

I. Adarraga^{(1)*}, F. Mujika⁽¹⁾, F. de Caso⁽²⁾ y L. Etxeberria⁽²⁾⁽¹⁾ GRUPO MATERIALES + TECNOLOGÍAS / MECÁNICA DE MATERIALES

Departamento de Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa (UPV/EHU)

⁽²⁾ University of Miami, Florida, USA.

Determinación de los módulos de tracción y compresión en barras pultruidas mediante ensayos de flexión

RESUMEN

Historia del artículo:

Recibido 4 de Junio 2019

En la versión revisada 20 de Junio 2019

Aceptado 5 de Julio 2019

Accesible online 18 de Enero de 2021

Palabras clave:

GFRP

Elementos finitos

Módulos de tracción/compresión

La corrosión de las armaduras de acero es la principal causa en la degradación en las estructuras de hormigón armado. Esta es la causa de que en los últimos años se estén utilizando materiales no corrosivos para aumentar la vida útil de estas estructuras. Las barras de polímero reforzado con fibra de vidrio, (GFRP, *Glass Fiber Reinforced Polymer*) son una alternativa a las barras tradicionales de acero.

Estas barras se fabrican a partir de fibras continuas de vidrio embebidas en una matriz de resina polimérica mediante el proceso de pultrusión. Debido a la gran variabilidad en las propiedades mecánicas aportadas por los diferentes fabricantes, puede ser de utilidad definir un procedimiento de ensayo para caracterizar el material de manera sencilla.

En este estudio se propone un procedimiento para determinar los módulos de tracción, compresión, flexión de una barra circular de GFRP mediante ensayos de flexión.

Determination of the compressive and tensile moduli of the pultruded bars by bending tests

ABSTRACT

Keywords:

GFRP

Finite elements

Compressive and tensile moduli

Corrosion of the steel bars is the first cause of degradation of the reinforced concrete structures. This is the reason why in recent years non-corrosive materials are using to increase the useful life of these structures. Glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars are an alternative to traditional steel bars.

These bars are manufactured from continuous glass fiber embedded in a polymeric resin by the pultrusion process. Due to the great variability in the mechanical properties provided by manufacturers, it may be useful to define a test procedure to characterize the material in a simple manner.

This work shows a procedure to determine the compression, tensile and flexural moduli of a GFRP bar by means of bending tests.

1 Introducción

La corrosión de las armaduras de acero es la principal causa en la degradación en las estructuras de hormigón armado. Esta es la causa de que en los últimos años se estén utilizando materiales no corrosivos para aumentar la vida útil de estas estructuras. Las barras de polímero reforzado con fibra de vidrio, (GFRP, Glass Fiber Reinforced Polymer) son una alternativa a las barras tradicionales de acero [iError! No se encuentra el origen de la referencia..

Estas barras se fabrican a partir de fibras continuas de vidrio embebidas en una matriz de resina polimérica mediante el proceso de pultrusión. Debido a la gran variabilidad en las propiedades mecánicas aportadas por los diferentes fabricantes, puede ser de utilidad definir un procedimiento de ensayo para caracterizar el material de manera sencilla.

En este estudio se propone un procedimiento para determinar los módulos de tracción, compresión, flexión de una barra circular de GFRP mediante ensayos de flexión.

2 Relación entre los módulos de tracción, compresión y flexión en un elemento de sección circular

En este capítulo se establece la relación entre los módulos de tracción, compresión y flexión de una viga de sección circular, mediante un procedimiento análogo al correspondiente a elementos de sección rectangular [1,2].

Considerando la sección circular de la figura 1, la deformación normal ε_x a una distancia z desde el centro de gravedad es:

$$\varepsilon = \kappa(z - z_{NA}) \quad (1)$$

Donde κ es la curvatura, z es la coordenada medida desde el centro de gravedad de la sección y z_{NA} es la coordenada del eje neutro.

