

Bienvenid@s

WEBINAR





Dr. Faustino Mujika Garitano

[faustino.mujika@ehu.eus](mailto:faustino.mujika@ehu.eus)

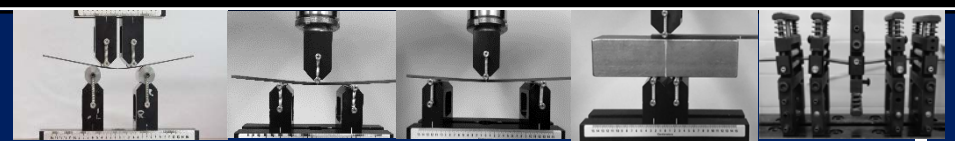
Grupo GMT / MECMAT. Universidad del País Vasco  
(UPV/EHU)

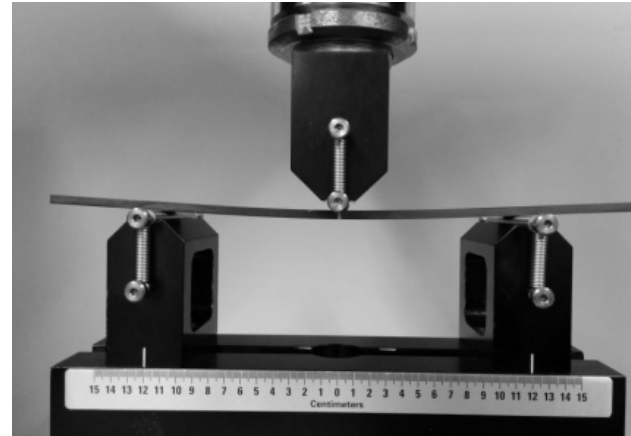
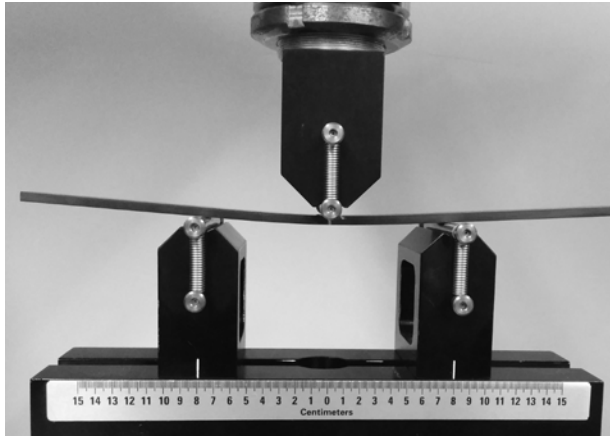
Ensayos de Flexión en Materiales Compuestos  
24 de febrero de 2022

# ENSAYOS DE FLEXIÓN EN MATERIALES COMPUESTOS



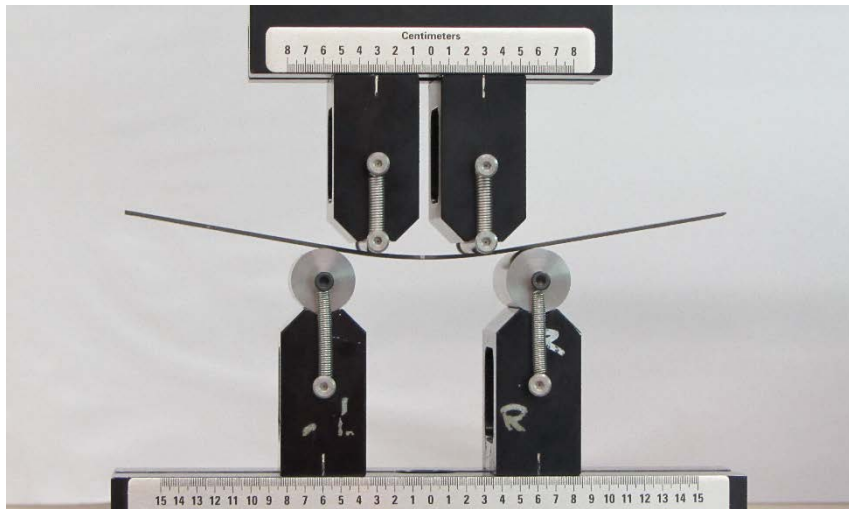
1. INTRODUCCIÓN
2. MÓDULOS DE TRACCIÓN, COMPRESIÓN Y FLEXIÓN
3. EFECTO DEL CORTANTE Y DE LA RIGIDEZ DEL SISTEMA
4. CAMBIO DEL CONTACTO ENTRE PROBETA Y RODILLOS
5. CONCLUSIONES
6. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO



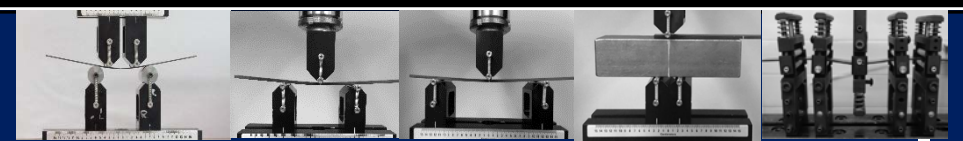


**F3P**

- o Análisis de propiedades de rigidez
- o Materiales ortótropos
- o Pequeños gradientes de desplazamientos



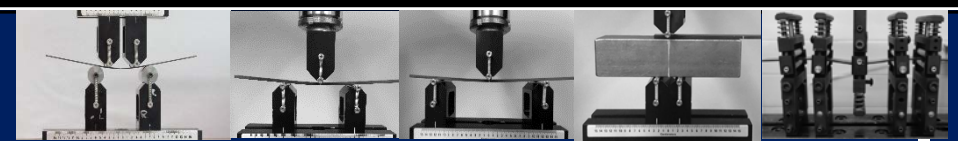
**F4P**



- o El módulo de tracción  $E_t$  y compresión  $E_c$  son diferentes en epoxi/carbono.
- o El módulo de flexión  $E_f$  es intermedio.

### Hexcel Composites, hoja de datos

| Material | $E_t$ (GPa) | $E_c$ (GPa) | $E_f$ (GPa) |
|----------|-------------|-------------|-------------|
| AS4/8552 | 141,3       | 128,2       | 126,9       |
| IM7/8552 | 164,1       | 149,6       | 151,7       |



Deformaciones unitarias

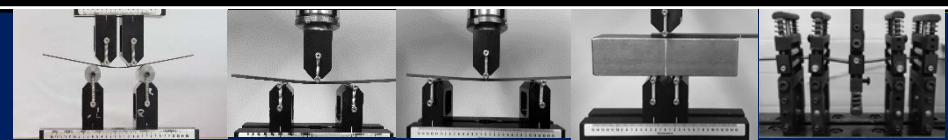
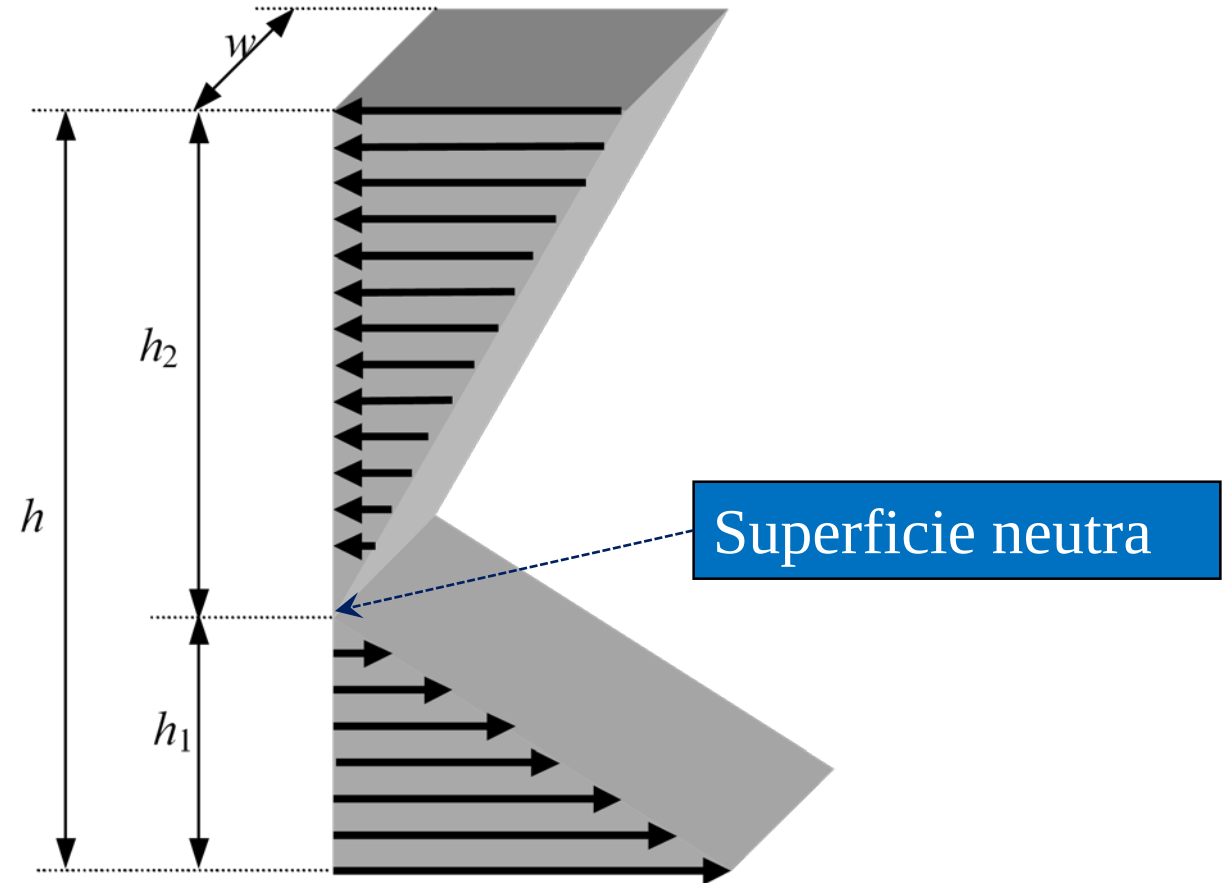
$$\varepsilon_x = \frac{y}{\rho}$$

Tensiones normales

$$\sigma_c = E_c \frac{y}{\rho} \quad -h_2 < y < 0$$

$$E_t \neq E_c$$

$$\sigma_t = E_t \frac{y}{\rho} \quad 0 < y < h_1$$



Fuerza axial nula

$$N = 0 = \int_A \sigma dA \Rightarrow$$

$$\sqrt{\lambda} = \frac{h_2}{h_1} \quad \lambda = \frac{E_t}{E_c}$$

Momento flector,  $M$

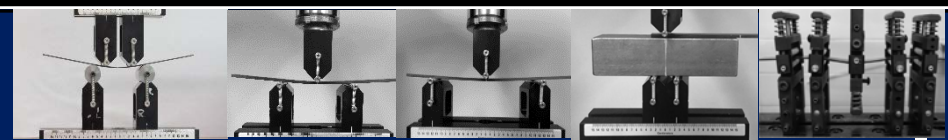
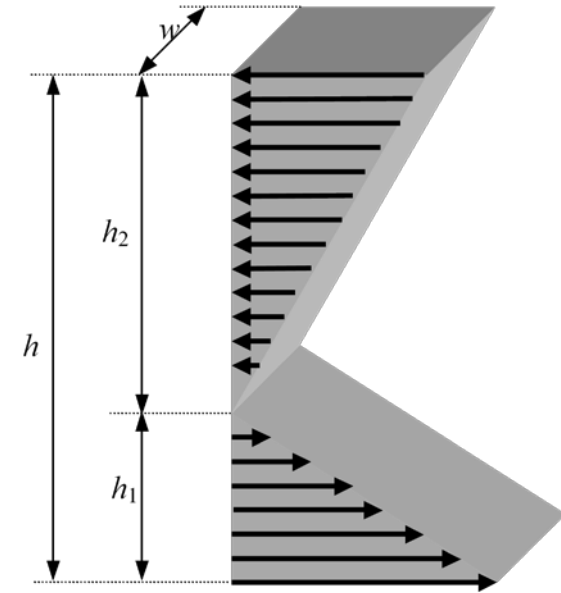
$$M = \int_A \sigma y dA \Rightarrow$$

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{M}{E_f I}$$

$$E_f = \beta E_t$$

$$\beta = \frac{4}{(1 + \sqrt{\lambda})^2}$$

$E_f$ : módulo de flexión



### Propuesta experimental

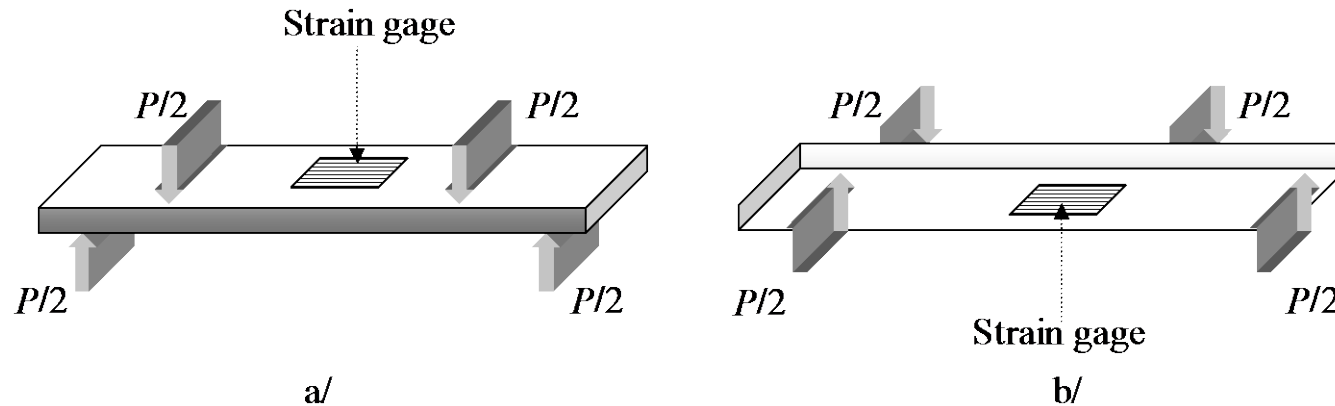
Deformaciones máximas

$$\varepsilon_t = \frac{h_1}{\rho} \quad \varepsilon_c = \frac{h_2}{\rho}$$

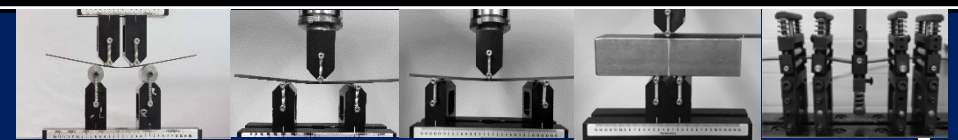
Para la misma curvatura de flexión

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_t} = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{\lambda}$$

