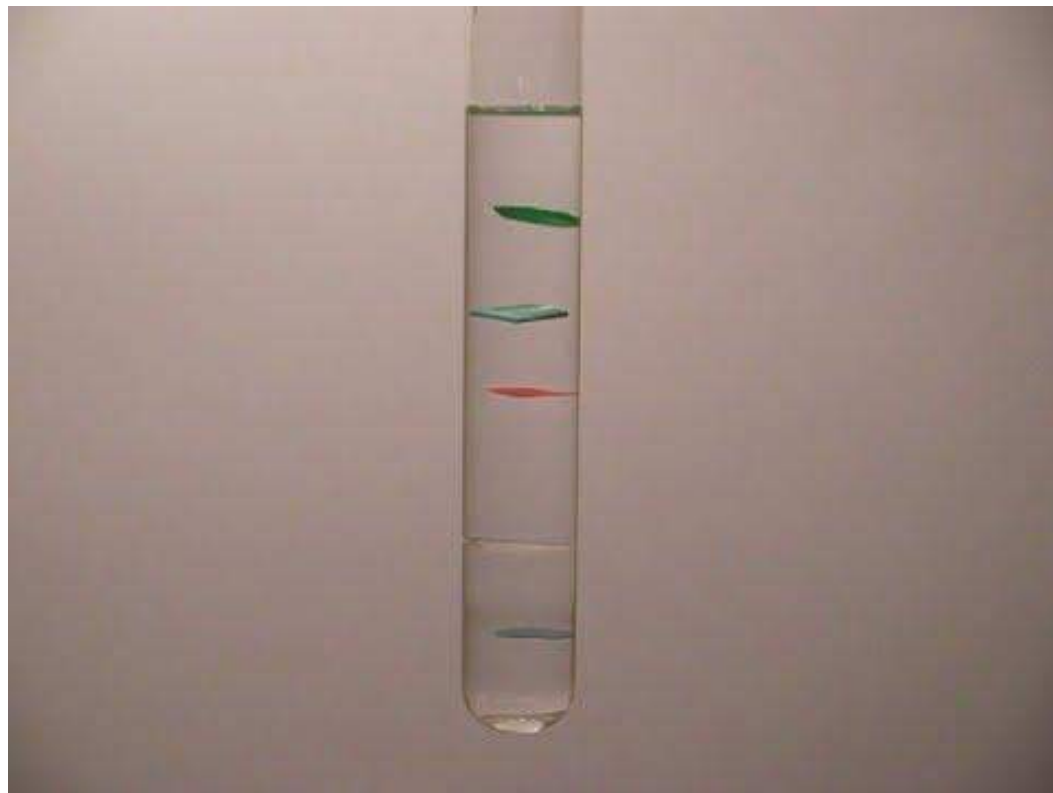


Clasificación por densidad

Método simple de columna de densidades

- K_2CO_3 45% w/v (1.42 g/cm^3)
- NaCl 12% w/v ($1.1 - 1.2 \text{ g/cm}^3$)
- H_2O (1.0 g/cm^3)
- Isopropanol 45% v/v ($0.92 - 0.94 \text{ g/cm}^3$)
- Etanol 60% v/v ($0.90 - 0.92 \text{ g/cm}^3$)
- Metanol 80% v/v ($0.88 - 0.90 \text{ g/cm}^3$)

*Densidades por corroborar



Identificación por densidad

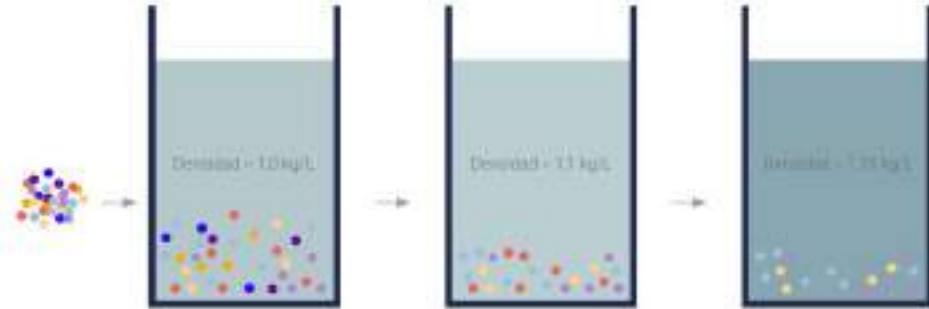


Figura 13.
Técnica de
separación por
densidad.

