



PACKALL

PackAlliance:
European alliance for innovation training
& collaboration towards future packaging

Linking **Academy** to **Industry**.

Programa de formación: módulos

- Nuevos materiales y biomateriales
- **Diseño ecológico y nuevos procesos de fabricación**
 - Compromiso de ciudadanos y consumidores
 - Gestión de residuos y valorización



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

This project has been funded with support from the European Commission.
This publication [communication] reflects the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.



Curso 1 – Nuevos procesos de fabricación para sistemas de embalaje

- 5. Requerimientos tecnológicos de nuevas soluciones de envasado sostenible (0,3 ECTS)
 - 5.1. Análisis de las tendencias tecnológicas para el envasado de alimentos en el futuro próximo
 - 5.2. Requisitos tecnológicos de las nuevas soluciones de envasado sostenible

Propiedades mecánicas y de barrera

Propiedades mecánicas



Las relaciones entre las cargas aplicadas a un material y las deformaciones inducidas por la aplicación de estas cargas determinan el comportamiento mecánico de un material.

Para describir el comportamiento de un sólido tras la aplicación de una fuerza, conviene clasificar el tipo y dirección de la fuerza en cuestión:

Fuerzas estáticas: los que se aplican de manera constante o por tiempos discretos;

Fuerzas dinámicas (o impacto): los que se agotan en poco tiempo como consecuencia de un impacto o vibración, con el fin de verificar la capacidad del material para absorber la energía del impacto;

Fuerzas cíclicas: aquellos en los que los valores de carga varían entre un valor mínimo y un valor máximo durante un gran número de veces.

Propiedades mecánicas



- Comportamiento a la tracción (elasticidad y plasticidad)
- Comportamiento de compresión
- Dureza y resiliencia
- Dureza
- Resistencia al impacto
- Propiedades de fricción



Las pruebas de tracción son las pruebas más utilizadas para determinar las propiedades mecánicas, tales como:

- El módulo de Young
- el coeficiente de Poisson
- Límite elástico
- Alargamiento a la rotura
- Tenacidad

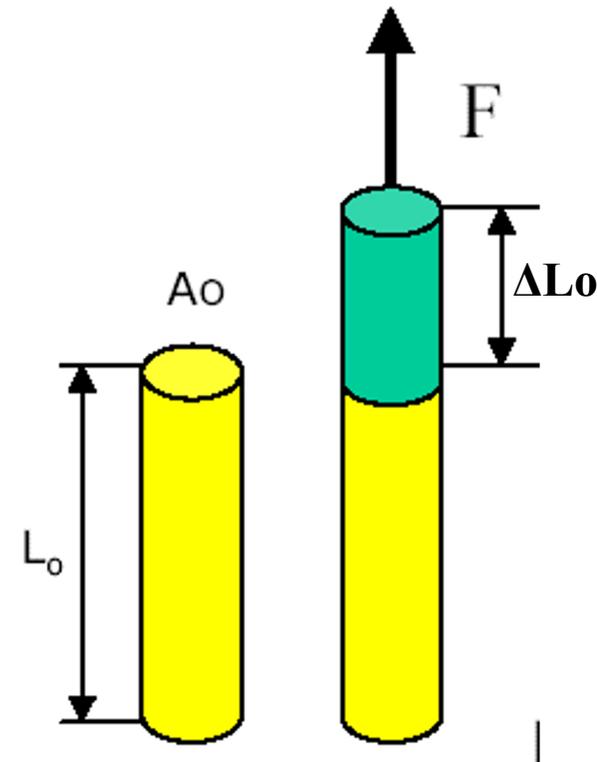
Se aplica una deformación controlada a una muestra y la respuesta de la muestra se mide en términos de resistencia.