Propuesta experimental para determinar  $\lambda$



$$\frac{m_t}{m_c} = \frac{P/\varepsilon_t}{P/\varepsilon_c} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_t} = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{\lambda}$$



### Propuesta experimental

Determinación directa

$$E_t = \frac{\sigma_{t4p}}{\varepsilon_t} = \frac{3m_t L}{8wh^2} (1 + \sqrt{\lambda})$$

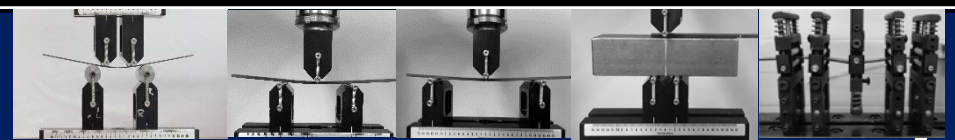
Determinar otro módulo para completar las relaciones

Ensayos de tracción

Ensayos de flexión

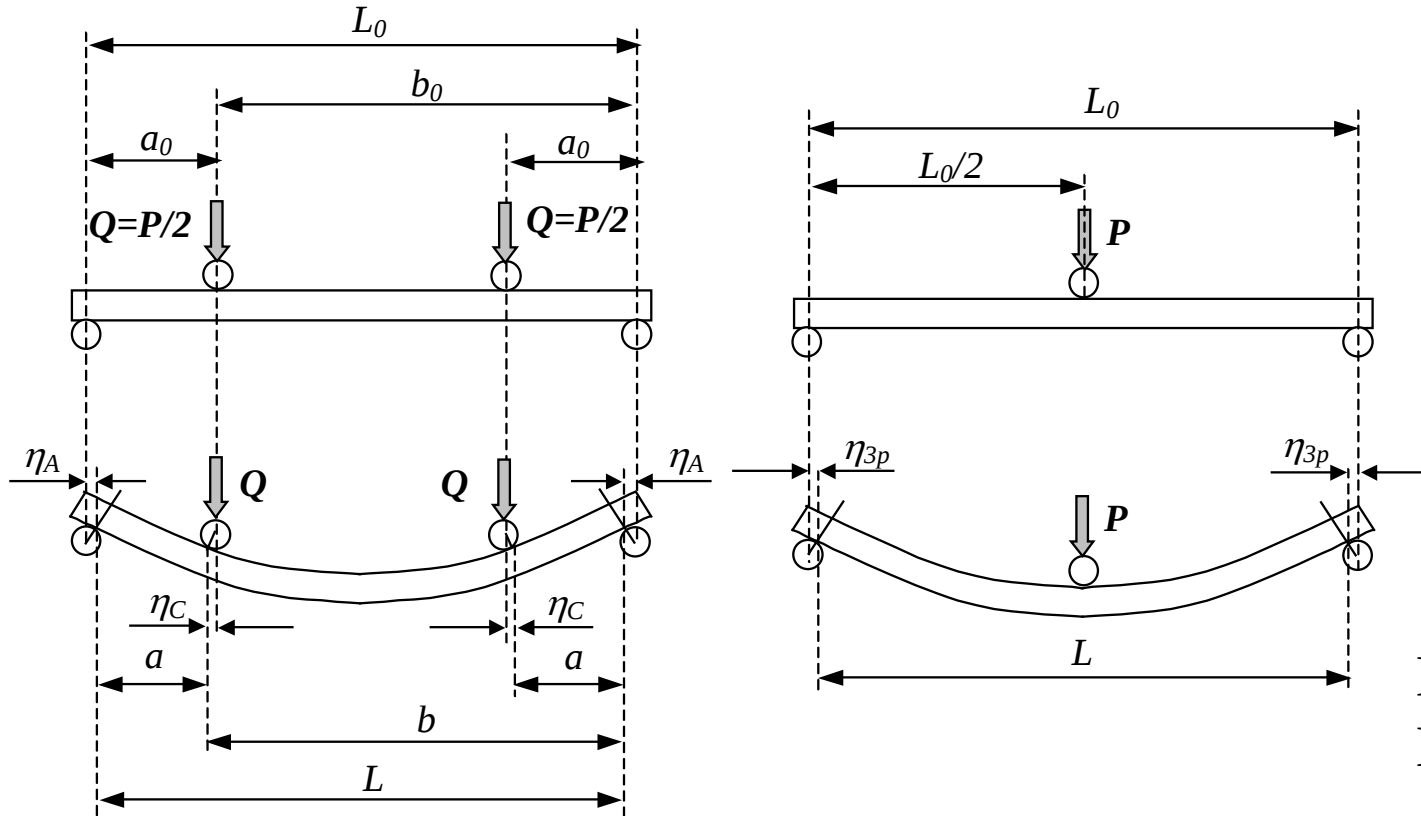
¿F3P o F4P?

Los módulos obtenidos por F3P y F4P en la misma probeta eran diferentes



### Paréntesis: módulo de flexión mediante F3P y F4P

Correcciones debidas a las *variaciones de distancia horizontal* entre apoyos y cargas



#### Correcciones

AS4/8552

F3P(GPa): de 131,1 a **129,4**

F4P(GPa): de 137,8 a **129,6**

IM7/8552

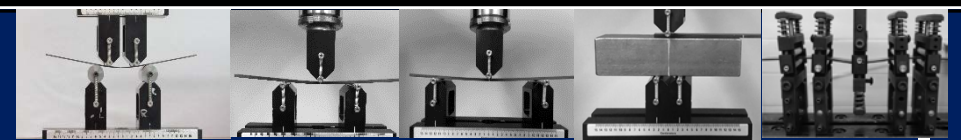
F3P(GPa): de 150,8 a **149,1**

F4P(GPa): de 158,9 a **150,4**

Diferencia inicial para ambos materiales: 5%  
Diferencia final para ambos materiales: <1%

Mujika F (2006). On the difference between flexural moduli obtained by three-point and four-point bending tests, *Polymer Testing*, 25: 214-220

<https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2005.10.006>



### Resultados experimentales

| $E_t$ (GPa) obtenido por tres procedimientos |          |         |              |
|----------------------------------------------|----------|---------|--------------|
| Material                                     | Tracción | Flexión | Directamente |
| AS4/8552                                     | 132,8    | 139,7   | 138,0        |
| IM7/8552                                     | 157,3    | 157,5   | 163,4        |

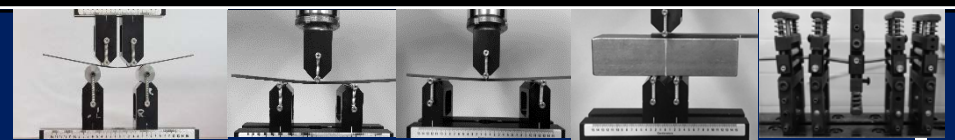
Diferencia máxima 5%

**Tracción:** módulo obtenido de ensayos de tracción con la galga situada a ambos lados

**Flexión:** ensayos F4P con galga y posteriormente determinación de  $E_f$  en F3P

**Directamente:** ensayos F4P con galga

Mujika F, Carbajal N, Arrese A, Mondragon I (2006). Determination of tensile and compressive moduli by flexural tests, *Polymer Testing*, 25:766-771. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2006.05.003>



### Datos del fabricante

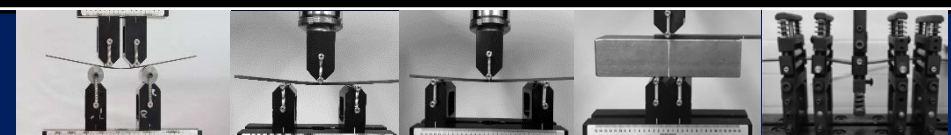
Tomando como dato  $E_t$  y  $E_c$  del fabricante, se puede determinar  $E_f$

$$\lambda = \frac{E_t}{E_c} \quad \beta = \frac{4}{(1 + \sqrt{\lambda})^2}$$

| Material | $E_t$ (GPa) | $E_c$ (GPa) | $\lambda$ | $\beta$ | $E_f$ (GPa) |
|----------|-------------|-------------|-----------|---------|-------------|
| AS4/8552 | 141,3       | 128,2       | 1,102     | 0,952   | 134,6       |
| IM7/8552 | 164,1       | 149,6       | 1,097     | 0,954   | 156,6       |

Los módulos de flexión experimentales son menores que los calculados

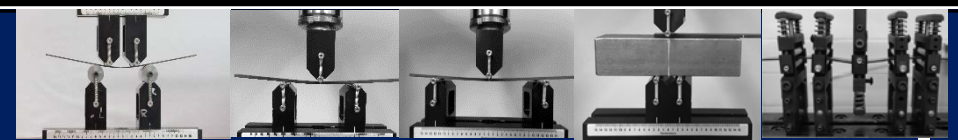
| Módulo de flexión | Fabricante | Calculado |
|-------------------|------------|-----------|
| AS4/8552          | 126,9      | 134,6     |
| IM7/8552          | 151,7      | 156,6     |



### Propiedades con la fibra a 90°

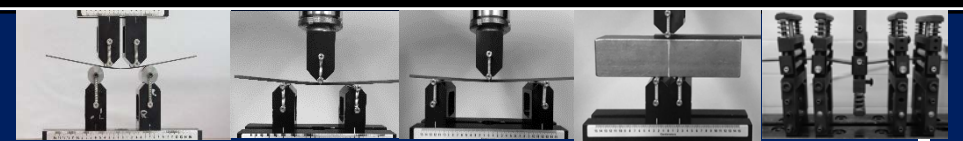
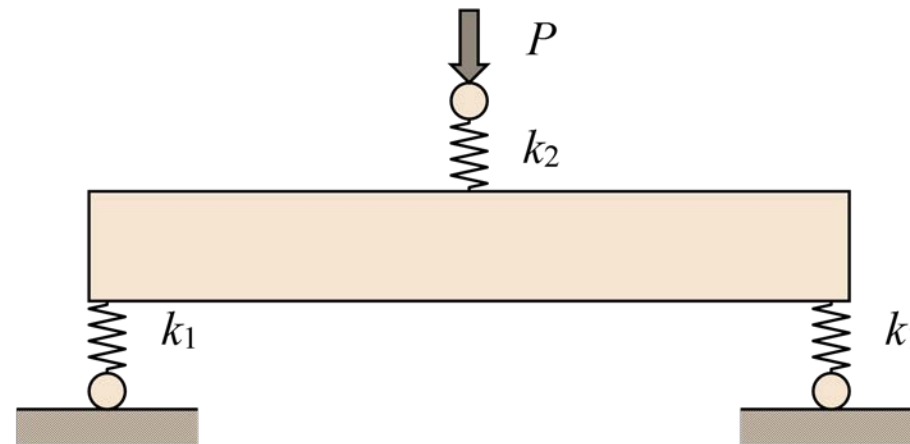
Utilización de ensayos de flexión para  $E_f$

| Material (90°) | $E_t$ (GPa) | $E_c$ (GPa) | $E_f$ (GPa) |
|----------------|-------------|-------------|-------------|
| AS4/8552       | 11,0        | 9,6         | 10,6        |
| IM7/8552       | 9,3         | 9,5         | 9,4         |



### 3. Efecto del cortante y de la rigidez del sistema

- o En materiales isótropos  $E/G < 3$
- o La relación módulo de flexión/módulo de cortadura  $E_f/G_{13}$  es elevada en materiales ortótropos.
- o Si el desplazamiento se mide con la máquina, interviene la rigidez del sistema.
- o Es necesario conocer el valor de  $E_f/G$  para cuantificar el efecto del cortante y en su caso, despreciarlo.



#### Ensayos a distintas luces: Regresión cúbica

El desplazamiento del punto medio teniendo en cuenta la rigidez del sistema  $K_s$ :

$$\delta_s = \frac{PL^3}{4E_f wh^3} \left[ 1 + \frac{6}{5} \frac{E_f}{G} \left( \frac{h}{L} \right)^2 + 4 \frac{E_f w}{K_s} \left( \frac{h}{L} \right)^3 \right]$$

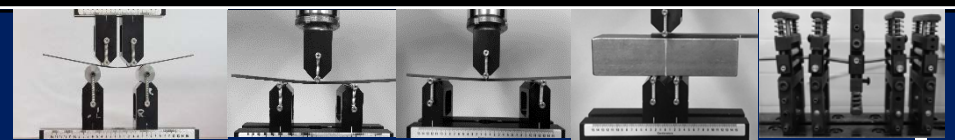
Determinando la pendiente de cuerda entre dos puntos del ensayo:

$$\left[ (E_{3p})_s \right]^{-1} = E_f^{-1} \left[ 1 + \frac{6}{5} \frac{E_f}{G} \left( \frac{h}{L} \right)^2 + 4 \frac{E_f w}{K_s} \left( \frac{h}{L} \right)^3 \right] \text{ siendo } (E_{3p})_s = \frac{m_s L_0^3}{4wh^3}$$

Se trata de una ecuación cúbica:

$$y = A + Bx^2 + Cx^3$$

$$y = \left[ (E_{3p})_s \right]^{-1} \quad x = \frac{h}{L}$$
$$E_f = A^{-1} \quad G = \frac{6}{5} B^{-1} \quad K_s = 4wC^{-1}$$



#### Ensayos a distintas luces: Regresión lineal

Si  $K_s$  es conocido o el desplazamiento se mide con un deflectómetro externo, el desplazamiento es:

$$\delta = \frac{PL^3}{4E_f wh^3} \left[ 1 + \frac{6}{5} \frac{E_f}{G} \left( \frac{h}{L} \right)^2 \right]$$

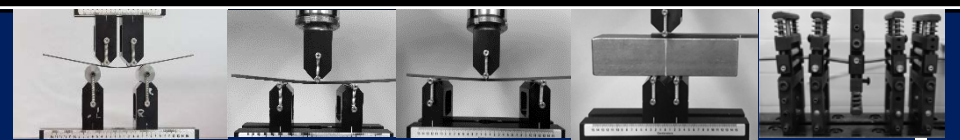
Determinando la pendiente de cuerda entre dos puntos del ensayo:

$$E_{3p}^{-1} = E_f^{-1} \left[ 1 + \frac{6}{5} \frac{E_f}{G} \left( \frac{h}{L} \right)^2 \right] \text{ siendo } E_{3p} = \frac{mL_0^3}{4wh^3}$$