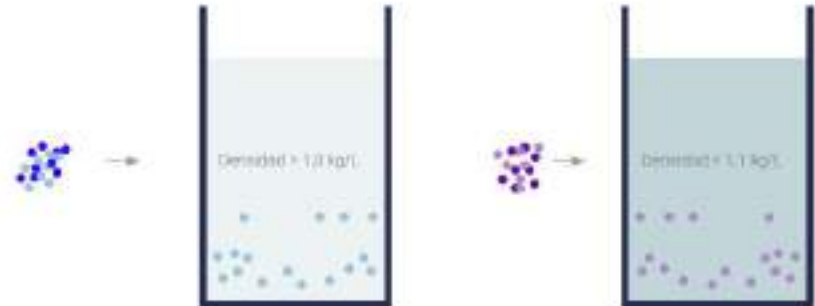
Convenciones

-  PP
-  ABS
-  HIPS
-  PC/ABS
-  PP + E-fiber
-  ABS + BFR
-  HIPS + BFR

1



2





Identificación por densidad - Soluciones de NaCl

Tabla 12.

Densidades aproximadas de soluciones salinas a diferentes temperaturas.

% de Sal	Densidad (kg/L)			
	Temperatura 0 °C	Temperatura 10 °C	Temperatura 25 °C	Temperatura 40 °C
1	1,00747	1,00707	1,00439	0,99908
2	1,01509	1,01442	1,01112	1,00593
4	1,03038	1,02990	1,02530	1,01977
8	1,06121	1,05937	1,05412	1,04798
12	1,09244	1,08946	1,08358	1,07699
16	1,12419	1,12056	1,11401	1,10888
20	1,15663	1,15254	1,14539	1,13774
24	1,18990	1,18557	1,17776	1,16971
26	1,20709	1,20251	1,19443	1,18614

Fuente: Perry (1966).

Prueba de llama



Este proceso se evalúa por medio de la observación:

- Tipo de llama
- Si hay goteo o no
- Generación de hollín
- Humo
- Color de la llama
- Olor



Prueba de llama

Tabla 15.

Comportamiento de plásticos de fuentes RAEE y UDV a la llama.

Material	Comportamiento a la llama*	Color llama	Tipo de goteo	Olor
PP	II	Llama amarilla con centro azul.	Arde con goteo.	Vapores con olor a parafina.
PEBD	II	Llama amarilla con centro azul.	Arde con goteo.	Vapores con olor a parafina.
PEAD				
PS	II	Llama amarilla, papada, brillante.	Humos negros con desprendimiento de hollín.	Olor similar a icopor quemado. El HIPS además tiene olor a caucho.
HIPS				

Convenciones

0: Dificultad para encender.

I: Se quema mientras esté la llama, pero se extingue al retirar la llama.

II: Continúa ardiendo después de encendido.

III: Arde vigorosamente.



Prueba de llama

Convenciones

0: Dificultad para encender.

I: Se quema mientras esté la llama, pero se extingue al retirar la llama.

II: Continúa ardiendo después de encendido.

III: Arde vigorosamente.

Material	Comportamiento a la llama*	Color llama	Tipo de goteo	Olor
ABS	II	Llama amarilla, parpadea, brillante.	Desprendimiento de hollín.	Olor similar al PS y la canela.
PA6	I/II	Llama con borde amarillo azulado.	Crujiente, gotea formando fibras.	Olor similar a cabello quemado.
PC	I	Llama brillante.	Burbujeante y desprende hollín.	Leve olor a fenol.
PVC-U	I	Llama amarilla y levemente verde.		Olor ácido.
PET	I/II	Llama amarilla.		

Contacto indirecto con la llama





Contacto indirecto con la llama

Tabla 16.

Rangos pH de diferentes materiales plásticos.

Material	PH-paper		
	0,5 - 4,0	5,0 - 5,5	8,0 - 9,5
ABS			X
ABS/PC		X	
PS		X	
HIPS		X	
PVC	X		
PE		X	
PP		X	