Tensión nominal

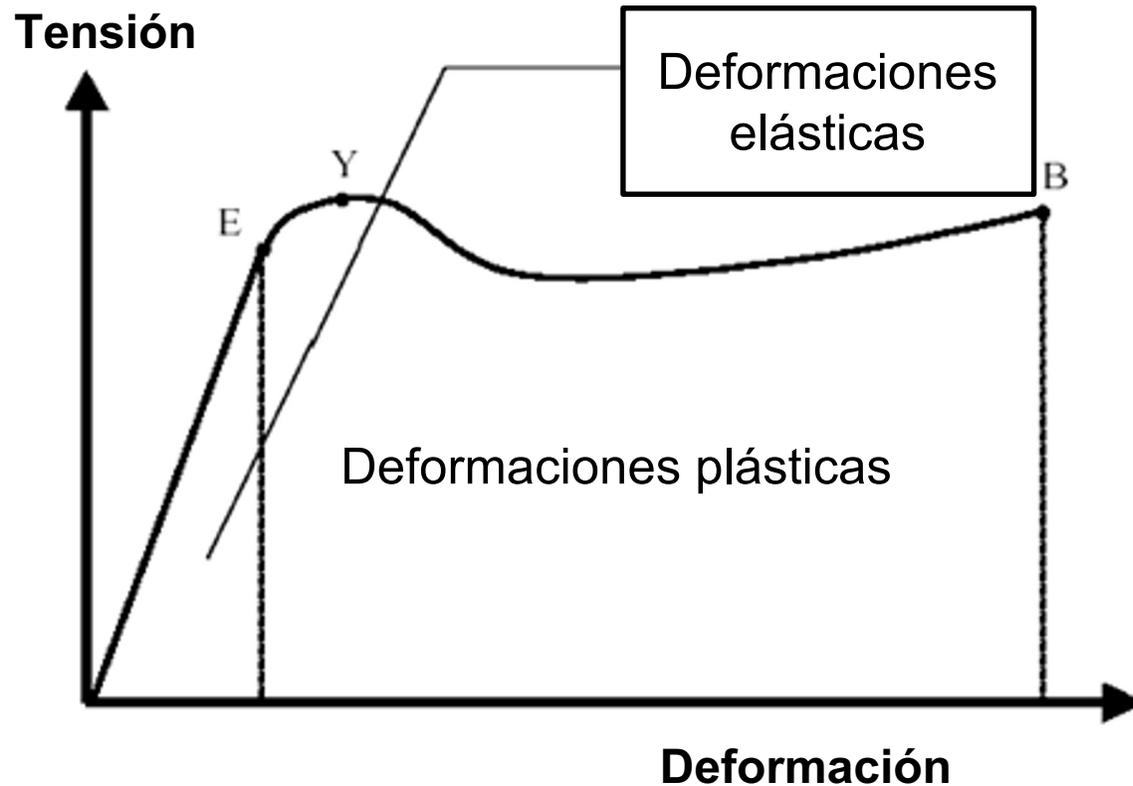
$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Deformación nominal

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0}$$



Curva tensión-deformación



E = límite de elasticidad;
Y = límite de rendimiento;
B = límite de ruptura

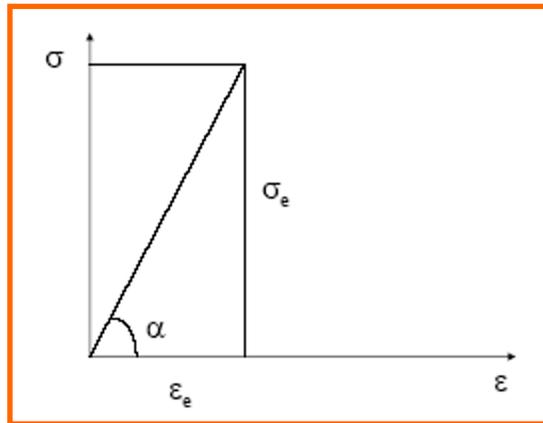
Deformación elástica: Cuando se elimina la tensión, el material vuelve a la dimensión que tenía antes de aplicar la carga. La deformación es *reversible*, no permanente.

Deformación plástica. Cuando se elimina la tensión, el material no vuelve a su dimensión anterior, pero hay una deformación *permanente*, irreversible.

En la parte inicial de la curva tensión-deformación (región elástica) existe **proporcionalidad entre σ y ε** (Ley de Hooke, módulo de Young, E).

$$\sigma = E\varepsilon$$

El módulo de Young E depende de la capacidad de los enlaces atómicos para deformarse. Cuanto mayor sea la fuerza del enlace, mayor será la **rigidez** del material.