Se trata de una ecuación lineal:

$$z = M + Nt$$

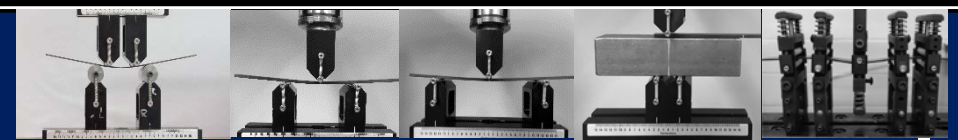
$$z = E_{3p}^{-1} \quad t = \left( \frac{h}{L} \right)^2$$
$$E_f = M^{-1} \quad G = \frac{6}{5} N^{-1}$$



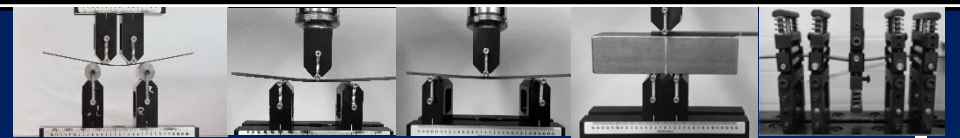
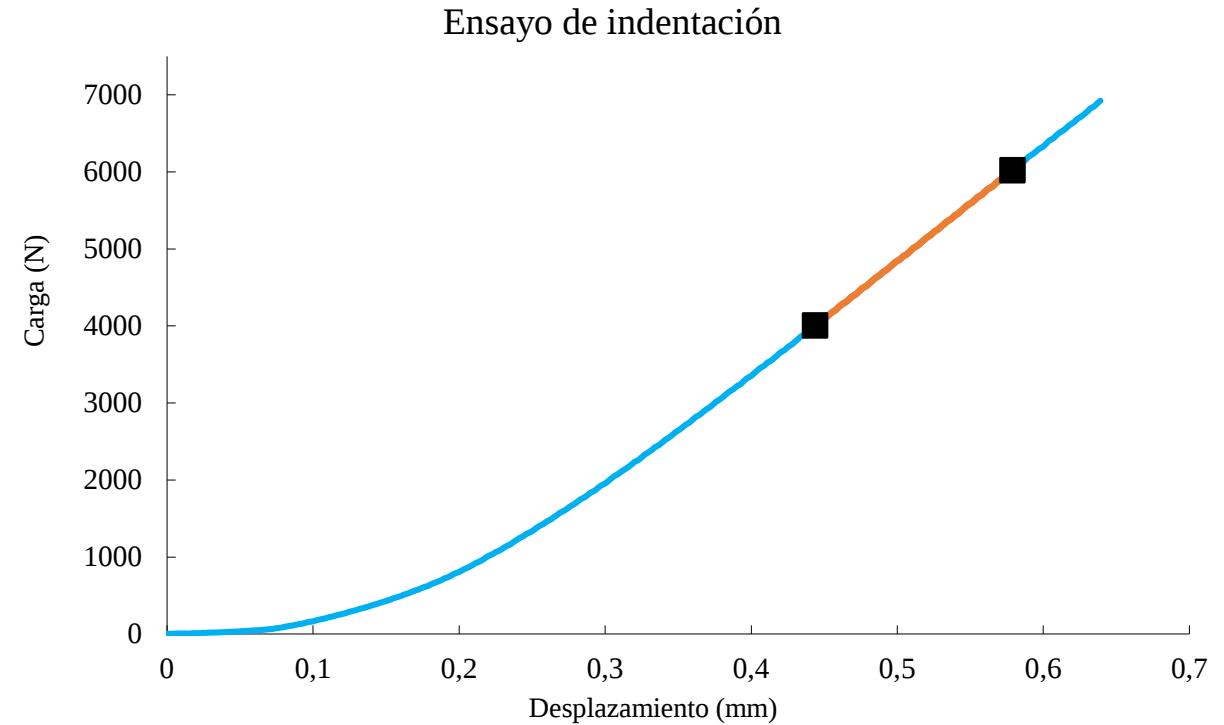
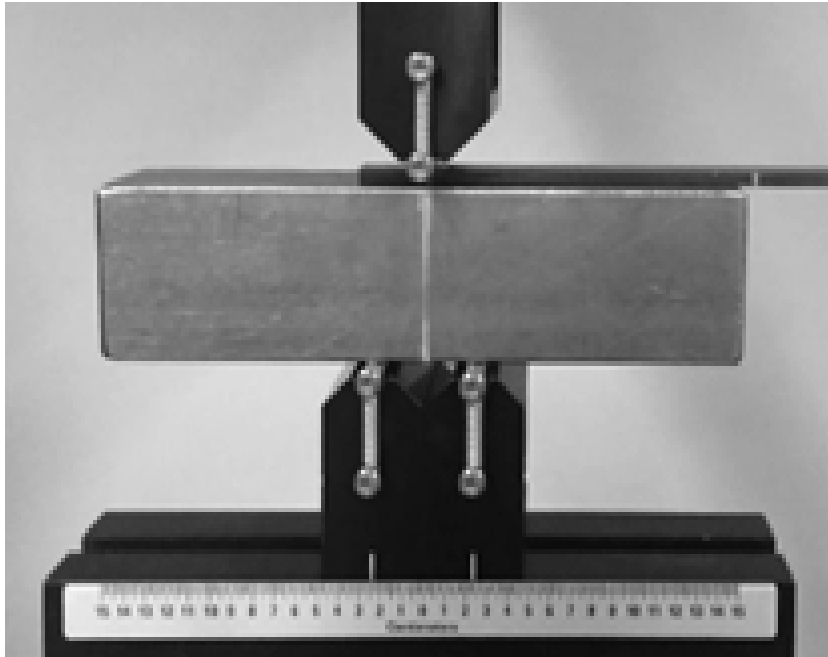
#### Materiales y ensayos

- o Material carbono/epoxi T6T-F593.
- o 2 probetas de 24 y 36 láminas.
- o Distancias entre apoyos (mm): 120, 80, 60, 48, 40.

|                              | $w(\text{mm})$ | $h(\text{mm})$ |
|------------------------------|----------------|----------------|
| Probeta S1[0 <sub>24</sub> ] | 11,3           | 4,68           |
| Probeta S2[0 <sub>36</sub> ] | 11,2           | 6,29           |



## Ensayo de indentación



### 3. Efecto del cortante y de la rigidez del sistema

#### Resultados de regresión cúbica

|                 | S1    | S2    |
|-----------------|-------|-------|
| $E_f$ (GPa)     | 108,3 | 107,8 |
| $G$ (MPa)       | 4083  | 3979  |
| $K_s$ (kN/mm)   | 14,8  | 14,4  |
| $K_{in}$ (N/mm) | 15,5  | 15,0  |

Valores de referencia:

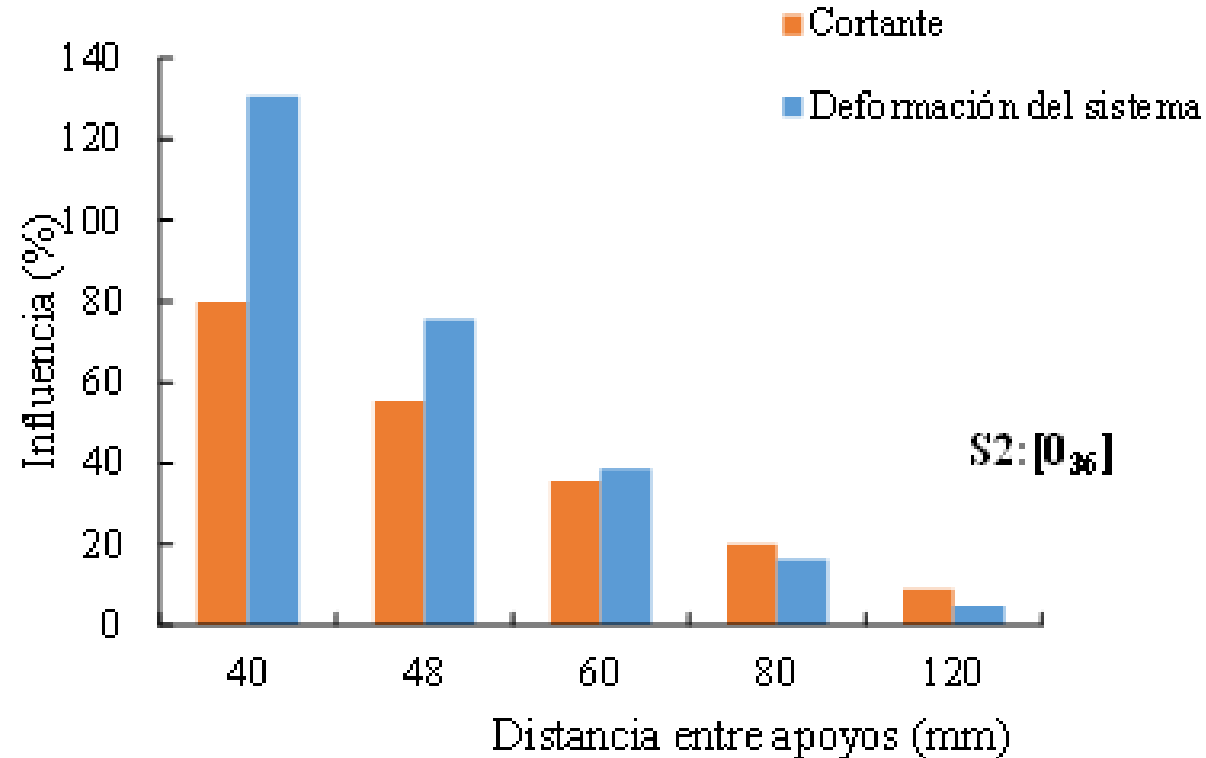
$E_f$  (GPa) = 100,0 (ensayos)

$G$  (MPa) = 4000 (fabricante)

- o Se obtienen resultados similares para ambas probetas.
- o La rigidez obtenida por regresión y la obtenida por indentación son similares.
- o Se puede utilizar regresión lineal considerando  $K_{in} = K_s$ .
- o El desplazamiento de la probeta en cada punto de ensayo es:  $\delta = \delta_{prob} = \delta_s - K_s^{-1}P$

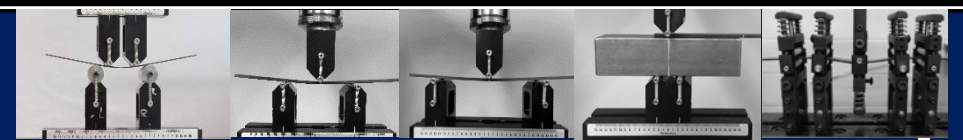
$$\frac{6}{5} \frac{E_f}{G} \left( \frac{h}{L} \right)^2 < 2\% \Rightarrow \frac{L}{h} = 39$$

Influencia de los términos en la probeta S2, de 6,29 mm de espesor, respecto a la flexión (100%)



Mujika F (2007). On the effect of shear and local deformation in three-point bending tests, Polymer Testing, 26: 869-877.

<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2007.06.002>



### Ensayo de flexión en 5 puntos, doble sentido

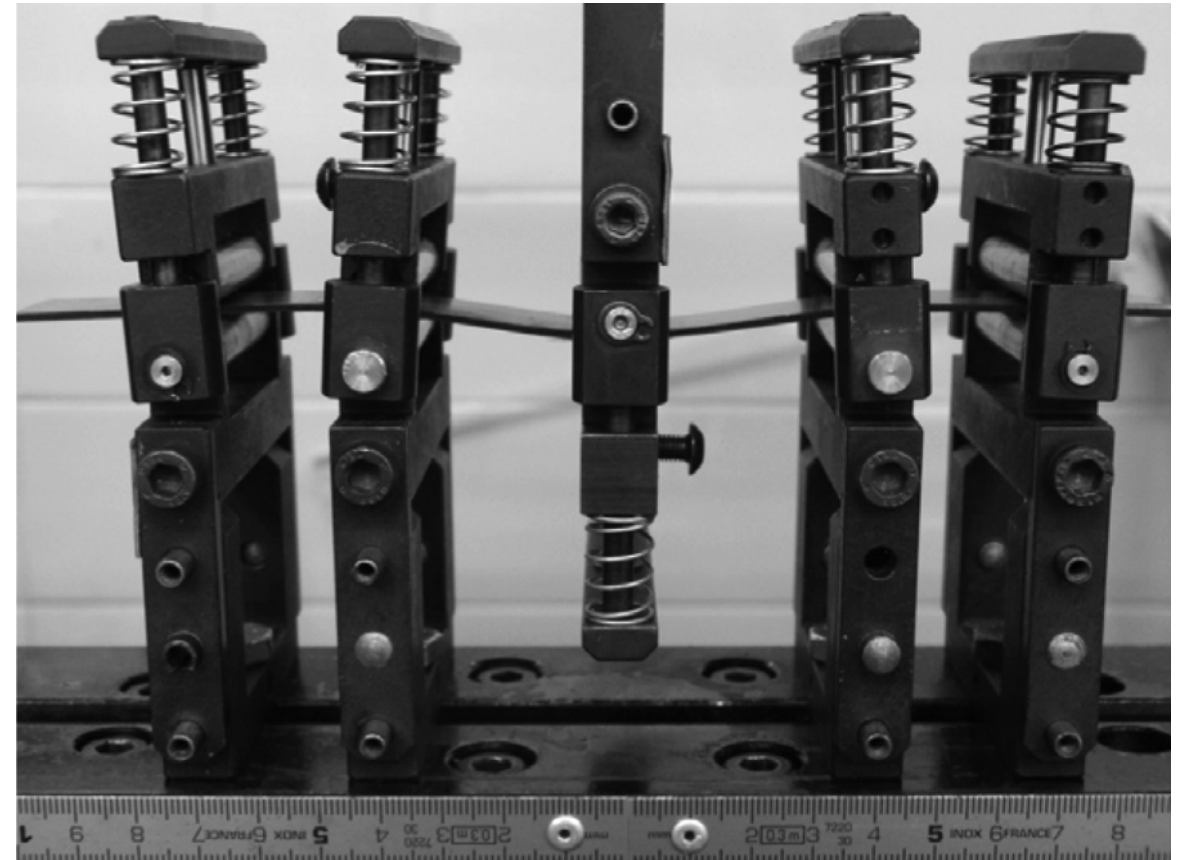
Colaboración con Ikerlan

Amarres de doble sentido, giro permitido

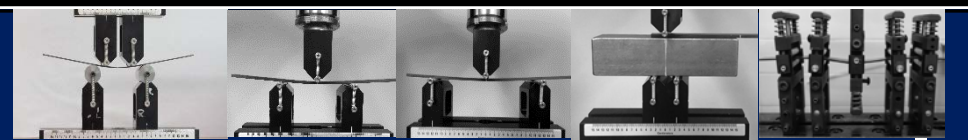
Configuración parcialmente biempotrada

Idónea para fatiga

- Tracción y compresión en el mismo punto
- Elevada tensión para desplazamiento dado

