



Conciencia Tecnológica
ISSN: 1405-5597
contec@mail.ita.mx
Instituto Tecnológico de Aguascalientes
México

Dispositivo para Ondular Tiras Plásticas Procedentes de Botellas Desechadas

Meza-de Luna, Alejandro; Sierra-Ortiz, Rodolfo Benjamín; Chávez-Valdivia, Fernando; Romo-Martínez, José Francisco; Robertt-Priego, Luis Alberto; Castañeda-Aguilar, Omar Alejandro
Dispositivo para Ondular Tiras Plásticas Procedentes de Botellas Desechadas
Conciencia Tecnológica, núm. 59, 2020
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, México
Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94463783004>

Dispositivo para Ondular Tiras Plásticas Procedentes de Botellas Desechadas

Device for corrugating plastic strips from discarded bottles

*Alejandro Meza-de Luna*¹
Tecnológico Nacional de México, México
alejandro.meza@mail.ita.mx

Redalyc: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94463783004>

*Rodolfo Benjamín Sierra-Ortiz*¹
Tecnológico Nacional de México, México

*Fernando Chávez-Valdivia*²
Tecnológico Nacional de México, México

*José Francisco Romo-Martínez*³
Tecnológico Nacional de México/IT de Aguascalientes,
Estudiante de la carrera de Ingeniería en Materiales,
México

*Luis Alberto Robertt-Priego*⁴
Tecnológico Nacional de México, México

*Omar Alejandro Castañeda-Aguilar*⁴
Tecnológico Nacional de México, México

Recepción: 16 Diciembre 2019
Aprobación: 22 Mayo 2020

RESUMEN:

El desempeño de las fibras de plástico en el refuerzo del concreto depende de su adherencia con el concreto. Para mejorar su capacidad, las fibras comerciales son producidas con formas onduladas o con ganchos, esto permite mejorar la interacción fibra-concreto. En este artículo se presenta el diseño de un dispositivo que permite la ondulación de tiras extraídas de botellas plásticas. El dispositivo ondulatorio consta de un generador de calor que permite acondicionar la temperatura de la tira plástica, para después

NOTAS DE AUTOR

- 1 Dr. Alejandro Meza-de Luna
Tecnológico Nacional de México/IT de Aguascalientes, Departamento de Ingeniería Mecánica
- 1 M.E.E.V.A. Rodolfo Benjamín Sierra-Ortiz
Tecnológico Nacional de México/IT de Aguascalientes, Departamento de Ingeniería Mecánica
- 2 Ing. Fernando Chávez-Valdivia
Tecnológico Nacional de México/IT de Aguascalientes, Departamento de Ciencias Básicas
- 3 José Francisco Romo-Martínez
Estudiante de la carrera de Ingeniería en Materiales
- 4 Luis Alberto Robertt-Priego
Estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica
- 4 Omar Alejandro Castañeda-Aguilar
Estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica

Av. Adolfo López Mateos No. 1801 Ote. Fracc. Bona Gens, Aguascalientes, Ags., México. C.P. 20256, Tel: 01(449) 9105002, Fax: 01 (449) 9700423. alejandro.meza@mail.ita.mx

ser sometida a una deformación mediante un par de engranes. El diseño del dispositivo ondulator se basó en un estudio analítico, así como en un análisis de elemento finito. Los resultados muestran la viabilidad de ondular tiras plásticas recicladas, de las cuales se pueden extraer fibras que permitan reforzar el concreto.

PALABRAS CLAVE: plástico reciclado, fibras onduladas, concreto reforzado con fibras, dispositivo ondulator.

ABSTRACT:

The performance of the plastic fibers in the reinforcement of the concrete depends on its adhesion with the concrete. To improve its capacity, commercial fibers are produced with corrugate shapes or with end hooked shapes, improving the fiber-concrete interaction. This article presents the design of a device that allows the waving of strips extracted from plastic bottles. The undulating device consists of a heat generator that allows to get temperature on the plastic strip, and then to be deformed by means of a pair of gears. The design of the corrugating device was based on an analytical study, as well as a finite element analysis. The results show the viability of undulating recycled plastic strips to reinforce the concrete.