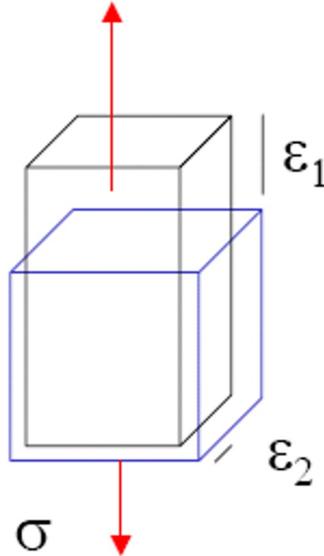
$$E = \frac{\sigma_e}{\varepsilon_e} = \frac{A \sin(\alpha)}{A \cos(\alpha)} = \operatorname{tg}(\alpha)$$

El coeficiente de Poisson

En la región elástica, al aplicar una tensión uniaxial, se produce una contracción transversal proporcional a la deformación longitudinal aplicada. Esta deformación transversal es medible por el cambio del diámetro del espécimen.

La constante de proporcionalidad entre las deformaciones es la relación de Poisson (valor positivo) que se puede evaluar midiendo las deformaciones transversales.

Si el comportamiento es isotrópico, la relación de Poisson se define como:



$$\nu = - \frac{\epsilon_{transverse}}{\epsilon_{longitudinal}} = - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

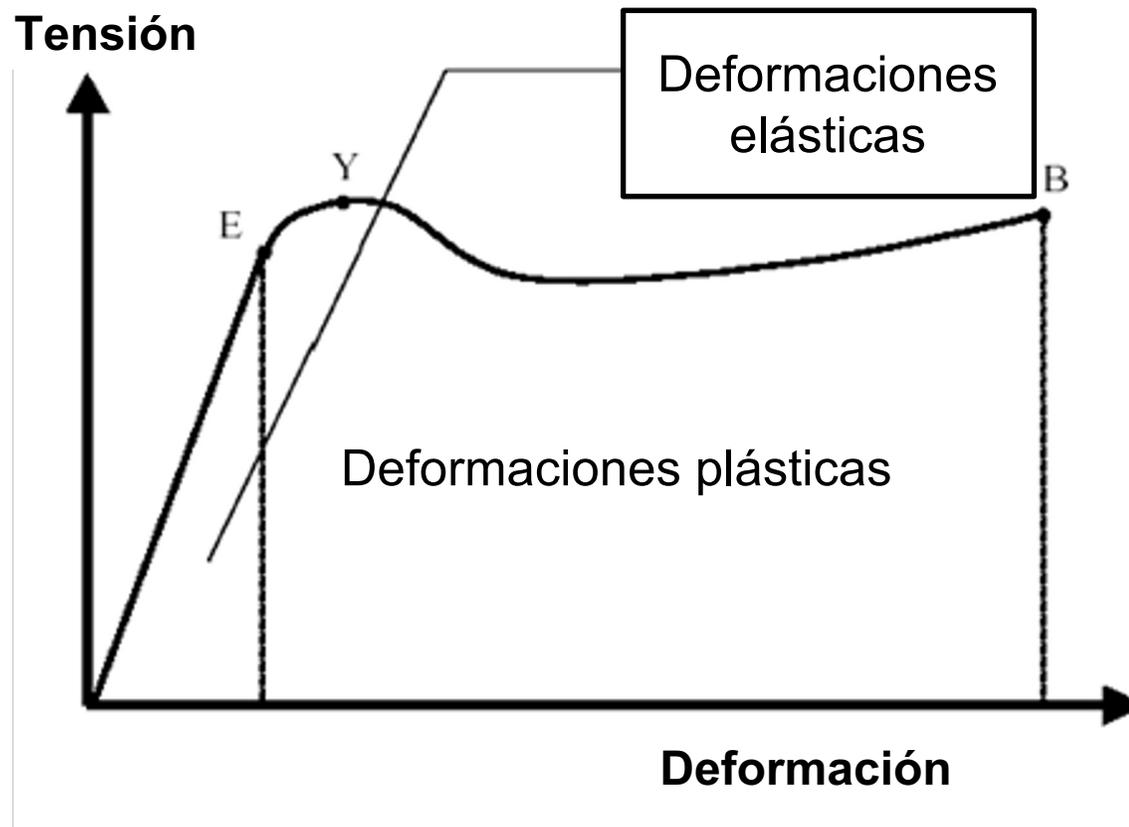
- Para un material ideal debe ser $\nu=0.5$ (Corresponde a una variación cero del volumen)
- En los materiales más utilizados $0,25 < \nu < 0,4$ (aumento de volumen)

Límite elástico

El límite elástico **separa** la región de **comportamiento elástico** de la región de **comportamiento plástico**.