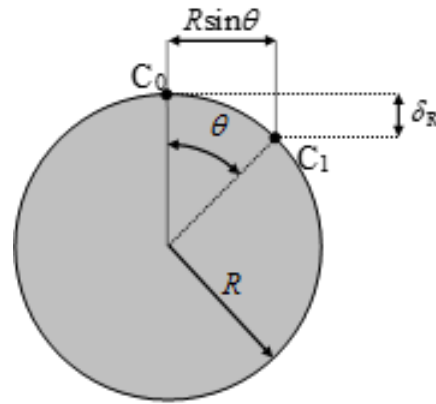
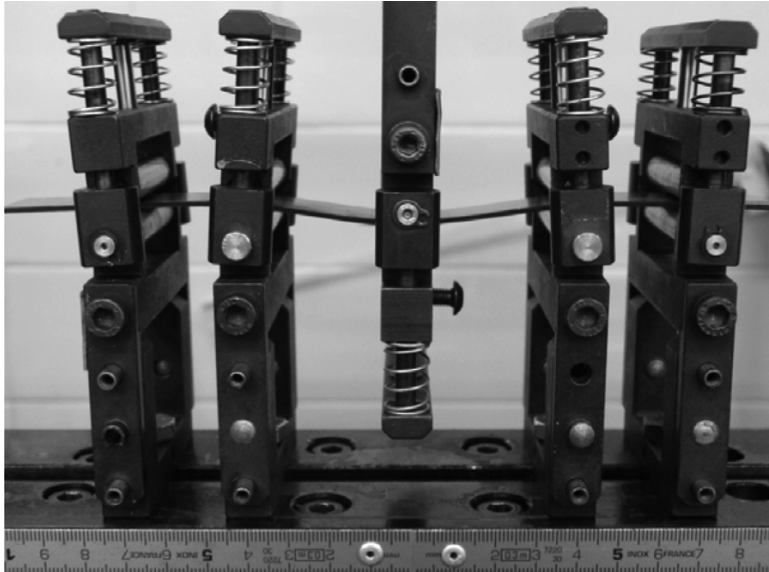


Mujika F, Asensio M et al. (2015). Analysis of a reversible five-point bending configuration based on a two-sense support, *Polymer Testing*, 43: 108-122. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.03.004>



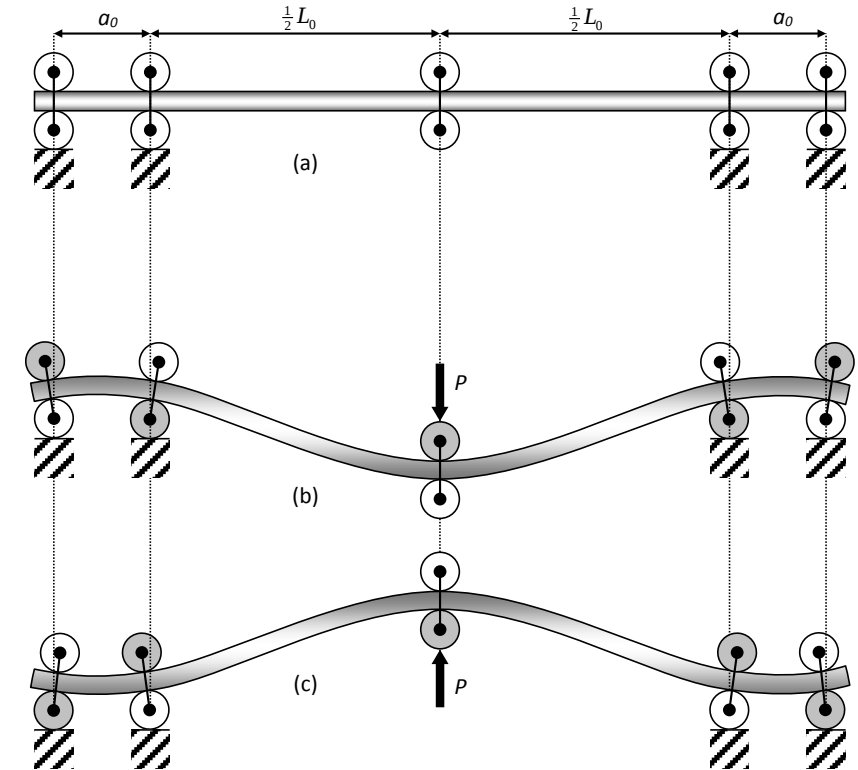
# 4. Cambio del contacto entre probeta y rodillos

## Ensayo de flexión en 5 puntos, doble sentido

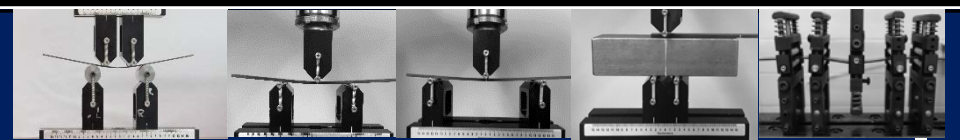


$$\delta_C^h = R \sin \theta = R\theta$$

$$\delta_C^v = R(1 - \cos \theta) = \frac{1}{2} R\theta^2$$

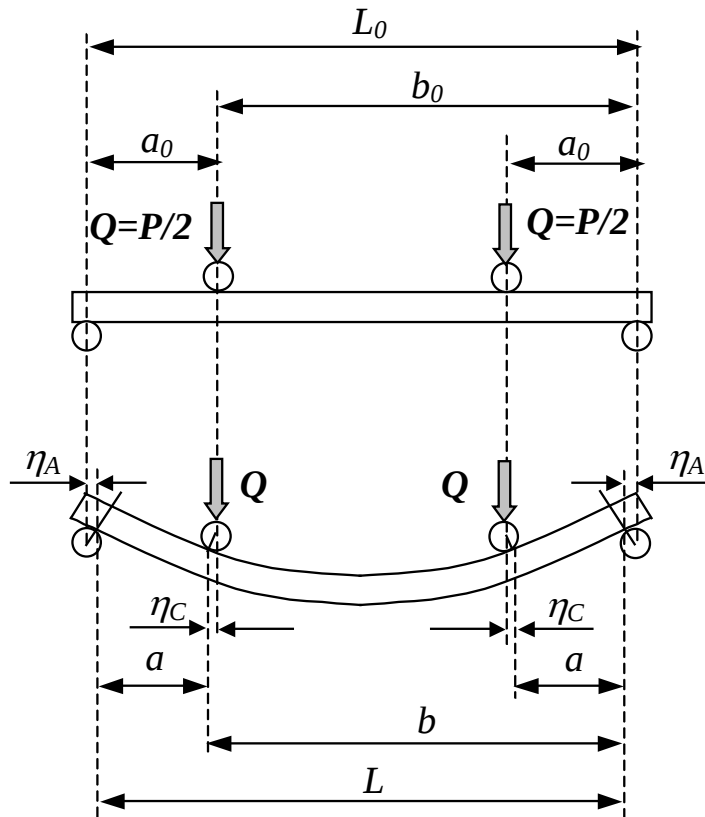


El desplazamiento vertical del punto de contacto tiene influencia

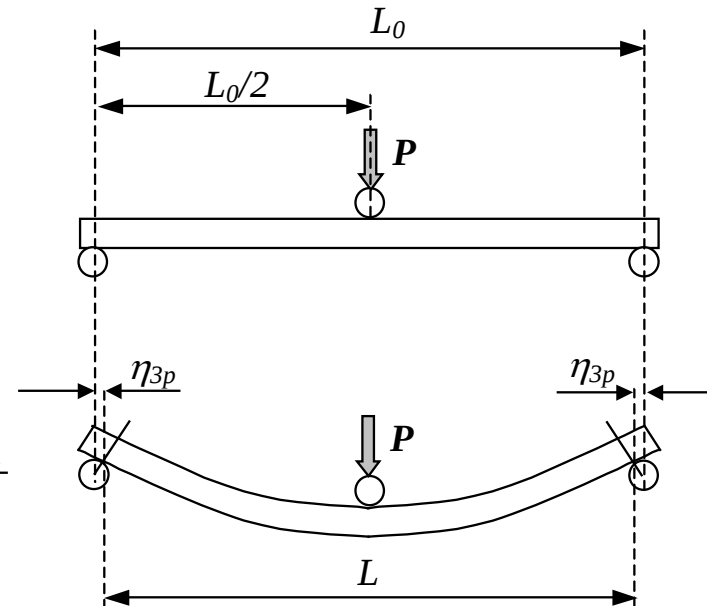


# 4. Cambio del contacto entre probeta y rodillos

Correcciones debidas a las *variaciones de distancia horizontal* entre apoyos y cargas



$$E_f = E_{4p} \left[ 1 - \frac{9DR_A}{4h} (\varepsilon_1^{4p} + \varepsilon_2^{4p}) \right]$$



D-11

$$E_f = E_{3p} \left[ 1 - \frac{3R_A}{h} (\varepsilon_1^{3p} + \varepsilon_2^{3p}) \right]$$

## Correcciones

AS4/8552

F3P(GPa): de 131,1 a **129,4**

F4P(GPa): de 137,8 a **129,6**

$$\left( \frac{L}{h} \right) = 55$$

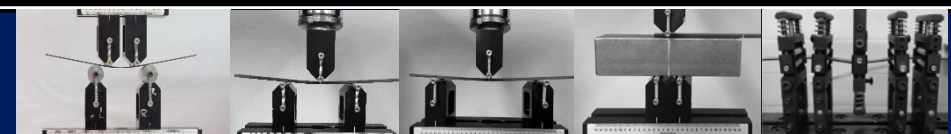
IM7/8552

F3P(GPa): de 150,8 a **149,1**

F4P(GPa): de 158,9 a **150,4**

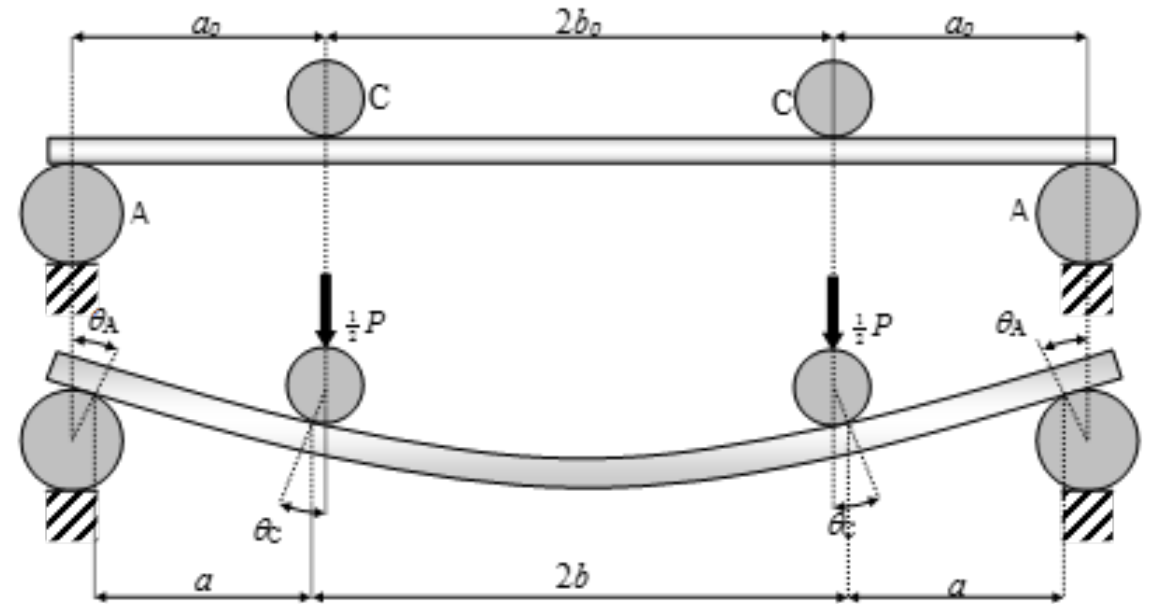
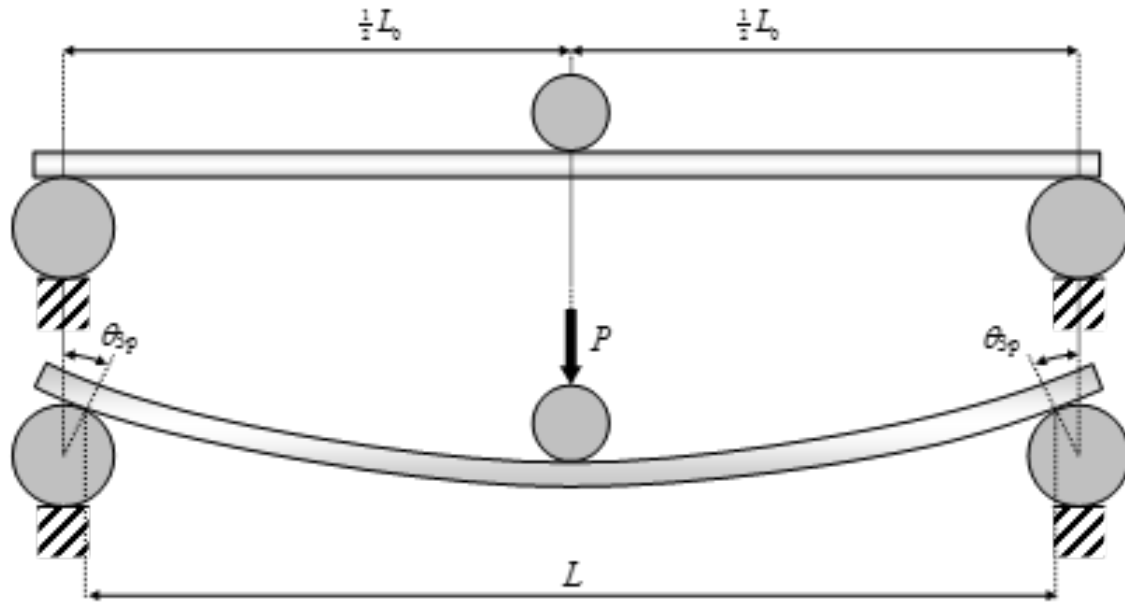
$$\left( \frac{L}{h} \right) = 42$$