KEYWORDS: recycled plastic, corrugated fibers, fiber reinforced concrete, corrugating device.

INTRODUCCIÓN

El concreto se compone de la mezcla del cemento con la combinación de agregados; tales como agua, cemento, arena o rocas trituradas en diferentes tamaños. De esta manera, el concreto ha sido utilizado a través del tiempo debido a su alta resistencia a compresión y su facilidad para ser moldeado, esto ha permitido la generación de grandes edificaciones. Sin embargo, el concreto es un material anisotrópico, con una baja resistencia a tensión, la cual oscila entre una décima parte de su resistencia a compresión; esto ha generado problemas de agrietamiento y fallas estructurales [1].

El concreto reforzado con fibras (FRC por sus siglas en inglés *fiber reinforced concrete*) ha demostrado una posibilidad para reducir el fallo de una matriz cementicia [2 - 5], FRC se genera a partir de un concreto convencional, es decir una combinación cemento-agregados, que es mezclado con fibras. Comúnmente, las fibras utilizadas para reforzar el concreto son metálicas o plásticas, que tienen diferentes formas para aumentar la adherencia de ellas al concreto [6, 7]. Se ha demostrado que el FRC depende de varios parámetros atribuidos a las fibras, y de su interacción con la matriz cementicia, entre otros se ha destacado la dosis de fibras contenida en el concreto, sus dimensiones y su forma. [8 - 10].

Por otra parte, el plástico es un material que debido a sus características de resistencia a la corrosión, peso y propiedades mecánicas es utilizado en diferentes productos de uso cotidiano para la población mundial. Se ha reportado que un millón de botellas plásticas son compradas alrededor del mundo cada minuto, lo que ha producido 20,000 botellas desechadas cada segundo; este problema se continúa complicando, Ya que se pronostica un 20% de aumento para el 2021 [11]. También se ha expuesto que el contenido de las botellas plásticas desechadas ha generado problemas de salud para los humanos, como el aumento en ciertos tipos de patógenos cancerígenos, dificultades neurológicas, pubertad precoz en niñas, fertilidad reducida en mujeres, parto prematuro y defectos en recién nacidos [12,13]. Así mismo, se ha indicado que los mares y océanos albergan 12 millones de toneladas de basura cada año, amenazando la existencia de animales marinos [12, 13].

Los problemas citados con anterioridad han permitido la búsqueda de alternativas en al reciclado del plástico en el sector de la construcción. Arabani & Pedram, 2016 [14] utilizó plástico desechado para mezclas de asfalto, lo que generó un aumento en la capacidad elástica del material. Modarres & Hamedi, 2014 [15] reportó un aumento en la resistencia a la fatiga de muestras de concreto con agregados basados en plástico desechado. Meza & Siddique, 2019 [8] reportan un aumento en la ductilidad del concreto reforzado con fibras provenientes de botellas plásticas.

En esta Investigación se propone el uso de un dispositivo que permita ondular el plástico reciclado para producir fibras; que a diferencia de las fibras rectas, se tiene la hipótesis que las fibras onduladas permitirán una mejor adherencia en el concreto y así mejorar su desempeño como elemento de refuerzo. En el artículo se muestra el dispositivo construido, indicando el proceso para ondular las fibras. Para el diseño del dispositivo

de ondulado se utilizó un estudio analítico y de elemento finito. Los resultados muestran el análisis del proceso de ondulación de tiras de PET con el dispositivo. Además, se da un preámbulo a futuros estudios, donde las fibras producidas con la metodología propuesta sean empleadas para la producción de concreto reforzado con fibras recicladas.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Comportamiento de FRC.