A veces, este valor no es fácilmente detectable.

El límite aparente de elasticidad se define en 0,2% de deformación permanente



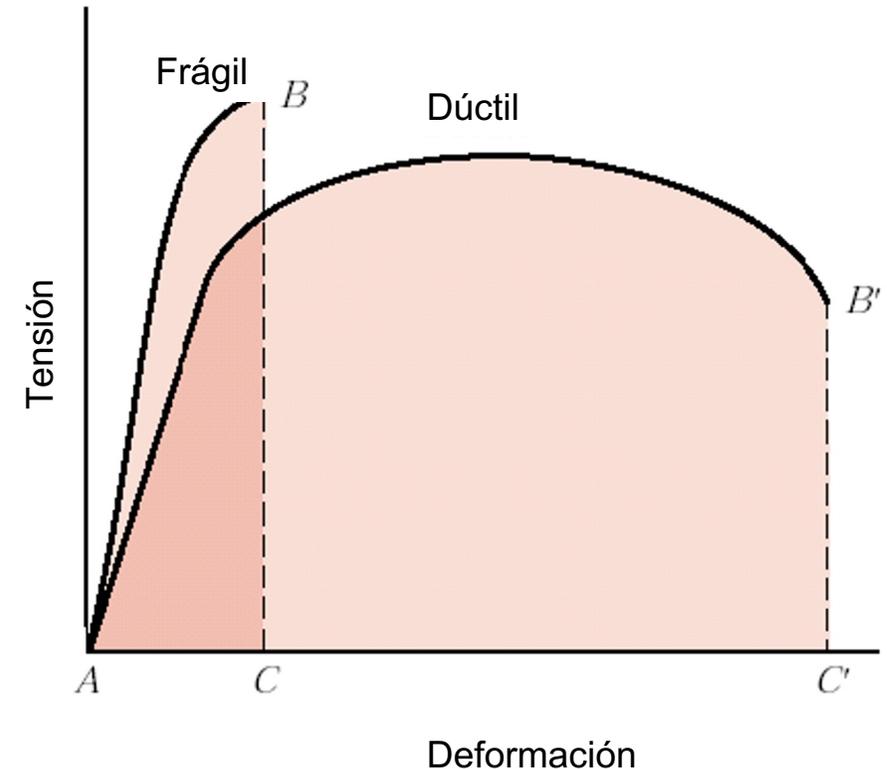
Una vez alcanzado el límite de deformación elástica, existen dos posibles comportamientos del material:

- la muestra **se rompe** → **MATERIAL FRÁGIL**
- la muestra **continúa deformándose**, y la deformación permanece incluso después de que se cancela la fuerza aplicada → **MATERIAL DÚCTIL**

La fragilidad y la ductilidad dependen de la temperatura:

la medida de la **ductilidad** de un material es el porcentaje de **elongación a la rotura**:

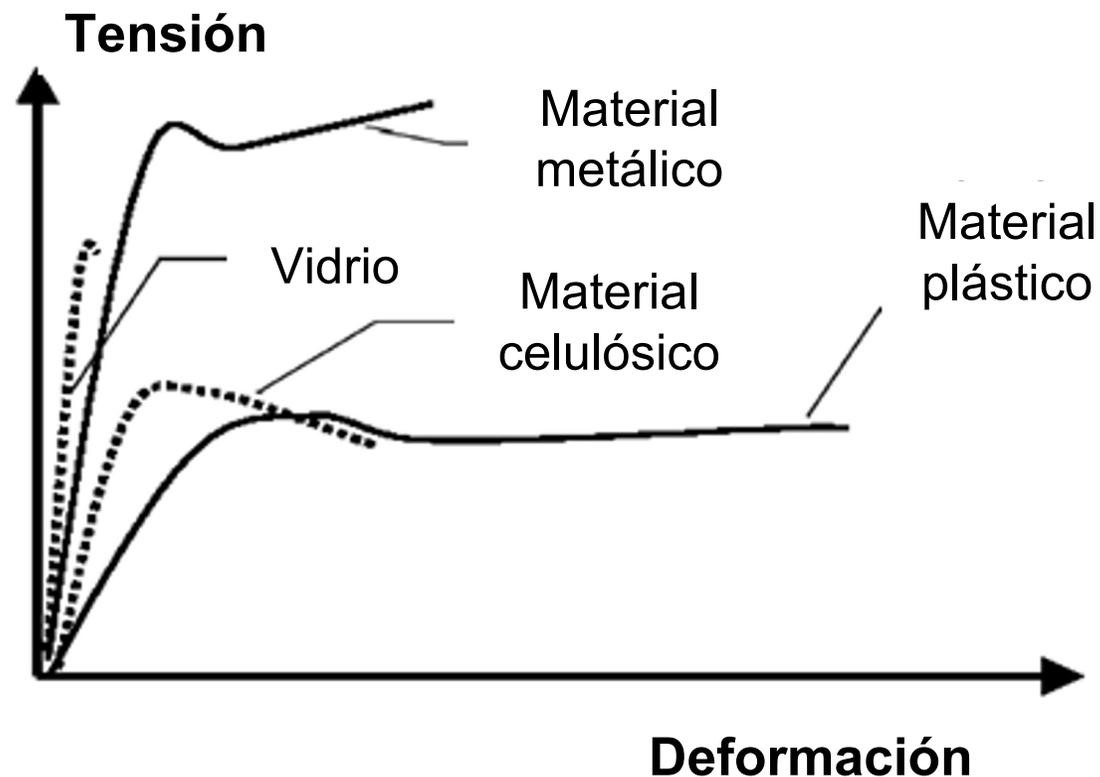
$$\text{Elongación a la rotura} = \frac{L - L_0}{L_0} * 100$$





Es la energía requerida para fracturar un material bajo una carga estática. está representado por **el área bajo la curva real σ - ϵ del ensayo de tracción.**

Curvas tensión-deformación para diferentes materiales



Propiedades mecánicas de algunos materiales de embalaje

MATERIAL	Módulo de Young (Mpa)	Deformación a la rotura (%)	Tensión a la rotura (Mpa)
Poliéster	4000-5000	50-120	170-270
Polipropileno	2000-3500	600-800	35-50
Aluminio	70000	-	70-210
Hojalata	1800000	-	33-740
Vidrio	70000	-	70

La interacción envase/alimento es el resultado de una transferencia de materia entre el envase, el alimento y el medio exterior, capaz de modificar las propiedades del alimento y/o del envase.

Dependiendo del tipo de molécula involucrada en la transferencia de materia y de cómo se desvela esta interacción, hablamos de:

- **permeación de gases**
- **absorción de moléculas orgánicas**
- **migración**

La interacción envase/alimento es el resultado de una transferencia de materia entre el envase, el alimento y el medio exterior, capaz de modificar las propiedades del alimento y/o del envase.

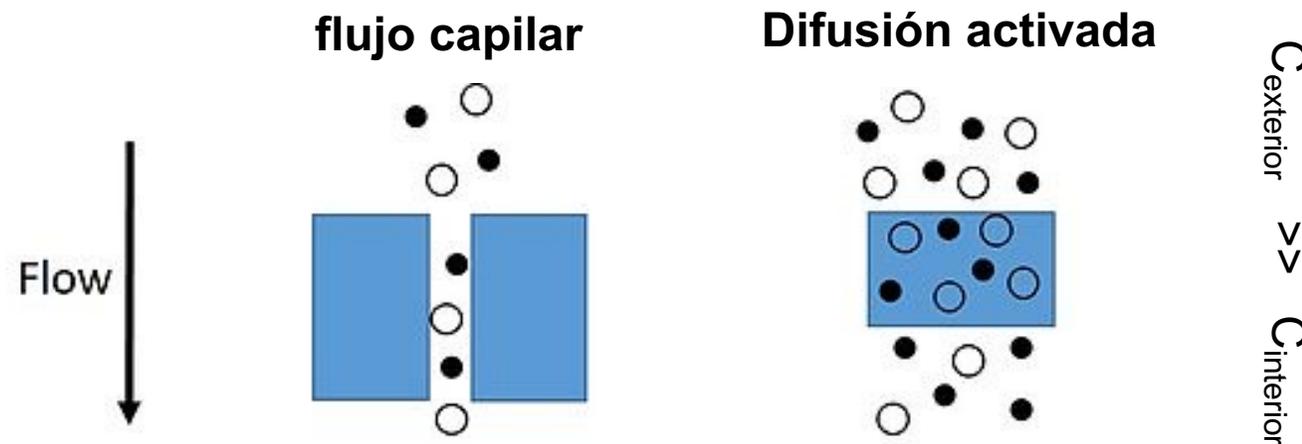
Dependiendo del tipo de molécula involucrada en la transferencia de materia y de cómo se desvela esta interacción, hablamos de:

- **permeación de gases**
- **absorción de moléculas orgánicas**
- **migración**

A diferencia de los materiales de embalaje hechos de vidrio o metales, los envases hechos de **polímeros** son **permeables a moléculas pequeñas** como gases, vapor de agua, vapor orgánico y otros compuestos de bajo peso molecular.