Deformaciones: 0,1%-0,3%

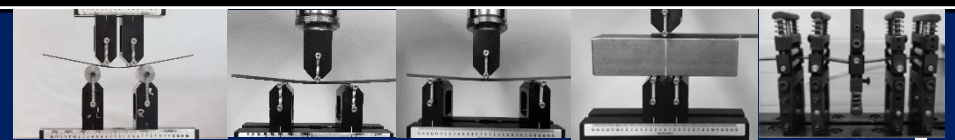


## 4. Cambio del contacto entre probeta y rodillos

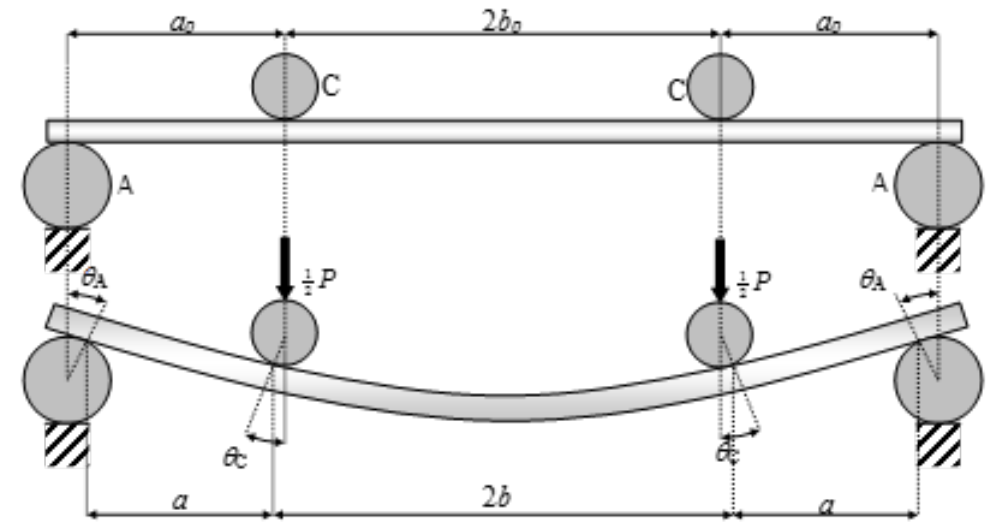
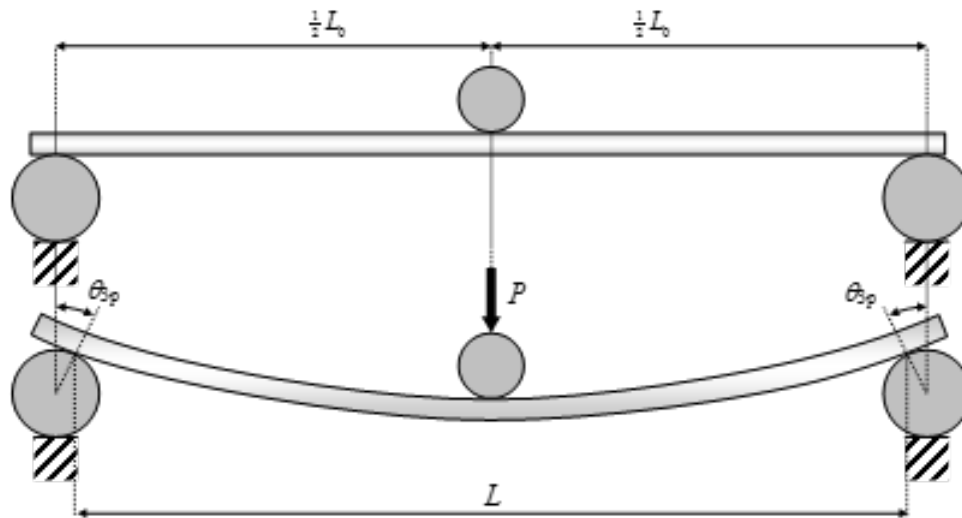
Se introdujo el desplazamiento vertical en la corrección anterior



Pero con distintos radios de rodillos y rangos de deformación, los módulos eran diferentes en F3P y F4P.



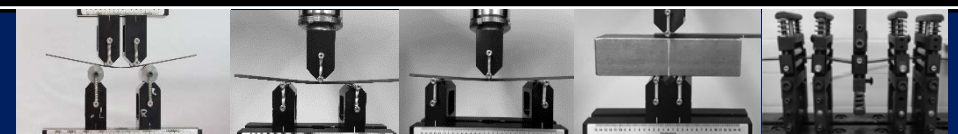
## 4. Cambio del contacto entre probeta y rodillos



Nuevos factores a considerar:

- Longitudes reales, no iniciales
- Reacciones horizontales

Mujika F, Arrese A, Adarraga I, Osés U (2016). New correction terms concerning three-point and four-point bending tests, *Polymer Testing*, 55: 25-37. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.07.025>



## 4. Cambio del contacto entre probeta y rodillos

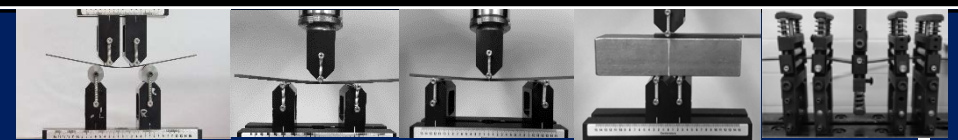
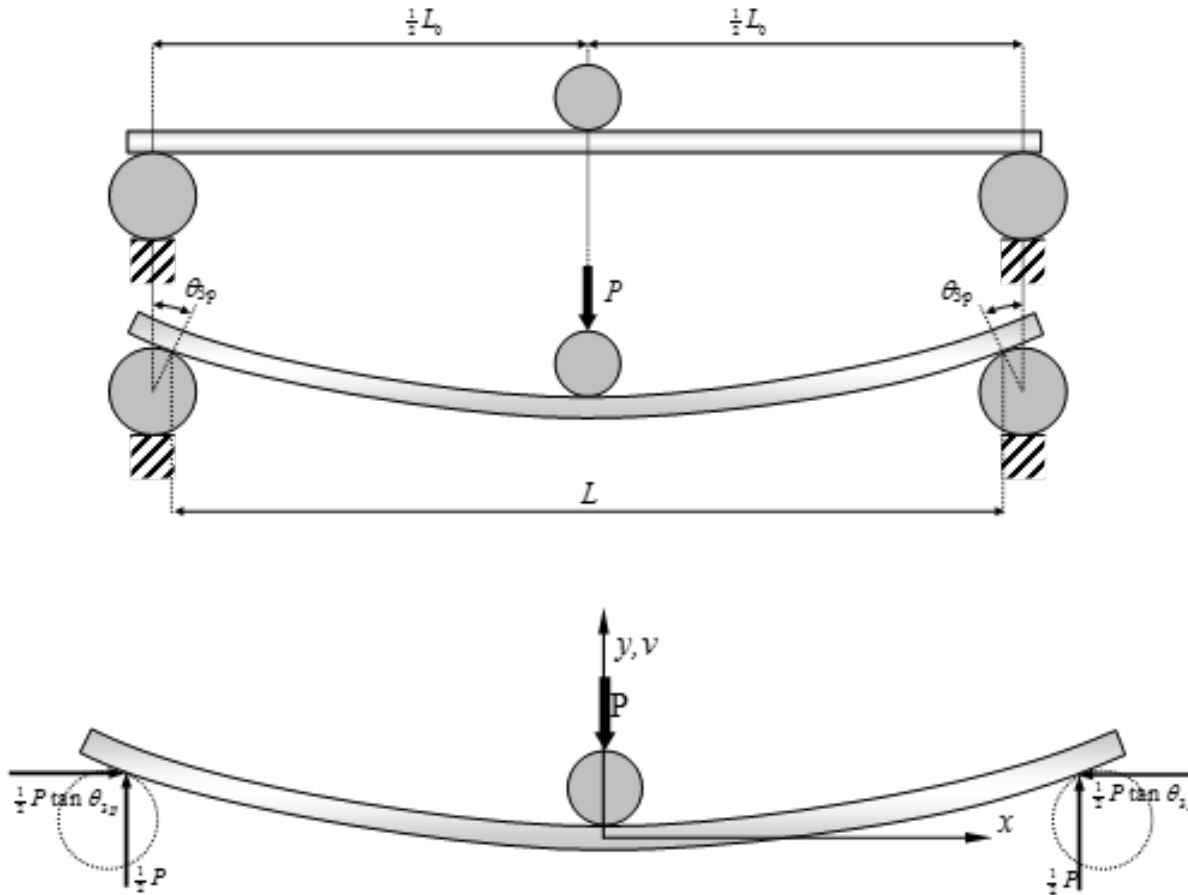
### F3P

Deformación exacta en F3P:

$$\varepsilon_{3p} = \frac{1}{2f} \left( \sqrt{1 + 4f\varepsilon_{3p0}} - 1 \right) \quad f = \frac{R}{h}$$

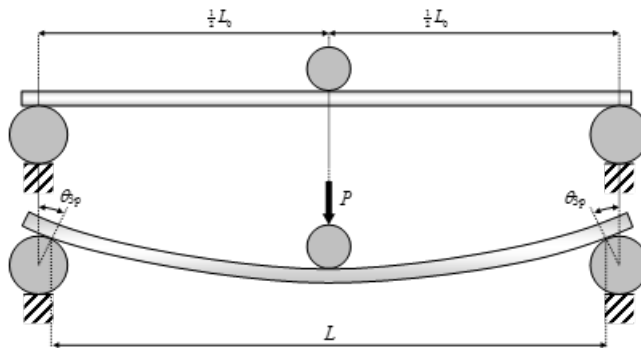
$\delta_a$  debido a las las reacciones horizontales:

$$\delta_a = \frac{PL^3}{4E_f wh^3} \left[ -\frac{3}{4}\varepsilon_{3p} + \frac{1}{5} \left( \frac{L}{h} \right)^2 \varepsilon_{3p}^2 \right]$$



# 4. Cambio del contacto entre probeta y rodillos

**F3P**



Desplazamiento en el nivel de carga  $i$

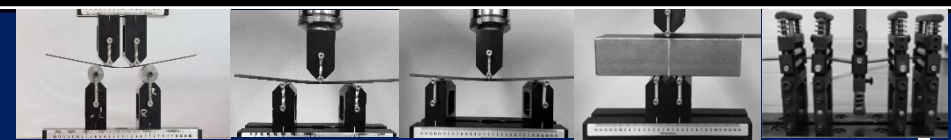
Aproximación exacta

$$\delta_{Ti} = \frac{P_i L_0^3}{4E_f w h^3} \left\{ \lambda_i^3 \left( 1 + \frac{3}{4} f \varepsilon_{3pi} \right) + \frac{6}{5} \frac{E_f}{G} \left( \frac{h}{L_0} \right)^2 \lambda_i + \lambda_i^3 \left[ \frac{1}{5} \left( \frac{L_0}{h} \right)^2 \lambda_i^2 \varepsilon_{3pi}^2 - \frac{3}{4} \varepsilon_{3pi} \right] \right\} = \frac{P_i L_0^3}{4E_f w h^3} \{ A_i \} \quad \lambda_i = \frac{L_i}{L_0}$$

Depende de carga  $P_i$ , pero también de la distancia real  $L_i$

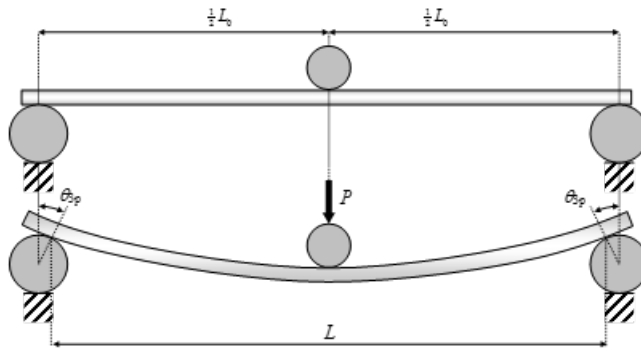
Módulo de flexión

$$E_f = \frac{m L_0^3}{4 w h^3} \frac{(P_2 A_2 - P_1 A_1)}{P_2 - P_1}$$



## 4. Cambio del contacto entre probeta y rodillos

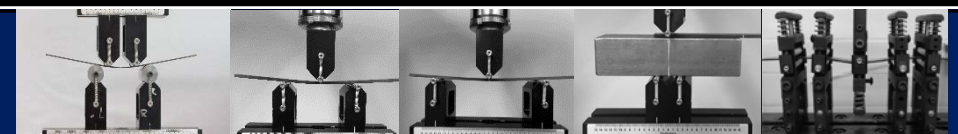
F3P



Módulo de flexión

Aproximación de primer orden

$$E_f = \frac{mL_0^3}{4wh^3} \left[ 1 - \left( \frac{9}{4}f + \frac{3}{4} \right) (\varepsilon_{1f} + \varepsilon_{2f}) + \frac{1}{5} \left( \frac{L_0}{h} \right)^2 (\varepsilon_{1f}^2 + \varepsilon_{1f}\varepsilon_{2f} + \varepsilon_{2f}^2) + \frac{6}{5} \frac{E_f}{G} \left( \frac{h}{L_0} \right)^2 \left[ 1 - f(\varepsilon_{1f} + \varepsilon_{2f}) \right] \right]$$



**F4P**

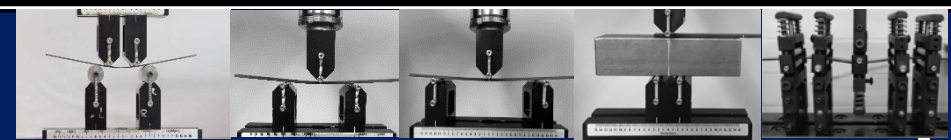
Deformación exacta en F4P: proceso iterativo

$$\varepsilon_{4p} = \varepsilon_{4p0} \frac{[1 - 2f(1 + 2r)\varepsilon_{4p}]}{(1 + f\varepsilon_{4p})(1 - \beta\varepsilon_{4p})}$$

$$f = \frac{R_A}{h} \quad r = \frac{R_C}{R_A} \quad g = \frac{b_0}{a_0} \quad \beta = 2rf$$

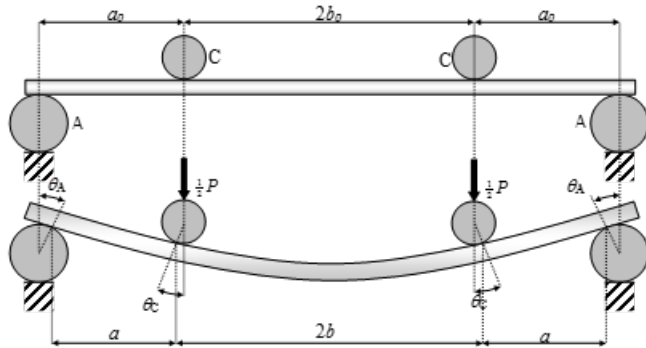
$\delta_{aC}$  debido a las las reacciones horizontales

$$\delta_{aC} = \frac{12}{E_f w h^3} \left[ \frac{1}{2} M_Q (L_1^2 - b^2) - \frac{N_Q a}{4 E_f w h^3} \left[ (L_1^4 - b^4) - \frac{1}{5} a^4 \right] - \frac{1}{2} P \theta_C b \left( \frac{2}{3} v_C + \frac{1}{2} h \right) \right]$$



