

# Auxiliar IV

## Cerámicos II y Polímeros I

Gaspar Fábrega Ragni

Universidad de Chile  
DIMEC

CHILE 2022.5



# Contents

1 Preguntas Conceptuales

2 EJERCICIOS:

3 Gráficos:

## Preguntas Conceptuales

## ¿Qué es un test de indentación?

Corresponde a un conjunto de ensayos utilizados para determinar la dureza de un material, relacionándolo con el tamaño de la muesca dejada por un **indentador**: una herramienta de dimensiones conocidas con la que se aplica una carga sobre la superficie del material a estudiar.

Dependiendo de la dureza del material, se utilizan distintos ensayos con distintas escalas, dependiendo de la geometría del indentador y la fuerza aplicada:

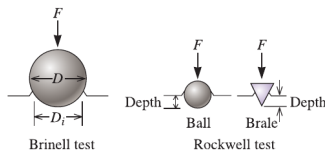
**Table 6-5** Comparison of typical hardness tests

| Test       | Indenter                  | Load    | Application               |
|------------|---------------------------|---------|---------------------------|
| Brinell    | 10-mm ball                | 3000 kg | Cast iron and steel       |
| Brinell    | 10-mm ball                | 500 kg  | Nonferrous alloys         |
| Rockwell A | Brale                     | 60 kg   | Very hard materials       |
| Rockwell B | 1/16-in. ball             | 100 kg  | Brass, low-strength steel |
| Rockwell C | Brale                     | 150 kg  | High-strength steel       |
| Rockwell D | Brale                     | 100 kg  | High-strength steel       |
| Rockwell E | 1/8-in. ball              | 100 kg  | Very soft materials       |
| Rockwell F | 1/16-in. ball             | 60 kg   | Aluminum, soft materials  |
| Vickers    | Diamond square pyramid    | 10 kg   | All materials             |
| Knoop      | Diamond elongated pyramid | 500 g   | All materials             |

## ¿Qué es un test de indentación?

Por ejemplo, para la dureza Brinell, se aplica una carga de tres toneladas con una esfera de diametro 10 [mm], con lo que la dureza se obtiene con:

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - D_i^2})}$$



**Figure 6-17** Indenters for the Brinell and Rockwell hardness tests.

# Explique el proceso de fabricación conocido como *tape casting*

El método conocido como *tape casting* es una técnica utilizada para fabricar laminas delgadas de cerámicos (de 3 a 100 [ $\mu m$ ]) en la que una suspensión homogénea (slurry) de polvos cerámicos en solvente es distribuida en una superficie no adherente en una capa delgada por medios mecánicos (recipiente con distribución controlable), luego es secada, para poder finalmente sinterizarla y obtener el producto final.

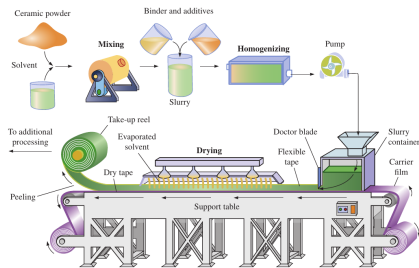
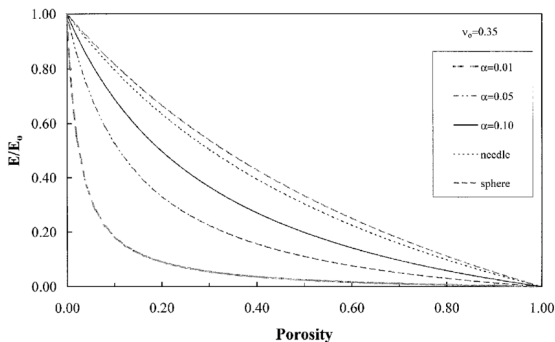


Figure 15-9 Stages of the tape casting process. (Based on Encyclopedia Britannica, Inc.)