Hay 2 procesos por los cuales los gases y vapores pueden atravesar materiales poliméricos:

- Los gases y vapores fluyen a través de poros microscópicos, agujeros y grietas en la materia (**flujo capilar**)
- Los gases y vapores se disuelven en el polímero en una superficie, se difunden a través del polímero a través de vacantes inter y/o intramoleculares en virtud de un gradiente de concentración, y se evaporan en la otra superficie del polímero. Este proceso de “disolución-difusión” (también conocido como "**Difusión activada**”) se describe como la **verdadera permeabilidad**.



Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/Membrane_gas_separation

Grietas y/o roturas micro y macroscópicas: estos defectos son accidentales y, por lo tanto, impredecibles, como consecuencia de esfuerzos mecánicos (abrasión) y daños físicos (fisuras);

Poros y capilares micro o macroscópicos: varían en tamaño y son el resultado de perforaciones o distribución no uniforme de los componentes del material (cargas, pigmentos u otros ingredientes) o defectos en las soldaduras;

Vacantes inter y/o intramoleculares: representan los espacios entre moléculas o dentro de una misma molécula que permiten el paso de gases. Sus dimensiones son pequeñas y variables como consecuencia de los movimientos térmicos ya que están sujetos a los movimientos moleculares. Dependen de la naturaleza y la morfología del polímero.

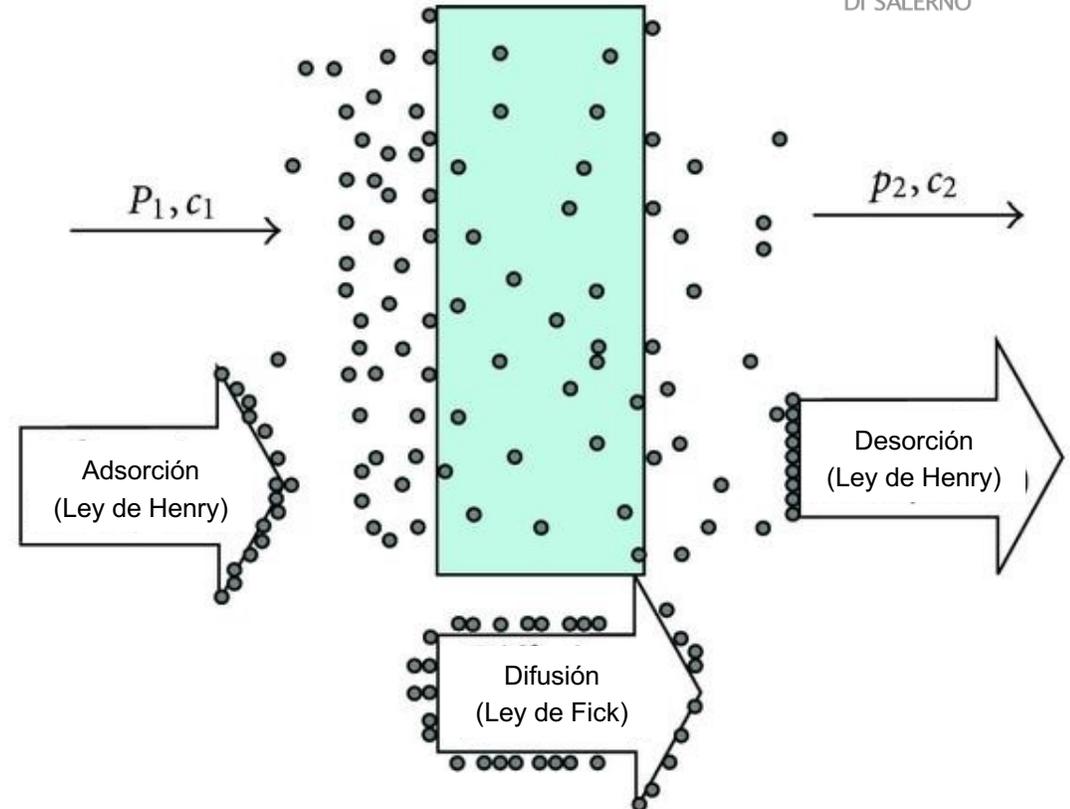
La permeabilidad se define como *la cuantificación de la transmisión de permeado, gas o vapor, a través de un material resistente.*