Identificación por calentamiento controlado



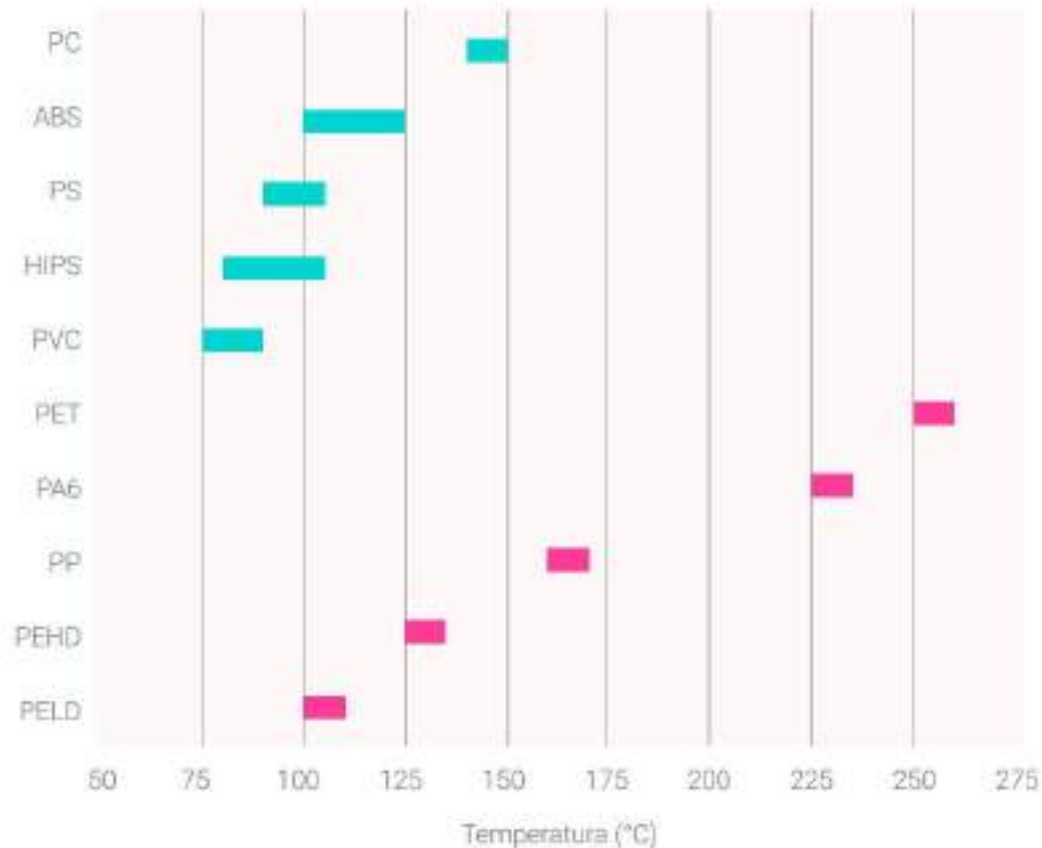
Identificación por calentamiento controlado

Tabla 18.

Rangos de temperaturas de ablandamiento / fusión de algunos materiales plásticos.

Convenciones

- Amorfos (ablandamiento)
- Semicristalinos (Fusión)



Identificación por resistencia química



Tabla 21.
Reacción de materiales plásticos de fuentes RAEE a diferentes solventes.

Material	Gasolina	Tolueno	Diclorometano	Eter etílico	Acetona	Etil Acetato	Etil nol	Limoneno	Otros
PP	vh	vh	vh	i	i	i	i	-	Hidrocarburos
PEBD	vh	h	i	vh	vh	vh	i	-	Triclorobenceno, p-xileno, Decano
PEAD	vh	h	i	vh	vh	vh	i	-	
PS	ivs	s	s	vh	s	s	i	s	TCC, Xileno (caliente), THF
HIPS	ivs	s	s	s	s	s	i	s	
ABS	h	s	s	s	s	s	i	i	
PAS	i	i	i	i	i	i	i	-	Ac. Fórmico, Ac. Sulfúrico, DMF, m-cresol
PC	i	h	s	h	h	h	i	i	
PVC	i	vh	vh	i	vs	vh	i	-	Xileno (caliente), THF, DMF, ciclohexanona
PET	i	i	i	i	vh	h	i	-	Ac. tricloacético, o-diclorofenol, m-cresol, Nitrobenzeno

Convenciones

THF: Tetrahidrofurano
 s: soluble
 i: insoluble
 DMF: Dimetilformamida
 h: hinchamiento
 -: sin información
 TCC: Tetracloruro de carbono

Fuente: ICIPC (2020)



Identificación por doblado

TEST DE DOBLADO

Una simple prueba de doblez hasta los 180° ayuda a distinguir ciertos plásticos. El PS, por ejemplo, es rígido y se rompe fácilmente al doblarse, por su parte el HIPS dobla fácilmente sin romperse. Adicionalmente, los materiales semicristalinos tienden a mostrar marcas blancas de la línea de doblez, diferenciándolos fácilmente de los materiales amorfos.



Identificación por rayado



DUREZA O RESISTENCIA AL RAYADO

Una verificación muy básica de la dureza de un plástico es su comportamiento cuando se raya por ejemplo con la uña o un metal suave (aluminio o cobre) tal como se aprecia en la figura 19.

- Algunos plásticos no se rayan fácilmente: PP, ABS y PS.
- Algunos plásticos que se rayan o marcan fácilmente: los plásticos flexibles o cauchosos, como por ejemplo el PE o el PVC flexible.



INSTITUTO DE
CAPACITACIÓN
E INVESTIGACIÓN
DEL PLÁSTICO Y
DEL CAUCHO

¡Gracias!

Carrera 49 #5 Sur 190. Bloque 37
+574 3116478
Medellín, Colombia
icipc@icipc.org - <https://icipc.org>



@ICIPCmedellin



@ICIPC



@ICIPC_Medellin



@ICIPC