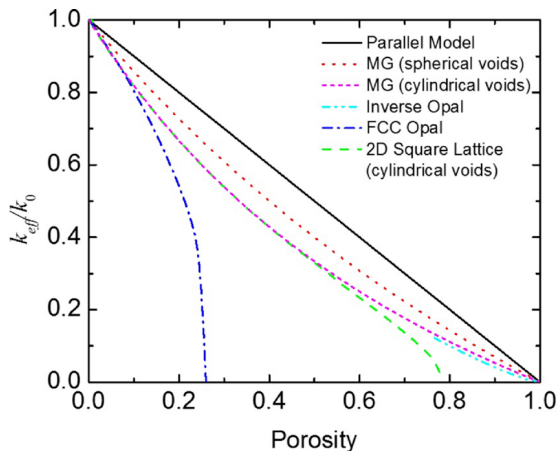
## ¿Por qué es importante controlar la porosidad en un cerámico?

La porosidad afecta muchas propiedades de los materiales cerámicos, y debemos ser cuidadosos de que el método de fabricación genere un producto final, de manera que se cumplan las características necesarias por el diseño.

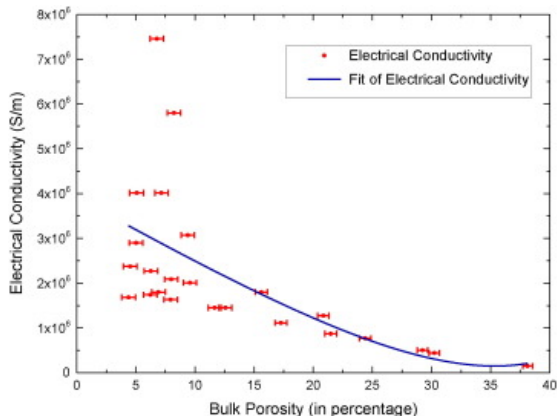


## ¿Por qué es importante controlar la porosidad en un cerámico?

En el caso de la conductividad térmica, puede ser que se necesite un valor específico si se está utilizando el material como aislante.

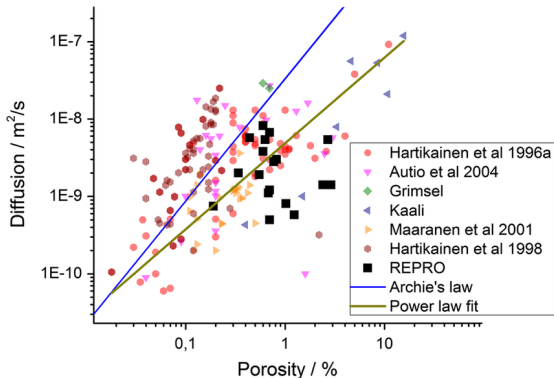


# ¿Por qué es importante controlar la porosidad en un cerámico?

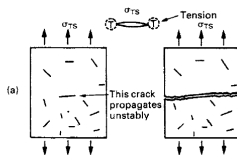


# ¿Por qué es importante controlar la porosidad en un cerámico?

El cambio en las propiedades del material no siempre es negativo, ya que en algunos casos se desea cierta porosidad debido a que las propiedades que se buscan cambian en la dirección contraria a otras.



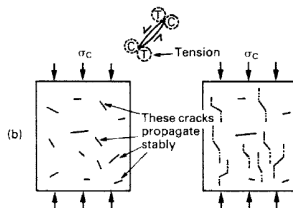
La resistencia a la compresión en cerámicos es mayor a la de tracción, explique porqué.



Los materiales cerámicos casi siempre poseen grietas y fallas, principalmente producidos por el método de fabricación, que dejan pequeños poros (por ejemplo el sinterizado, que deja poros angulares). Estrés térmico debido a cambios de temperatura también pueden generar grietas en el material.

Bajo tensión, estas grietas crecen de manera inestable, y el material falla debido al crecimiento de la grieta más grande.