El concepto de permeabilidad se asocia normalmente a la evaluación cuantitativa de la **propiedades de barrera** de un material. Un material con buenas propiedades de barrera tiene una permeabilidad baja, mientras que los materiales con propiedades de barrera bajas tienen una permeabilidad alta.

El análisis y evaluación de la permeabilidad de los envases son de fundamental importancia para la **calidad de un alimento envasado** porque el intercambio de O_2 , CO_2 y $H_2O(g)$ entre el interior y el exterior de la caja puede causar alteraciones en los alimentos.

El transporte de una molécula de gas a través de una membrana de polímero homogénea y no porosa puede describirse como el siguiente proceso:

- (i) **ADSORCIÓN:** condensación y solución del penetrante en una superficie de la membrana (*favorecido por descensos de temperatura y aumentos de presión*)
- (ii) **DIFUSIÓN:** en forma de líquido, a través de él bajo la influencia de un gradiente de concentración (*favorecida por el aumento de la temperatura*)
- (iii) **DESORCIÓN:** evaporación en la otra superficie al estado gaseoso.



- Moléculas de gas o vapor

Fuente: Siracusa (2012). Revista internacional de ciencia de polímeros.

Considere una membrana polimérica de espesor l , de superficie A sometida a un fluido y Q la cantidad total de penetrante que ha pasado a través de esta membrana durante el tiempo t

FLUJO DIFUSIVO:

$$J = Q/At$$

J= Cantidad de penetrante que atraviesa la membrana polimérica durante una unidad de tiempo y por unidad de área.

El flujo difusivo de materia se puede describir cuantitativamente por
LAS DOS LEYES DE FICK

PRIMERA LEY DE FICK: se usa para calcular el flujo de permeante en el ESTADO ESTACIONARIO, es decir, en la condición de que el perfil de concentración no cambie con el tiempo y el flujo es constante.

$$J = -D \frac{dc}{dx}$$

SEGUNDA LEY DE FICK: permite evaluar el cambio en la concentración de permeante dentro del paquete con velocidad variable, es decir, en el ESTADO TRANSITORIO (el perfil de concentración varía con el tiempo) por lo tanto durante el llamado tiempo de retardo (Lag Time).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

D = coeficiente de difusión
cuadrado de la longitud por
unidad de tiempo (cm^2s^{-1});

C = concentración de
permeante *masa de permeante*
por unidad de volumen del
material (mol cm^{-3});

X = longitud en la dirección
del flujo (cm).

t = tiempo (s)

DIFUSIÓN MÁS RÁPIDA para...

- estructura amorfa
- materiales de punto de fusión más bajo
- mayor movilidad molecular
- presencia de enlace secundario
- materiales de menor densidad
- menor tamaño molecular del permeante
- mayor afinidad con el permeante

DIFUSIÓN MÁS LENTA para...

- estructuras cristalinas
- materiales de mayor punto de fusión
- menor movilidad molecular
- presencia de enlace covalente
- materiales de mayor densidad
- mayor tamaño molecular del permeante
- menor afinidad con el permeante

El término sorción se usa generalmente para describir la penetración inicial y la dispersión de moléculas permeables en la matriz polimérica e incluye tanto absorción y adsorción, así como el atrapando en microhuecos o el agrupamiento de agregados.