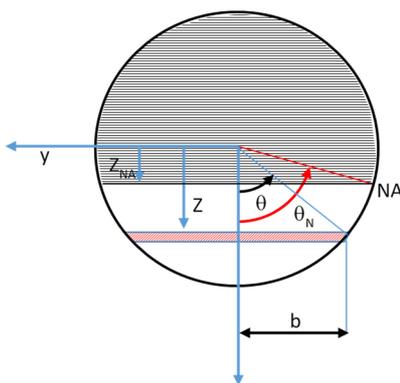


Figura 1. Sección transversal y sistema de referencia

La tensión normal tanto en la zona de tracción como en la de compresión se definen como:

$$\sigma_t = E_t \varepsilon; \quad \sigma_c = E_c \varepsilon \quad (2)$$

Donde E_t y E_c son los módulos de tracción y compresión respectivamente. Suponemos que la zona de compresión está comprendida entre $-R$ y z_{NA} y la de tracción desde z_{NA} hasta R . Dado que en flexión pura la fuerza axial resultante es cero,

$$\int_{A_c} \sigma_c dA + \int_{A_t} \sigma_t dA = 0 \quad (3)$$

Definiendo el parámetro $\lambda = \frac{E_t}{E_c}$ y sustituyendo las tensiones en la ecuación (3),

$$\int_{A_c} (z - z_{NA}) dA + \lambda \int_{A_t} (z - z_{NA}) dA = 0 \quad (4)$$

Teniendo en cuenta las relaciones geométricas de la figura 1 e integrando tanto la parte de tracción como la de compresión la ecuación (4), resulta:

$$\lambda = 1 - 3\pi[3(\theta_{NA} - \text{sen}\theta_{NA}) - 2\text{sen}^2\theta_{NA}\text{tan}\theta_{NA}] \quad (5)$$

Por otra parte, teniendo en cuenta que el momento resultante de las tensiones normales es el momento flector M :

$$\int_{A_c} \sigma_c z dA + \int_{A_t} \sigma_t z dA = M \quad (6)$$

Sustituyendo la relación tensión-Deformación de la ecuación (2) en (6):

$$\int_{A_c} (z - z_{NA})z dA + \lambda \int_{A_t} (z - z_{NA})z dA = \frac{M}{\kappa E_c} \quad (7)$$

Resulta:

$$\frac{M}{\kappa E_c} = BR^4 \quad (8)$$

Donde el parámetro B es:

$$B = (\lambda - 1) \left[\frac{\pi}{4} \left(\theta_{NA} - \frac{1}{4} \text{sen}\theta_{NA} \right) - \frac{2}{3} \text{cos}\theta_{NA} \text{sen}^3\theta_{NA} \right] + \frac{\pi}{4} \quad (9)$$

De acuerdo con la teoría de vigas, la curvatura κ se define mediante la siguiente expresión:

$$\kappa = \frac{M}{E_f I} \quad (10)$$

Igualando las curvaturas y teniendo en cuenta que el momento de inercia es $I = \frac{\pi R^4}{4}$:

$$E_f = \frac{4E_c B}{\pi} \quad (11)$$

Por lo tanto, cuando los módulos de tracción y compresión de un material son diferentes, el módulo de flexión puede obtenerse analíticamente mediante la ecuación (11).

3 Procedimiento experimental

A continuación, se describe el procedimiento experimental a seguir para obtener los módulos del material mediante el ensayo de flexión de 4 puntos en una barra de GFRP.



Figura 2. Ensayo de flexión de 4 puntos de una barra



Del ensayo se obtendrán los valores de carga y deformación máxima de tracción y compresión en la sección crítica. La determinación de la curva carga-deformación se realiza en un rango de valores definido, tal y como se ve en la figura 3. Colocando una sola galga extensiométrica se puede determinar el comportamiento de un punto cuando éste se encuentra en la zona de tracción y cuándo se encuentra en la zona de compresión.