# 4. Cambio del contacto entre probeta y rodillos

**F4P**



Desplazamiento en el nivel de carga  $i$

Aproximación exacta

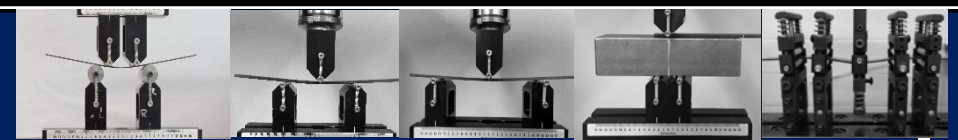
$$E_f \delta_{Ci} = \frac{2P_i a_i^2}{wh^3} (a_i + 3b_i) + \frac{3P_i a_i}{5wh} \frac{E_f}{G} + \frac{1}{2} E_f (R_A \theta_{Ai}^2 + R_C \theta_{Ci}^2)$$

$$E_f \delta_{aCi} = \frac{12}{wh^3} \left[ \frac{1}{2} M_{Qi} (L_{1i}^2 - b_i^2) - \frac{N_{Qi} a_i}{4E_f wh^3} \left[ (L_{1i}^4 - b_i^4) - \frac{1}{5} a_i^4 \right] - \frac{1}{2} P_i \theta_{Ci} b_i \left( \frac{2}{3} v_{Ci} + \frac{1}{2} h \right) \right]$$

$$E_f \delta_{CTi} = E_f (\delta_{Ci} + \delta_{aCi}) = B_i$$

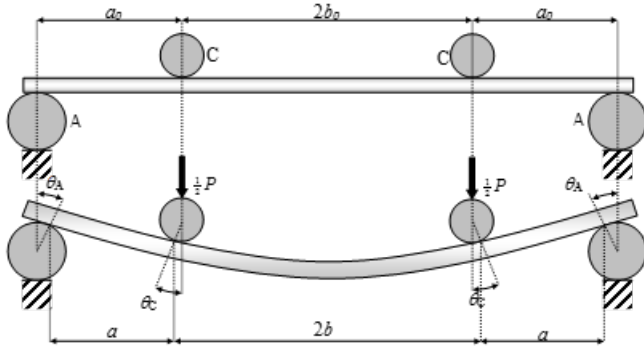
Módulo de flexión

$$E_f = m \frac{B_2 - B_1}{P_2 - P_1}$$



## 4. Cambio del contacto entre probeta y rodillos

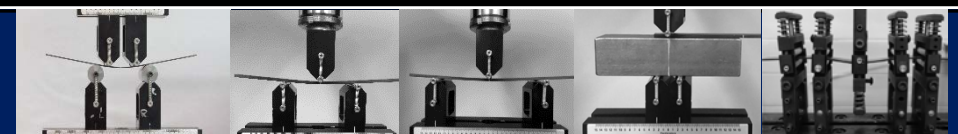
F4P



Módulo de flexión

Aproximación de primer orden

$$E_f = \frac{mL_0^3}{8wh^3} \left[ 1 - \left( \varphi_1 + \frac{39}{16} \right) (\varepsilon_{1f} + \varepsilon_{2f}) + \frac{43}{80} \left( \frac{L_0}{h} \right)^2 (\varepsilon_{1f}^2 + \varepsilon_{1f}\varepsilon_{2f} + \varepsilon_{2f}^2) + \frac{6}{5} \frac{E_f}{G} \left( \frac{h}{L_0} \right)^2 \left[ 1 - \alpha (\varepsilon_{1f} + \varepsilon_{2f}) \right] \right]$$



## 4. Cambio del contacto entre probeta y rodillos

### Experimental

1 probeta carbono/epoxi T6T/F593, Hexcel Composites

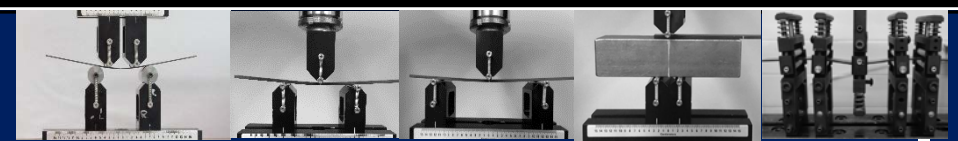
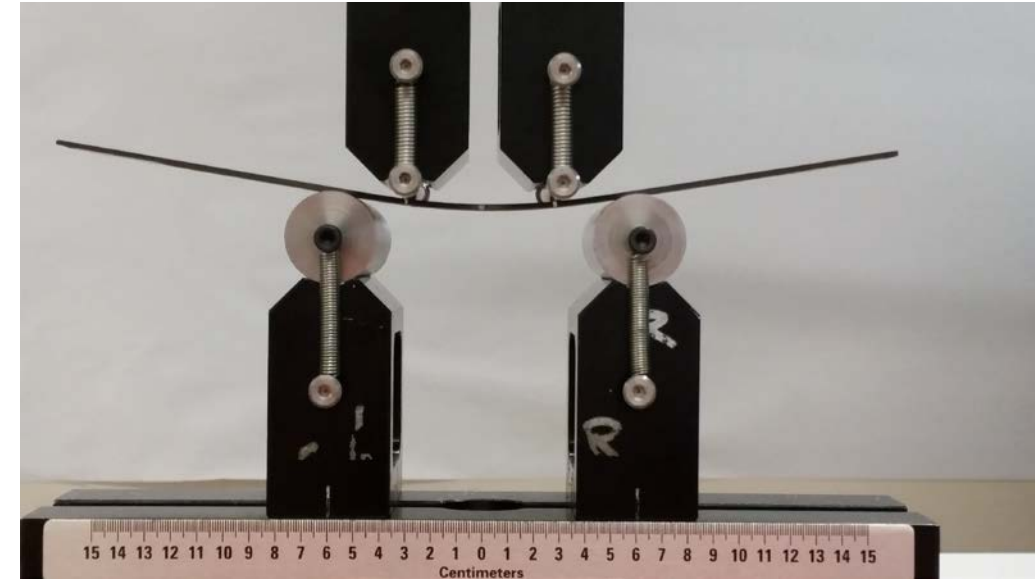
$w = 14,8 \text{ mm}$ ,  $h = 1,14 \text{ mm}$ ,  $L_0 = 60 \text{ mm}$

$K_s = 1200 \text{ N/mm}$

$$\frac{L_0}{h} = 53$$

Radios de los rodillos

| F3P | R(mm)            | 2,5 | 4 | 6 | 9 |     |     |
|-----|------------------|-----|---|---|---|-----|-----|
| F4P | $R_A(\text{mm})$ | 2,5 | 4 | 6 | 9 | 9   | 2,5 |
|     | $R_C(\text{mm})$ | 2,5 | 4 | 6 | 9 | 2,5 | 9   |



## 4. Cambio del contacto entre probeta y rodillos

### Experimental

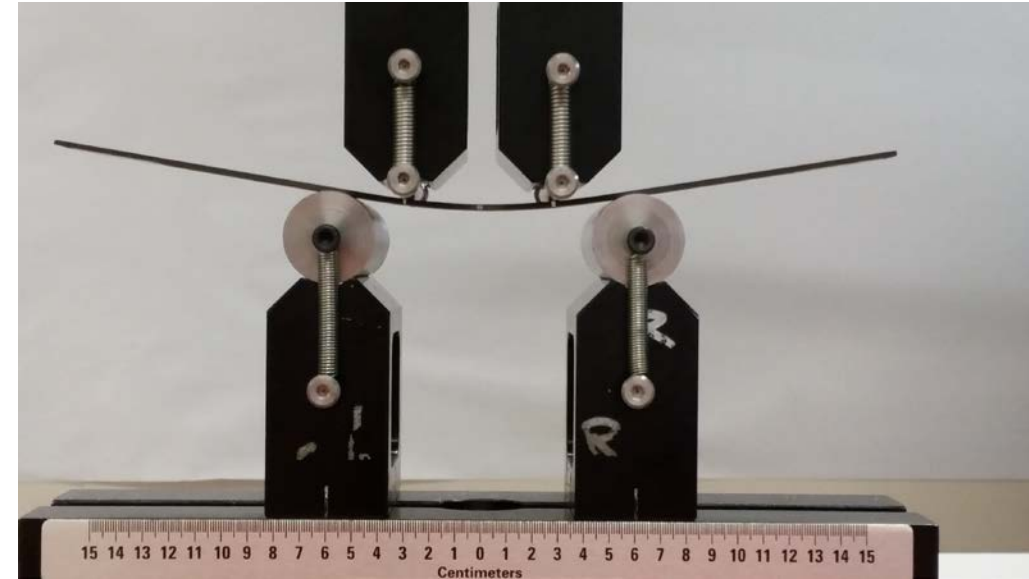
3 intervalos de deformación:

☐ 0,1% - 0,3%

☐ 0,2% - 0,4%

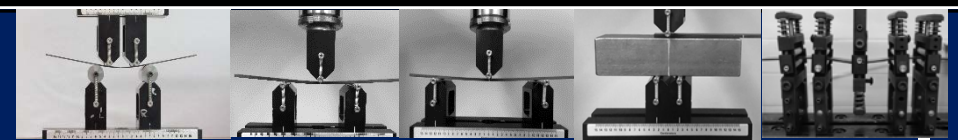
☐ 0,3%-0,5%

$$\frac{L_0}{h} = 53$$



Rango de deformación: 0,3%-0,5%

| Influencia | Cortante | Fuerzas horizontales |
|------------|----------|----------------------|
| F3P        | 1,0%     | 2,1%                 |
| F4P        | 0,7%     | 5,3%                 |

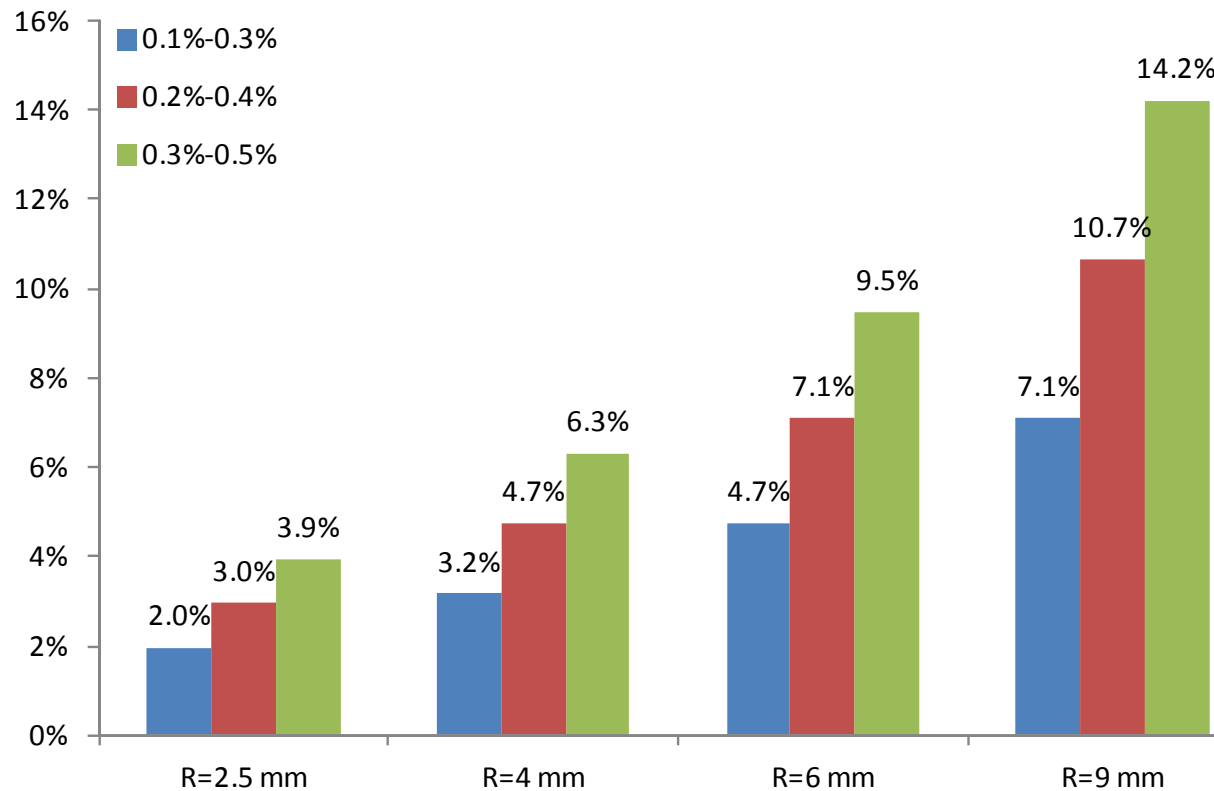


# 4. Cambio del contacto entre probeta y rodillos

Disminución porcentual respecto al módulo clásico, debido al desplazamiento del punto de contacto