A una temperatura dada, la concentración local **C** del gas disuelto en el polímero se puede relacionar con la presión **P** por la siguiente relación:

$$C = S(C)p$$

- la concentración **C** se expresa en $\text{cm}^3(\text{STP})/\text{cm}^3$ polímero. De manera más explícita, es la concentración del gas sorbido (calculado en las Condiciones Estándar de Temperatura y Presión, es decir, 273°K y 1 atm) por el polímero que se somete a una presión p del penetrante;
- el coeficiente de solubilidad **S** se da en $\text{cm}^3(\text{STP})/\text{cm}^3 \cdot \text{MPa}$

S(C) es el **COEFICIENTE DE SOLUBILIDAD** y es una medida de afinidad polímero-penetrante

Ley de Henry $\rightarrow C = S \cdot P$ *Aplicable para bajas presiones y gas ideal*

Integrando la primera ley de Fick para el espesor y la concentración y asumiendo que se aplica la ley de Henry, es posible definir la cantidad de gas (**Q**) que atraviesa el material:

$$Q = \frac{A \cdot t \cdot D \cdot S \cdot (p_1 - p_2)}{l}$$

El producto **D·S** se conoce como el “**coeficiente de permeabilidad**” y se representa con el símbolo **P_e**:

$$P_e = D \cdot S$$

$$P_e = \frac{l \cdot Q}{A \cdot t \cdot (p_1 - p_2)}$$

P_e es "la cantidad de permeante que pasa a través de una superficie de unidad de área y espesor durante la unidad de tiempo y debido a una diferencia de presión parcial unitaria"

P_e se expresa comúnmente como **cm³ μm m⁻² 24h⁻¹ bar⁻¹**

De la expresión de P_e , es claro que la transmisión de gas es inversamente proporcional al espesor del material. No siempre se respeta la proporcionalidad inversa: a veces, de hecho, considerando la constante de permeabilidad a través de diferentes espesores del mismo material no se obtiene el mismo valor.

PERMEANCIA (o permeabilidad):

es la cantidad de gas que pasa a través de una unidad de superficie, de espesor dado, por unidad de tiempo bajo un régimen unitario parcial ΔP

$$P = \frac{P_e}{l}$$

Se denota con la letra **P** y se expresa como $\text{cm}^3 \text{m}^{-2} 24\text{h}^{-1} \text{bar}^{-1}$

De la expresión de P_e , también es obvio que la transmisión de gas es directamente proporcional a la diferencia de presión. Sin embargo, la proporcionalidad directa con ΔP no siempre se respeta. Por esta razón, ΔP suele considerarse como una condición de la medida y se define otra cantidad:

TASA DE TRANSMISIÓN DE GAS:

es la cantidad de gas que pasa por una unidad de superficie de espesor dado y bajo una diferencia de presión parcial dada durante la unidad de tiempo

$$GTR = P(p_1 - p_2) = \frac{P_e}{l} (p_1 - p_2)$$

se mide en $\text{cm}^3 \text{m}^{-2} 24\text{h}^{-1}$ y se denota como **GTR** que, dependiendo de la especie permeante, puede tomar muchas formas: O_2TR , N_2TR , CO_2TR , WVTR .

Propiedades de barrera



(UNI 10534 12/94)

BARRERA	P/WVTR
Muy alto	< 0.5
Alto	0.5- 3.0
Medio	3.1 - 30
Bajo	31 - 150
Muy bajo	> 150

$\text{cm}^3 \text{m}^{-2} 24\text{h}^{-1} \text{bar}^{-1} \text{d}$ a 23°C y 0% UR (gases)

$\text{g m}^{-2} 24\text{h}^{-1} \text{bar}^{-1} \text{d}$ a 38°C y 90% UR (vapor de agua)

material polimerico	Permeabilidad al oxígeno de una película de 25 µm de espesor (cm³/m² 24h bar)
Polietileno de baja densidad (LDPE)	7000-8000
Polietileno de alta densidad (HDPE)	2800-3000
Polipropileno (PP)	2300-3700
Poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC)	6000-9000
Poliestireno (PS)	3800-5400
Poli (tefalato de etileno) (PET)	45-90
Poliamida 6 (PA6)	20-40
Poliamida 11 (PA11)	500-1500
Poli(cloruro de vinilideno) (PVDC)	12-100
Poli(etileno vinilo alcohol) (EVOH)	1-



PACKALL

PackAlliance:
European alliance for innovation training
& collaboration towards future packaging

Linking Academy to Industry.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI SALERNO



Derechos de autor: CC BY-NC-SA 4.0: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

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

Sin embargo, sólo bajo los siguientes términos:

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

No comercial — no puede utilizar el material con fines comerciales.

Compartir por igual —si remezcla, transforma o construye sobre el material, debe distribuir sus contribuciones bajo la misma licencia que el original.

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



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

This project has been funded with support from the European Commission.

This publication [communication] reflects the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.