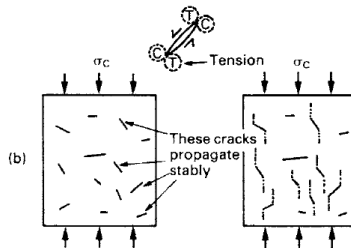
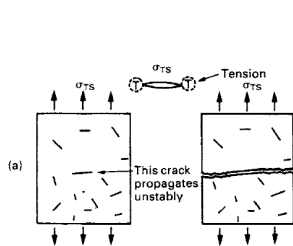
La resistencia a la compresión en cerámicos es mayor a la de tracción, explique porqué.



Bajo compresión, estas grietas crecen de manera estable y en la misma dirección del esfuerzo, y en vez de fallar debido al crecimiento de la grieta más grande, esta falla debido a la generación de una zona de acumulación de grietas.

Por esto, En tensión, el factor limitante para la falla es el tamaño de la grieta más grande, y en compresión es el promedio del tamaño.

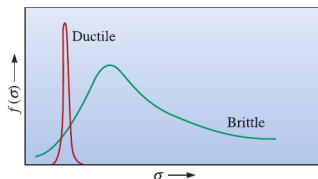
La resistencia a la compresión en cerámicos es mayor a la de tracción, explique porqué.



## Explique el concepto de variabilidad de la resistencia de cerámicos relacionándolo con el módulo de Weibull.

En materiales metálicos, el comportamiento respecto a la falla no tiene mucha variabilidad, y se comporta como una distribución gaussiana con una baja desviación estándar.

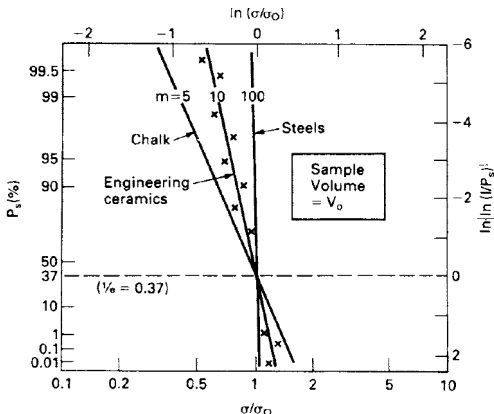
En cerámicos, existe una probabilidad de falla en todo el rango de esfuerzos aplicados sobre el material, ya que depende de la probabilidad de encontrar una grieta de tamaño crítico tanto al interior como en la superficie de la pieza.



**Figure 7-13** The Weibull distribution describes the fraction of the samples that fail at any given applied stress.

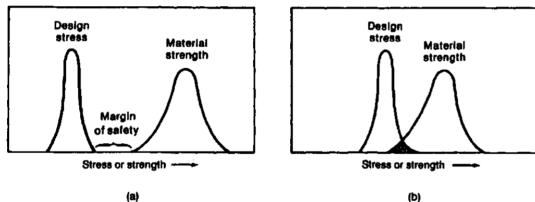
## Explique el concepto de variabilidad de la resistencia de cerámicos relacionándolo con el módulo de Weibull.

Al graficar el esfuerzo aplicado respecto a la probabilidad de falla (en vez de la distribución), se puede observar cómo los materiales dúctiles (metales) fallan en una región muy cercana a su  $\sigma_{UTS}$ , y cómo en cerámicos, la pendiente de la recta indica que existe una región mayor sobre la cual pueden fallar.



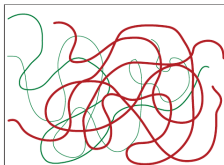
## Explique el concepto de variabilidad de la resistencia de cerámicos relacionándolo con el módulo de Weibull.

Finalmente, podemos mencionar cómo cambian las condiciones de diseño, ya que hay que considerar el comportamiento en un continuo para establecer una región segura de operación respecto a las cargas que nuestra pieza o componente va a resistir.