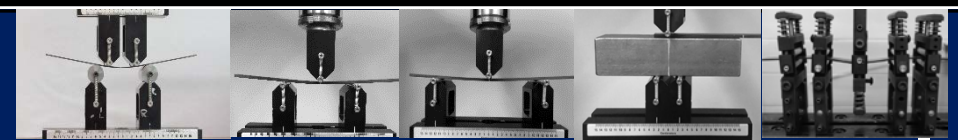
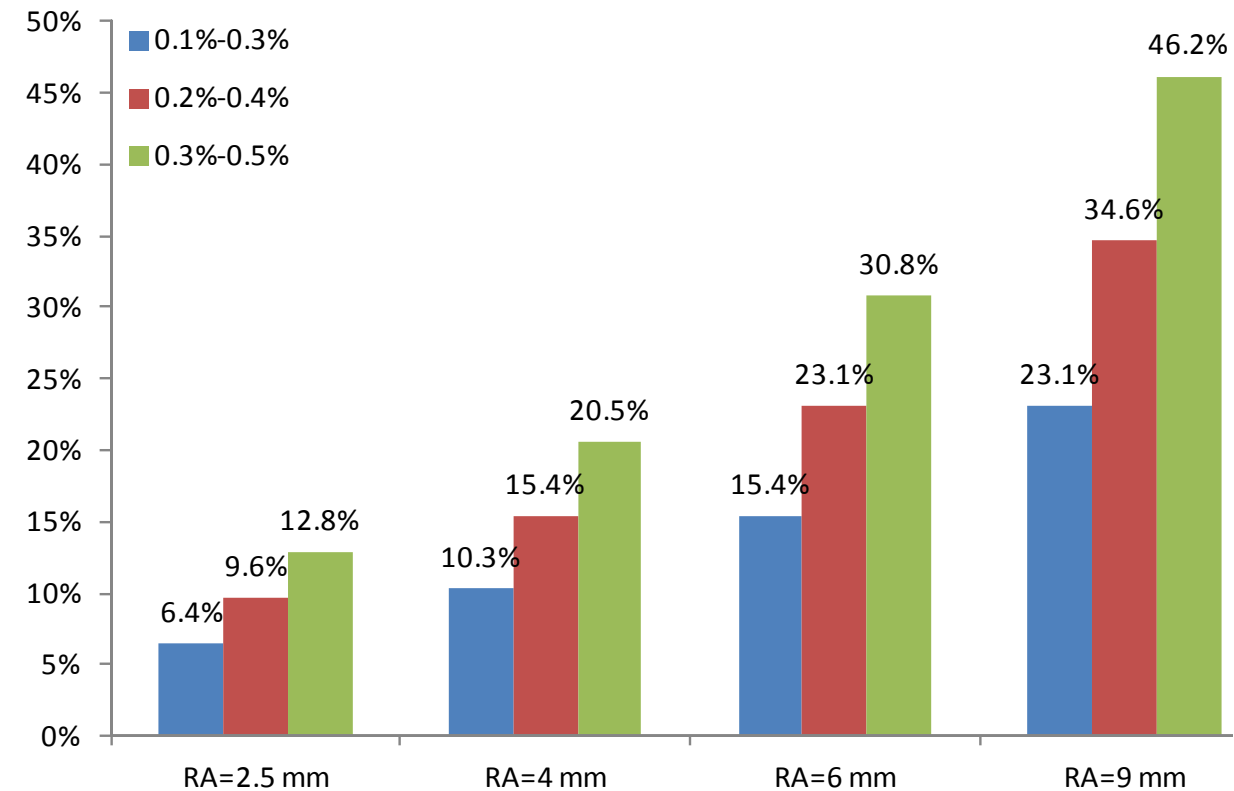
$$E_{3p} = \frac{mL_0^3}{4wh^3}$$

**F3P**



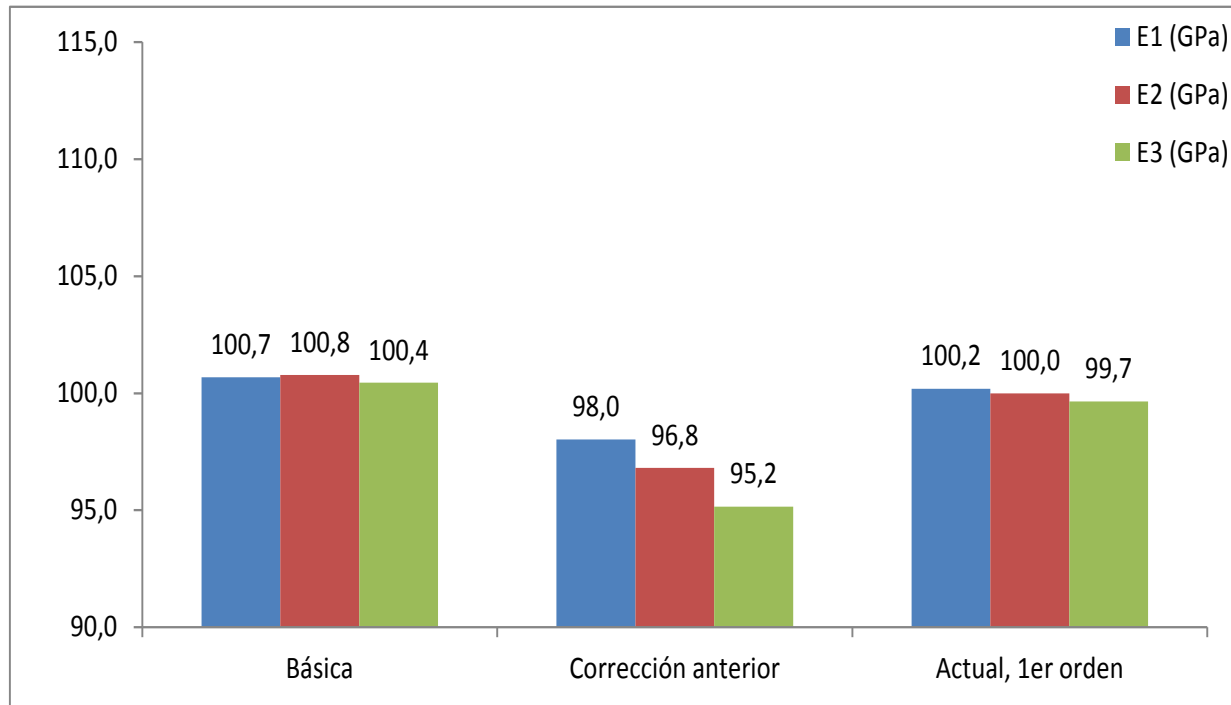
$$E_{4p} = \frac{mL_0^3}{8wh^3}$$

**F4P,  $R_A = R_C$**

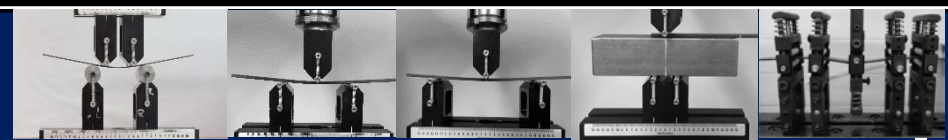
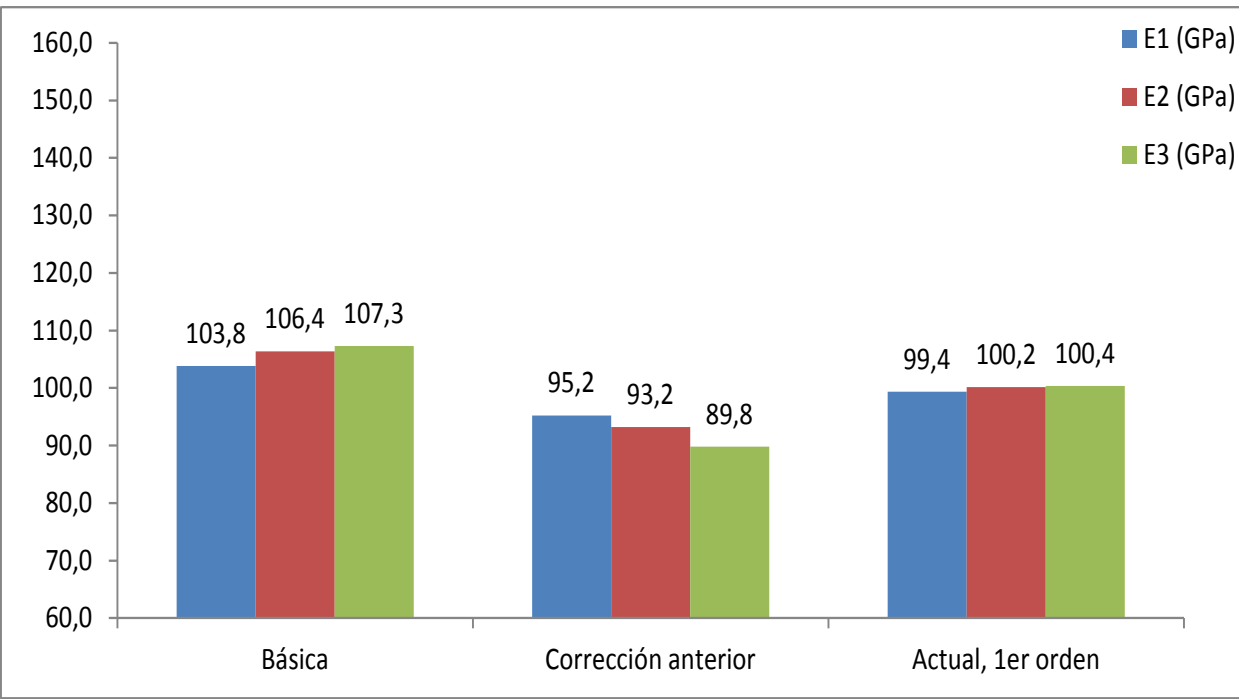


Módulos obtenidos según distintas aproximaciones,  $R_A = 2,5$  mm

**F3P**



**F4P,  $R_A = R_C$**

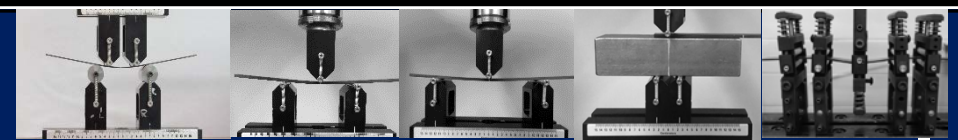
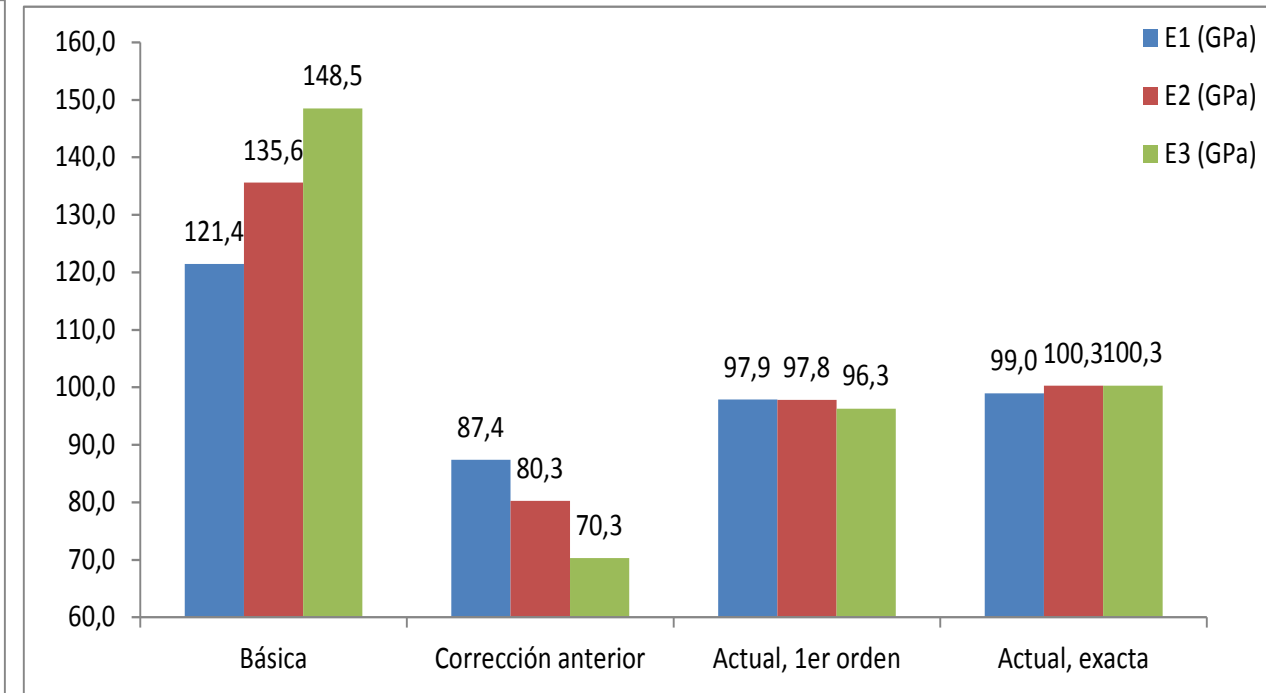
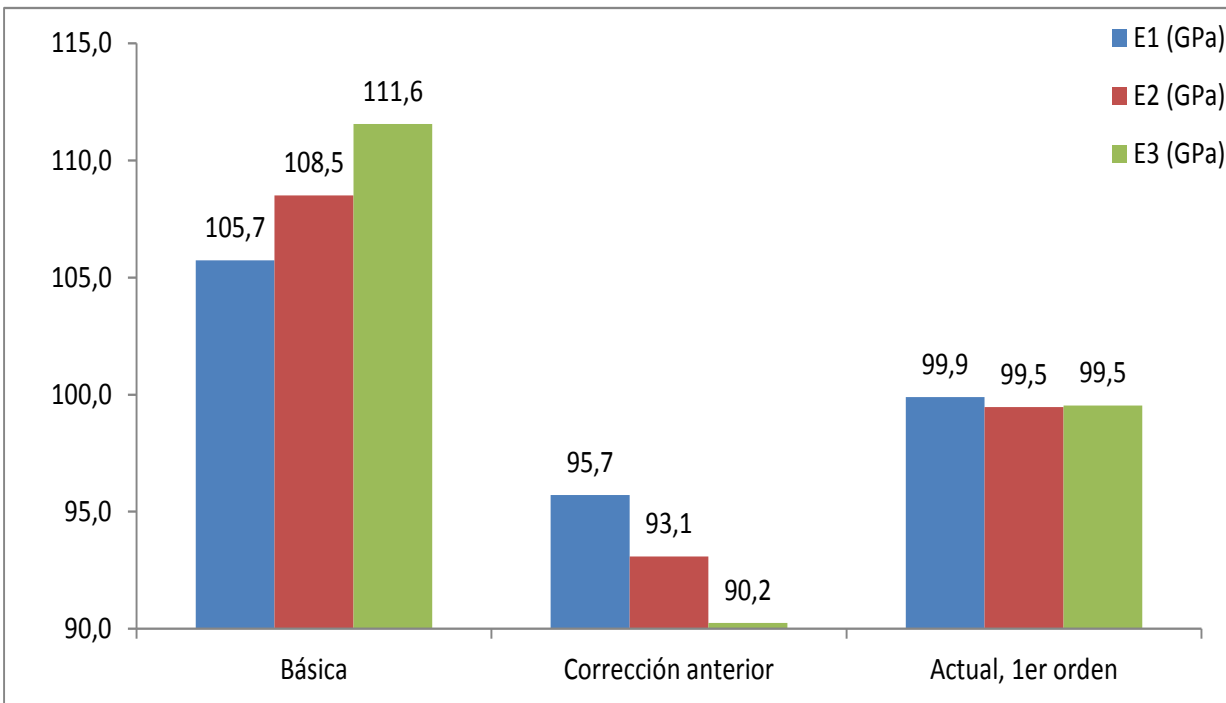