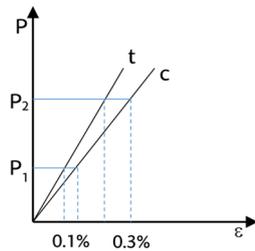


Figura 3. Diagrama carga-deformación para la zona de tracción y de compresión

Fijando los valores de las cargas P_1 y P_2 correspondientes a las deformaciones de 0,1% y 0,3% respectivamente, en ambos casos las curvaturas y el momento flector M son los mismos. Las pendientes de las rectas entre ambos puntos en tracción y en compresión son:

$$m_t = \frac{P_2 - P_1}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)_t} \quad m_c = \frac{P_2 - P_1}{(|\varepsilon_2| - |\varepsilon_1|)_c} \quad (12)$$

y por tanto, la relación entre las pendientes, r_ε es:

$$r_\varepsilon = \frac{m_c}{m_t} = \frac{1 - \cos\theta_{NA}}{1 + \cos\theta_{NA}} \quad (13)$$

Mediante la ecuación (13) se puede obtener el ángulo θ_{NA} a partir de la relación entre las pendientes de la curva P - ε .

Una vez conocido el ángulo θ_{NA} , mediante la ecuación (6) se obtiene el parámetro λ . Conocidos θ_{NA} y λ , el módulo de flexión, E_f se puede calcular a partir de la deformación de la parte en tracción o de la de compresión. Tomando la parte comprimida:

$$|\varepsilon_c| = (R + z_{NA})\kappa = (R + z_{NA}) \frac{M}{E_f I} \quad (14)$$

Teniendo en cuenta que en el ensayo de flexión de 4 puntos el momento flector en la zona entre rodillos es $M = \frac{1}{2} Pa$, donde a es la distancia desde el apoyo al punto de aplicación de la primera carga, es conveniente corregir esta distancia debido a la rotación del elemento durante el ensayo. Así, el módulo de flexión, E_f , es:

$$E_f = \frac{\Delta Pa R}{2\Delta|\varepsilon_c|I} (1 + \cos\theta_{NA}) = \frac{m_c a R}{2I} (1 + \cos\theta_{NA}) \quad (15)$$

Finalmente, sustituyendo E_f en la ecuación (14) se obtiene el módulo de compresión E_c y, siendo λ conocido, el módulo de tracción, E_t . Se puede seguir un procedimiento similar tomando la parte de tracción.

4 Análisis numérico

4.1 Objetivo

Con el objeto de validar numéricamente el procedimiento experimental, se realiza un análisis por Elementos Finitos de un ensayo de flexión de 4 puntos de una barra de polímero reforzado con fibra de vidrio, (GFRP). En la simulación del ensayo las propiedades del material son datos de entrada, y aplicando el procedimiento descrito en el apartado anterior a los datos de salida se obtendrán los valores de los módulos de tracción, compresión y flexión del material. La validación del procedimiento se producirá si los módulos obtenidos se ajustan a los datos de entrada. En este análisis no se han incluido los rodillos de apoyo ni de carga, por lo tanto, no hay que considerar la reducción de la luz entre apoyos que sucedería en un ensayo real.

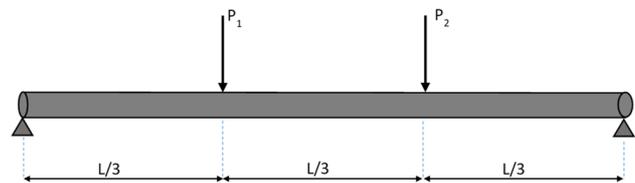


Figura 4: Simulación numérica del ensayo de flexión de 4 puntos

4.2 Datos de entrada

En el análisis por Elementos Finitos se han supuesto las propiedades mecánicas que figuran en la tabla 1.

E_t (GPa)	E_c (GPa)	E_2, E_3 (GPa)	G_{12}, G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)	ν_{12}, ν_{13}	ν_{23}
37,9	54,5	11,0	11,4	2,9	0,29	0,22

Tabla 1: Propiedades del material introducidas en el análisis EF

La probeta tiene un diámetro de 9,53mm y una longitud de 238mm. Para el análisis EF se han utilizado elementos hexaédricos lineales de 8 nodos incompatibles (C3D8I) en el programa ABAQUS ESTANDAR [3]. Mediante la aproximación analítica del apartado 2 se ha calculado la posición del eje neutro, $z_{NA} = 0,368$ mm y se ha introducido la geometría de la barra en dos particiones. En la partición superior se ha introducido el módulo de compresión del material y en la inferior el módulo de tracción.