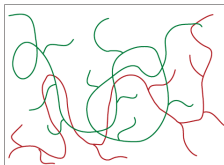


# Mencione los distintos tipos de polímeros y por qué son diferentes.

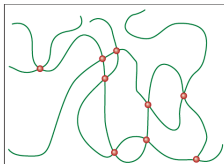
Las propiedades y clasificación de los polímeros depende del nivel de entrecruzamiento y ramificación de sus cadenas:



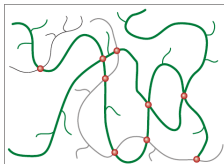
(a) Linear unbranched



(b) Linear branched



(c) Thermoset-unbranched



(d) Thermoset-branched

# Mencione los distintos tipos de polímeros y por qué son diferentes.

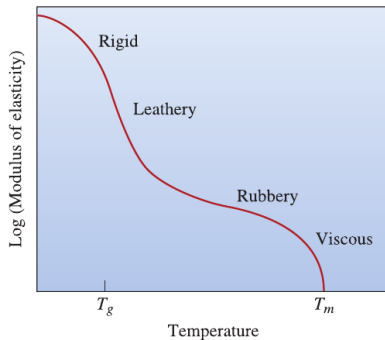
- **Termoplásticos:** Cadenas lineales con o sin ramificaciones. Se comportan generalmente de una manera plástica y dúctil (debido a una mayor proporción de enlaces secundarios entre cadenas). Estas cadenas pueden des-enrollarse al aplicar un esfuerzo. Pueden ser amorfos o cristalinos, y su comportamiento mecánico es altamente influenciado por cambios de temperatura
- **Termoestables:** Los polímeros termoestables se componen de largas cadenas con uniones entre si (entrecruzadas), aumentando la resistencia debido a interacciones más resistentes entre cadenas que los enlaces secundarios o fuerzas de van der waals. Son en general mas resistentes pero a su vez más frágiles.
- **Elastomeros:** Termoplásticos o termoestables con poco entrecruzamiento donde las cadenas poseen una estructura similar a un resorte, permitiendo un comportamiento altamente elástico (mas de un 200%).

Mencione los distintos tipos de polímeros y por qué son diferentes.

**Table 16-1** Comparison of the three polymer categories

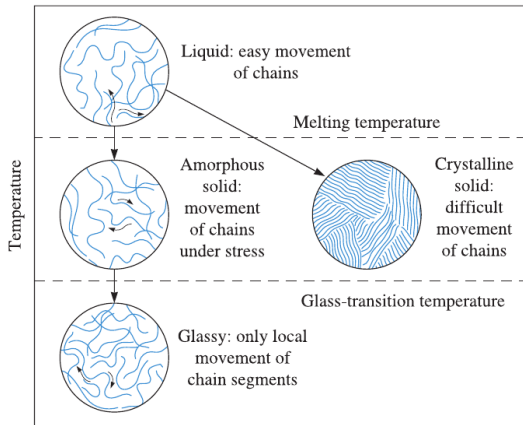
| Behavior      | General Structure                                                                   | Example        |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Thermoplastic | Flexible linear chains (straight or branched)                                       | Polyethylene   |
| Thermosetting | Rigid three-dimensional network (chains may be linear or branched)                  | Polyurethanes  |
| Elastomers    | Thermoplastics or lightly cross-linked thermosets, consist of spring-like molecules | Natural rubber |

# Explique el efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas de los polímeros.



**Figure 16-12** The effect of temperature on the modulus of elasticity for an amorphous thermoplastic. Note that  $T_g$  and  $T_m$  are not fixed.

# Explique el efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas de los polímeros.



**Figure 16-11** The effect of temperature on the structure and behavior of thermoplastics.

## EJERCICIOS:

## P1:

Se aplica una fuerza de 90 N a la cara de un cristal de cuarzo de 0.5x0.5 y 0.1 cm de espesor. Determine el voltaje producido por la fuerza. El módulo de elasticidad del cuarzo es de  $E = 72 \cdot 10^3$  [MPa] y la constante  $d = 2,3 \cdot 10^{-12}$  [m V<sup>-1</sup>]