## 4. Cambio del contacto entre probeta y rodillos

Módulos obtenidos según distintas aproximaciones,  $R_A = 9$  mm

**F3P**

**F4P,  $R_A = R_C$**



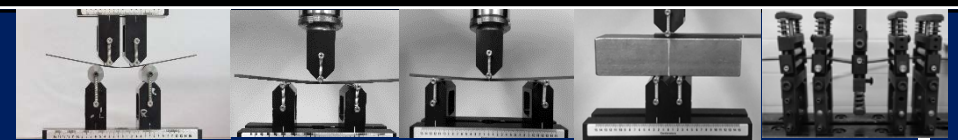
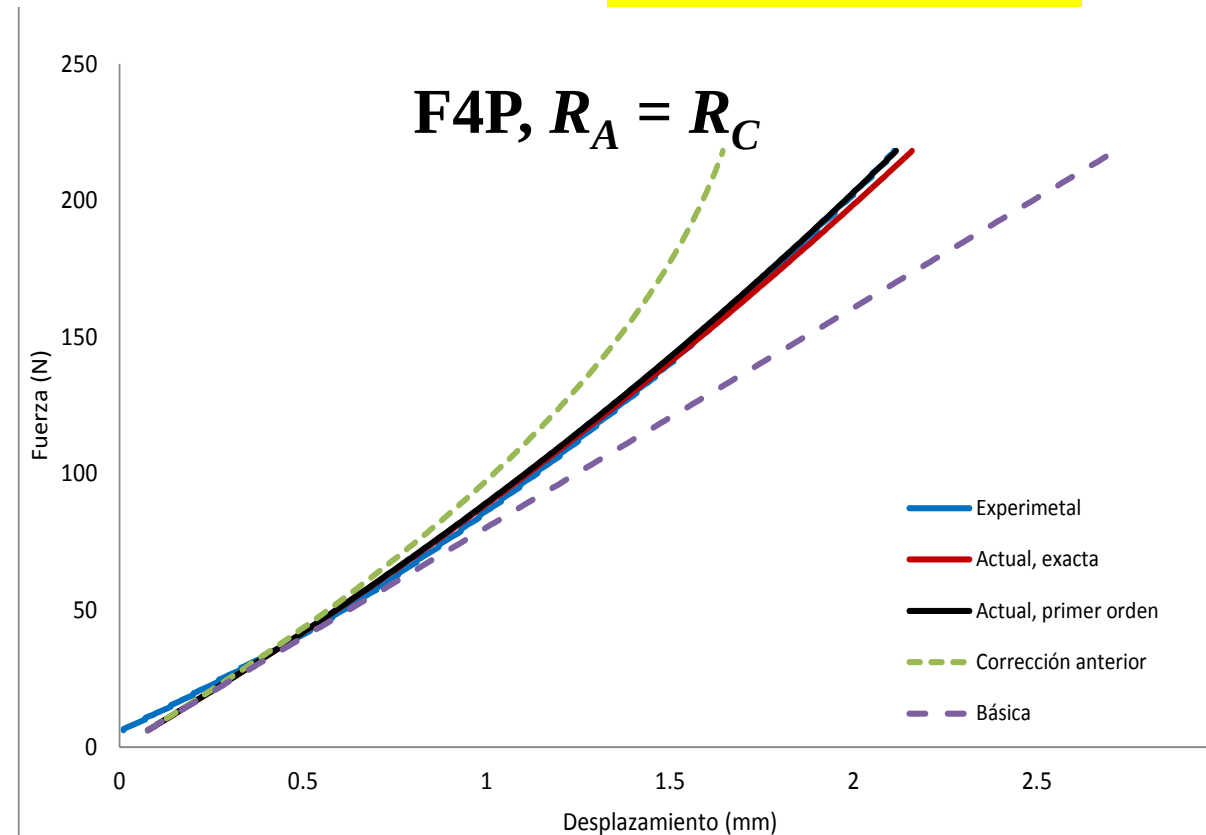
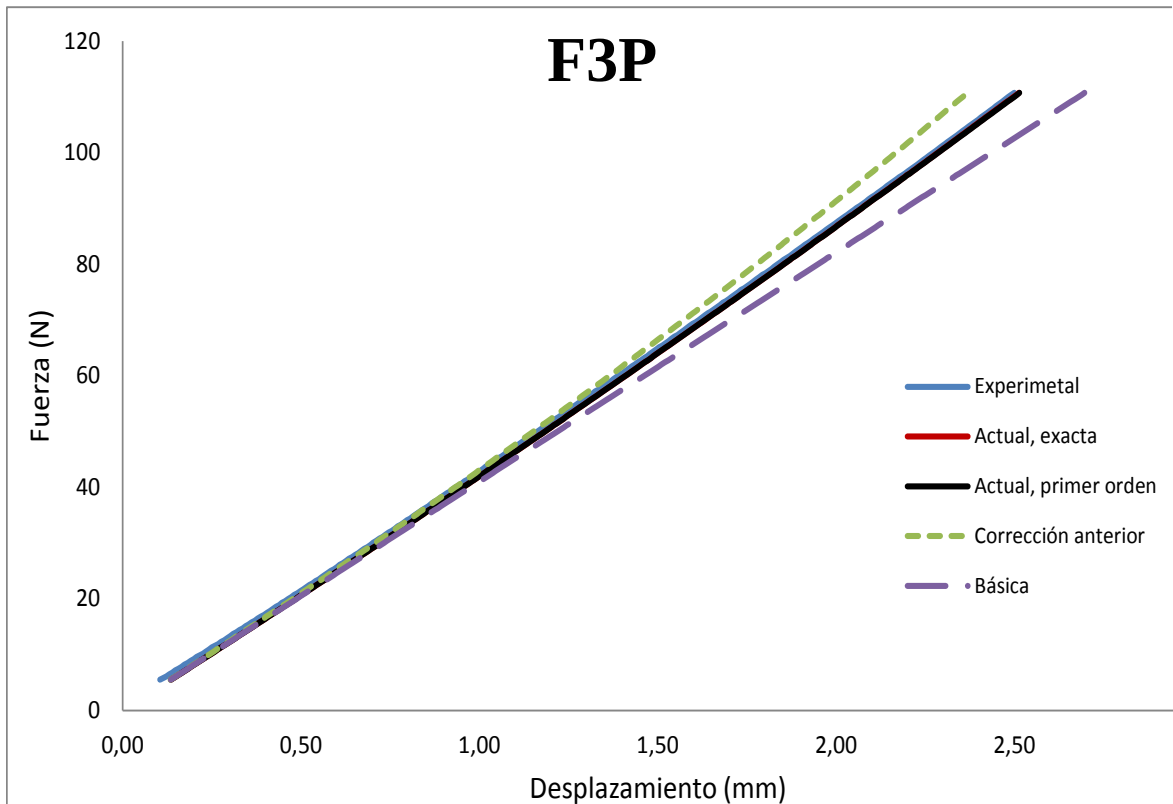
# 4. Cambio del contacto entre probeta y rodillos

Curvas carga-desplazamiento experimental y según distintas aproximaciones,  $R_A = 9 \text{ mm}$

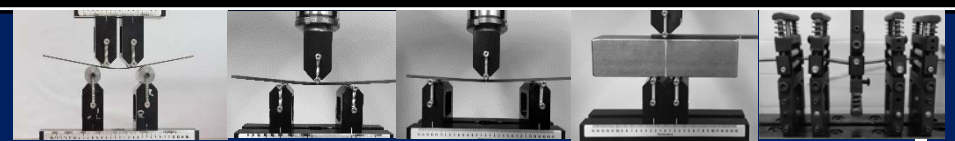
Valores medios

$$E_f = 100,1 (\pm 0,7) \text{ GPa}$$

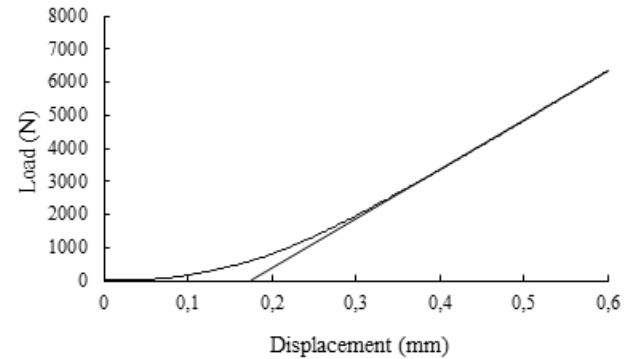
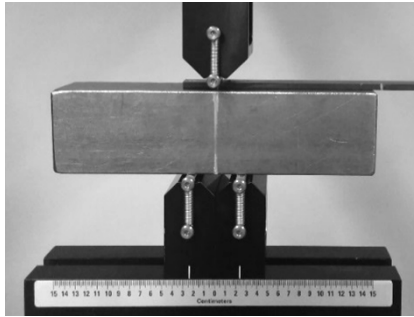
$$E_f = 100,1 (\pm 1,0) \text{ GPa}$$



- Se pueden obtener los módulos de tracción, compresión y flexión mediante ensayos de F4P con una galga.
- Los efectos del cortante y la rigidez del sistema cobran mucha importancia cuando la relación luz-espesor es elevada.
- Para relaciones elevadas radio-espesor, el cambio del punto de contacto entre probeta y rodillos influye en la determinación del módulo.
- Desde el punto de vista de obtención del módulo de flexión, la interpretación clásica de los ensayos F3P se acerca más a la aproximación corregida que en el caso de los ensayos F4P.



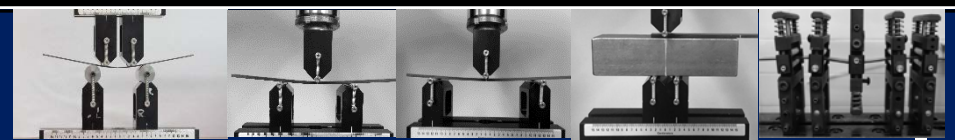
### 1. Determinación de la rigidez del sistema mediante un ensayo de indentación.



### 2. Crear un canal de desplazamiento real de la probeta.

$$\delta = \delta_{\text{exp}} - PC_s$$

Mujika F Three-point bending test procedure: rectangular cross section, *Research Gate*. DOI: [10.13140/RG.2.2.30407.52645](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30407.52645)

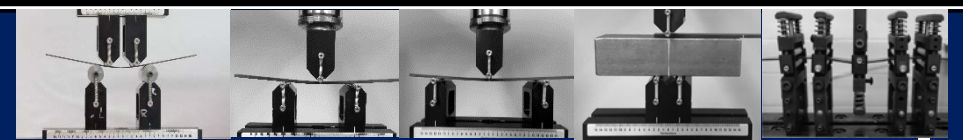


3. El canal de deformación se crea según la carga un módulo aproximado.

$$\varepsilon = \frac{3PL_0}{2E_{ap}bh^2}$$

4. Se determina la pendiente de cuerda entre dos puntos correspondientes a dos valores de deformación. Por ejemplo:

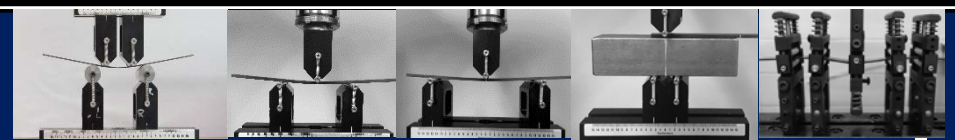
$$\varepsilon_1 = 0,1\% \quad \varepsilon_2 = 0,3\% \quad m = \frac{P_2 - P_1}{\delta_2 - \delta_1}$$



5. Se realizan ensayos a varias luces para obtener  $E_f$  y  $G$  por regresión lineal.

$$y = Ax + B \quad x = \left( \frac{h}{L_0} \right)^2 \quad y = \left( \frac{mL_0^3}{4bh^3} \right)^{-1} = E_{3p}^{-1}$$

$$E_f = A^{-1} \left[ 1 - \frac{9}{4} \frac{R}{h} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \right] \quad G_{13} = \frac{6}{5} B^{-1} \left[ 1 - \frac{R}{h} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \right]$$



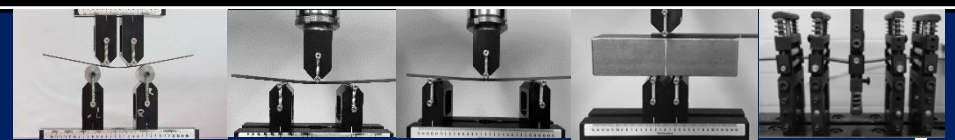
6. La velocidad de desplazamiento de la máquina incorpora todos los efectos

$$\dot{\delta}_{\text{exp}} = \frac{\dot{\epsilon} L_0^2}{6h} \left[ 1 + \frac{6}{5} \frac{E_{f0}}{G_{130}} \left( \frac{h}{L_0} \right)^2 + 4 \frac{E_{f0} b}{K_s} \left( \frac{h}{L_0} \right)^3 \right]$$

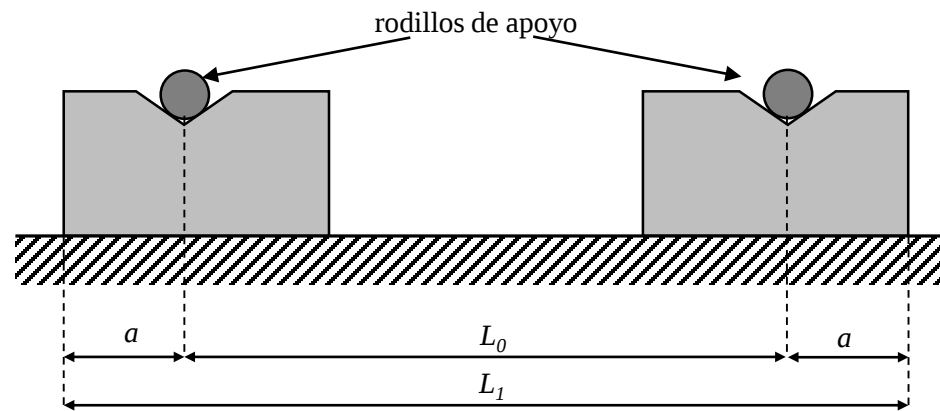
7. La luz mínima debe ser suficiente para evitar efectos de indentación.

8. Aplicar una precarga inicial para asegurar el contacto entre la probeta y la carga. Las condiciones iniciales de ensayo son:

$$t = 0 \quad P = P_0 \quad \delta = 0$$



### 9. Determinación de la luz de ensayo



$L_0$ : distancia a determinar

$a$ : distancia conocida del útil de ensayo, con precisión de 0,1 mm

$L_1$ : distancia medida con calibre, con precisión de 0,1 mm

$$L_0 = L_1 - 2a$$