5 Resultados

En la figura 3 se muestra la distribución transversal de deformaciones normales en la sección central. En ella puede comprobarse que el punto de deformación nula coincide con la posición del eje neutro, z_{NA} que previamente se ha introducido.



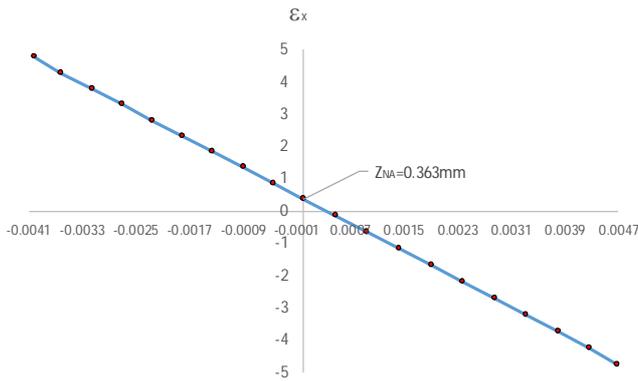


Figura 3. Distribución de deformaciones normales en la sección transversal.

En la figura 4 se muestra la distribución de tensiones normales mediante el análisis con elementos C3D8I de 8 nodos incompatibles. Aquí puede apreciarse el cambio de pendiente de la zona de tracción y de compresión. Se observa también que el punto de tensión normal coincide con la posición de la línea neutra previamente introducida.

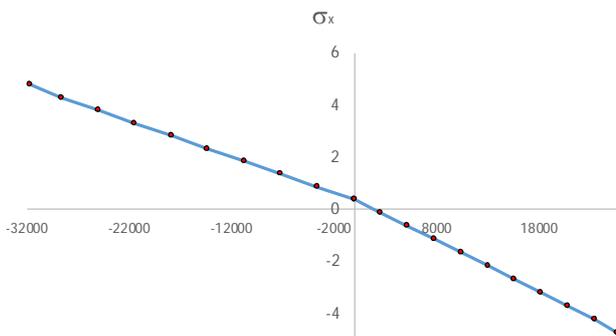


Figura 4. Distribución de tensiones normales en la sección transversal.

A partir de los resultados de los análisis por elementos finitos y siguiendo el procedimiento del apartado 3, se han obtenido los resultados que figuran en la tabla 2:

	C3D8I
E_f (GPa)	44,6
E_c (GPa)	54,2
Error (%)	0,4%
E_t (GPa)	37,8
Error (%)	0,4%

Tabla 2: Módulos de tracción, compresión y flexión obtenidos del análisis EF con elementos Hexaédricos incompatibles.

En la tabla de resultados se observa que el error cometido en el análisis EF con los elementos Incompatibles el error es del 0,4%.

6 Conclusiones

Se ha realizado una aproximación analítica para determinar la posición de la línea neutra y el módulo de flexión en barras

GFRP con módulos de tracción y compresión diferentes. A partir de esta aproximación analítica, se ha descrito un procedimiento experimental para determinar los módulos de tracción, compresión y flexión del material mediante el ensayo de flexión de 4 puntos.

Para validar el método, se ha realizado una simulación por elementos finitos y a partir de los resultados de carga y deformación obtenidos se han calculado los módulos siguiendo el procedimiento experimental.

El error entre los módulos calculados y los valores previamente introducidos como propiedad del material es del 0,4%

7 Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) la financiación del Grupo de Investigación Mecánica de Materiales GIU 16/51 en la convocatoria de 2016.

Referencias

- [1] Nanni A, De Luca A, Jawaheri Zadeh H. CRC Press (2014)
- [2] Ruiz Emparanza A, Kampmann R, and De Caso F, ACI, 1–13, (2017)
- [3] Mujika F, Carbajal N, Arrese A, Mondragon I. Polym Test. 25(6):766-71, (2006)
- [4] Mujika F, Polymer Testing 25(2)14-220,(2006)
- [5] ABAQUS version 6.12: ABAQUS user's manual, SIMULIA World Headquarters,166 Valley Street, Providence, RI 02909, USA; 2012.