El voltaje dependerá de la fuerza aplicada ( $F$ ), el área donde se aplica ( $A$ ), el espesor de la pieza ( $t$ ), su módulo de elasticidad ( $E$ ) y una constante que depende del material ( $d$ ).

$$V = \frac{F \cdot t}{A \cdot E \cdot d}$$

## P1:

Reemplazando los datos que tenemos:

$$V = \frac{90 [N] \cdot 0.1 [cm]}{0.5^2 [cm^2] \cdot 72 \cdot 10^3 [MPa] \cdot 2.3 \cdot 10^{-10} [cmV^{-1}]}$$

$$= 21739[V]$$

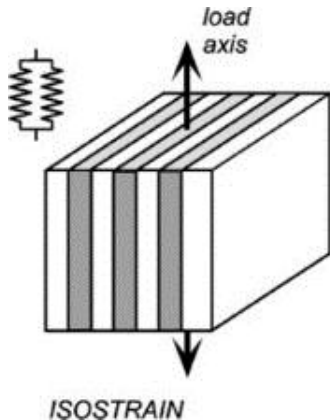
## P2:

Determine las siguientes propiedades en forma horizontal y vertical (según la figura) para el compuesto  $SiO_2/Al_2O_3$  con 30/70 por ciento de cada uno (en volumen):

- Módulo de Young
- Conductividad térmica
- Densidad

| Dato   |                       | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ |
|--------|-----------------------|---------|-----------|
| $\rho$ | $[g\ cm^{-3}]$        | 2.2     | 3.9       |
| $K$    | $[W\ m^{-1}\ K^{-1}]$ | 1.42    | 28        |
| $E$    | $[GPa]$               | 73      | 350       |

## P2:



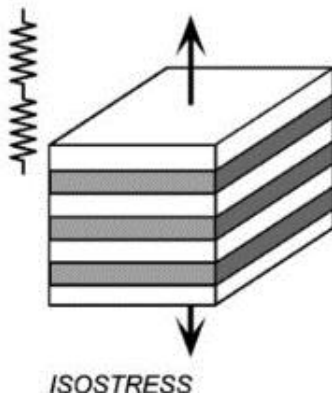
En el caso de isodeformación, el material compuesto se comporta como resortes en paralelo, por lo que las propiedades de este serán:

$$\begin{aligned}
 E_c^{\text{isodef}} &= v_1 E_1 + v_2 E_2 \\
 &= 0.3 \cdot 73 + 0.7 \cdot 350 \\
 &= 266.9 \text{ [GPa]}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 k_c^{\text{isodef}} &= v_1 k_1 + v_2 k_2 \\
 &= 0.3 \cdot 1.42 + 0.7 \cdot 28 \\
 &= 20.03 \text{ [W m}^{-1} \text{ K}^{-1}]
 \end{aligned}$$

## P2:

En isoesfuerzo, el material compuesto se comporta como resortes en serie:



$$\begin{aligned}\frac{1}{E_c^{\text{isoes}}} &= \frac{v_1}{E_1} + \frac{v_2}{E_2} \\ &= \frac{0.3}{73} + \frac{0.7}{370} \\ E_c^{\text{isoes}} &= 163.7 \text{ [GPa]}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{k_c^{\text{isoes}}} &= \frac{v_1}{k_1} + \frac{v_2}{k_2} \\ &= \frac{0.3}{1.42} + \frac{0.7}{28} \\ k_c^{\text{isoes}} &= 4.23 \text{ [W m}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{]}\end{aligned}$$

## P2:

Por ultimo, la densidad es equivalente para los dos sistemas

$$\begin{aligned}\rho_c &= v_1 \cdot \rho_1 + v_2 \cdot \rho_2 \\ &= 0.3 \cdot 2.2 + 0.7 \cdot 3.9 \\ &= 3.39 \text{ [g cm}^{-3}\text{]}\end{aligned}$$

## P3:

Una barra de  $Al_2O_3$  que es de 0,25 [in] de grosor, 0.5 [in] de ancho y 9 [in] de largo se prueba en un aparato de flexión de 3 puntos con los soportes localizados a 6 [in]. La deflexión del centro de la barra se mide como una función de la carga aplicada. La información se muestra en una tabla. Determine la resistencia a la flexión y el módulo de flexión:

| Fuerza [lb] | Deflexión [in] |
|-------------|----------------|
| 14.5        | 0.0025         |
| 28.9        | 0.005          |
| 43.4        | 0.0075         |
| 57.9        | 0.01           |
| 86          | 0.0149         |
|             | (fractura)     |

Table: Datos P3

## P3:

Las ecuaciones a utilizar son:

$$\sigma_{\text{flex}} = \frac{3lP}{2wt^2}$$

$$E_{\text{flex}} = \frac{l^3 m}{4wt^3}$$

Donde:

- $l$  = largo [in]
- $P$  = carga aplicada [lb]
- $w$  = ancho [in]
- $t$  = espesor [in]
- $m$  = pendiente en porción inicial de deflexion

## P3:

Para encontrar el esfuerzo de flexión para cada punto:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{flex } i} &= \frac{3lP_i}{2wt^2} \\ &= \frac{3 \cdot 6 \cdot P_i}{2 \cdot 0.5 \cdot 0.25^2} \\ &= 288 \cdot P_i\end{aligned}$$

## P3:

$$\sigma_{\text{flex } i} = 288 \cdot P_i$$

Con esto, podemos obtener que:

| Fuerza [lb] | Deflexión [in]       | $\sigma_{\text{flex}}$ [Psi] |
|-------------|----------------------|------------------------------|
| 14.5        | 0.0025               | 4176                         |
| 28.9        | 0.005                | 8323                         |
| 43.4        | 0.0075               | 12499                        |
| 57.9        | 0.01                 | 16675                        |
| 86          | 0.0149<br>(fractura) | 24768                        |

## P3

Para calcular el módulo, debemos encontrar nuestra pendiente inicial:

$$m_1 = \frac{F_1}{\delta_1} = \frac{14.5}{0.0025} = 5800$$

y con esto:

$$\begin{aligned} E_{\text{flex}} &= \frac{l^3 m}{4wt^3} \\ &= \frac{6^3 \cdot 5800}{4 \cdot 0.5 \cdot 0.25^2} \\ &= 4 \cdot 10^7 [Psi] \end{aligned}$$

## P4:

**El grado de polimerización del polietetrafluoroetileno es de 7500. Si todas las cadenas de polímeros tienen la misma longitud, calcule:**

- El peso molecular de las cadenas.
- El número total de cadenas en 1000 [g] del polímero.

## P4:

$$\text{Grado de polimerización} = \frac{\text{PM promedio del polímero}}{\text{PM del monomero}}$$

Nuestro monomero tiene un peso molecular de:

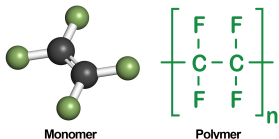


Figure: Politetrafluoroetileno

$$\begin{aligned} PM_{\text{mono}} &= 2C + 4F \\ &= 2 \cdot 12 + 4 \cdot 19 \\ &= 24 + 76 \\ &= 100 \text{ [g mol}^{-1}\text{]} \end{aligned}$$

## P4:

$$7500 = \frac{\text{PM promedio del polímero}}{100}$$

$$\begin{aligned}\text{PM promedio del polímero} &= 100 \cdot 7500 \\ &= 750000 \text{ [g mol}^{-1}\text{]}\end{aligned}$$

## P4:

Podemos encontrar el numero de moles de cadenas en 1000 [g]:

$$\begin{aligned} mol_{1000g} &= \frac{M}{PM_{\text{polímero}}} \\ &= \frac{1000}{750000} \\ &= 0.00133[mol] \end{aligned}$$

y con esto, encontramos la cantidad de cadenas:

$$\begin{aligned} N_{\text{cadenas}} &= 6.02 \cdot 10^{23} \cdot 0.00133 \\ &= 8.03 \cdot 10^{20}[\text{cadenas}] \end{aligned}$$

## P5:

Una cuerda de polietileno pesa 15.12 [g] por centímetro. Si cada cadena contiene 7000 unidades de repetición, calcule:

- El numero de cadenas de polietileno en un tramo de 3 m de cuerda.
- La longitud total de cadenas dentro de la cuerda, suponiendo que la longitud de una unidad de repetición es de 0,24495 [nm] y la distancia entre átomos de carbono es de 0,15 [nm].

$$n \quad \begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ & \backslash & / \\ & \text{C} = \text{C} \\ & / & \backslash \\ \text{H} & & \text{H} \end{array}$$

ethylene

$$\text{R}-\text{O}-\underset{\text{H}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}}-\underset{\text{H}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}}-\left(\underset{\text{H}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}}-\underset{\text{H}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}}\right)-\underset{\text{H}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}}-\underset{\text{H}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}}-\underset{\text{H}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}}-\underset{\text{H}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}}-\left(\underset{\text{H}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}}-\underset{\text{H}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}}\right)-\underset{\text{H}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}}-\underset{\text{H}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}}-\text{O}-\text{R}$$
$$\left( \begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ | & | \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ | & | \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right)_n$$

polyethylene

$n = \text{a very large integer}$

$$\begin{aligned} PM_{\text{mono}} &= 2C + 4H \\ &= 2 \cdot 12 + 4 \cdot 1 \\ &= 28 \text{ [g mol}^{-1}\text{]} \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} PM_{\text{cadena}} &= N_{\text{mon}} \cdot PM_{\text{mono}} \\ &= 7000 \cdot 28 \\ &= 196000 \text{ [g mol}^{-1}\text{]} \end{aligned}$$

## P5:

El peso de un tramo de tres metros de cuerda será:

$$300 \cdot 15.2 = 4536[g]$$

Por lo que la cantidad de cadenas en tres metros es:

$$\begin{aligned} N_{\text{cadenas}} &= N_A \cdot N_{\text{moles}} \\ &= 6.02 \cdot 10^{23} \cdot \frac{4536}{196000} \\ &= 1.39 \cdot 10^{22} [\text{cadenas}] \end{aligned}$$

## P5:

Finalmente, podemos calcular la longitud total de las cadenas encontrando la longitud de una sola cadena:

$$\begin{aligned} L_{\text{cadena}} &= L_{\text{monomero}} \cdot n \\ &= 0.24495 \cdot 7000 \\ &= 1714.66 \text{ [nm]} \end{aligned}$$

Con lo que obtenemos la longitud total de las cadenas en la cuerda:

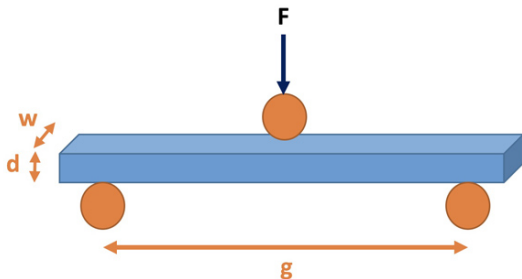
$$\begin{aligned} L_{\text{total}} &= L_{\text{cuerda}} \cdot N_{\text{cadenas}} \\ &= 1714.66 \cdot 10^{-9} \cdot 1.39 \cdot 10^{22} \\ &= 2.38 \cdot 10^{16} \text{ [m]} \\ &= 2.38 \cdot 10^{13} \text{ [km]} \end{aligned}$$

## P5

- Distancia a la luna: 384,400 [km]
- Distancia al sol:  $1.49 \cdot 10^8$  [km]
- Largo ADN humano:  $100 \cdot 10^9$  [km]
- Distancia a proxima centauri:  $4.0113 \cdot 10^{13}$  [km]

## Gráficos:

## P3:



$F$  – Load applied by the Texture Analyser

$w$  – Sample width

$d$  – Sample depth

$g$  – Distance between supports / support gap

Figure: Ensayo de flexión de tres puntos