El concreto es un elemento que presenta una baja resistencia a tensión, pero a compresión genera una alta resistencia, con valores que pueden alcanzar diez veces la capacidad correspondiente a tensión; motivo por el cual, la capacidad de un concreto reforzado con fibras comúnmente es estudiada a flexión [1]. La mecánica de materiales clásica establece que un elemento que es sometido a flexión presentará una sección sometida a tensión y otra sometida a compresión; la frontera entre estos dos tipos de carga está dividida por el eje neutro. Para el caso del concreto, la falla se presentará en la sección sometida a tensión, propagándose el agrietamiento hasta colapsar la estructura. La Figura 1 ejemplifica una muestra de concreto a flexión.

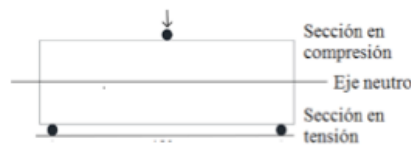


FIGURA 1.
Secciones de carga en una muestra a flexión.

El ensayo a flexión permite analizar el comportamiento del refuerzo en un concreto reforzado y observar el grado de afectación que le puede generar el refuerzo al material base. La Figura 2 muestra el comportamiento básico de un FRC a flexión, el cual puede ser explicado en las siguientes etapas: una resistencia atribuida a la base cementicia hasta una carga máxima; posteriormente se tiene el agrietamiento del concreto, momento en donde las fibras actúan otorgando carga post-fisura y ductilidad al concreto. En caso de analizar un concreto sin refuerzo su carga post-fisura y ductilidad sería nula. La carga residual (post-fisura y ductilidad) dependerá de varios factores, a destacar, la dosis de fibras, la forma de fibras y las dimensiones de fibras.

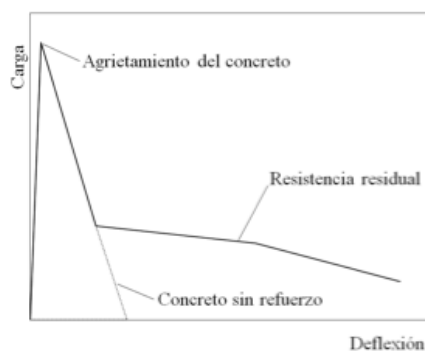


FIGURA 2.
Comportamiento de un FRC a flexión.

Se ha demostrado que la capacidad de contribución de fibras se relaciona con la adherencia entre la interfaz fibra-concreto [16 - 20]. Para estudiar la capacidad de adherencia fibra-concreto comúnmente se utiliza el ensayo de estirado de fibras (*pullout*) el cual consiste en ensayar una matriz cementicia con una fibra, parte

de la fibra estará inmersa en el concreto y la otra parte de ella expuesta, posteriormente la sección de fibra expuesta es sujeta y estirada para medir su capacidad de adherencia con el concreto. La Figura 3 muestra un equipo de ensayo de *pullout*, el cual consta de una serie de tres bases que son apoyadas sobre la muestra de concreto, un sujetador que permite la fijación de la fibra a ensayar, un dinamómetro que permite la medición de la fuerza de adherencia y un sistema de transmisión de fuerza para la extracción de la fibra.

De acuerdo con Breitenbucher [21], el proceso de *pullout* puede ser dividido en tres etapas de comportamiento. Un estado de adherencia, en el cual la superficie de la fibra está conectada a la matriz cementicia; una etapa de separación, en donde la interfaz entre la fibra-concreto es parcialmente destruida, debida a un incremento a la carga aplicada; y finalmente la fase de *pullout*, que consiste en un deslizamiento de la fibra sobre el canal generado en el concreto.

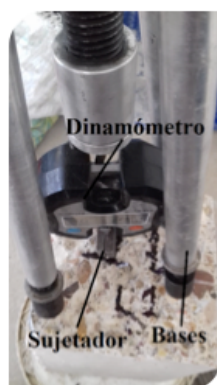


FIGURA 3.
Dispositivo para ensayo de pullout.

MATERIALES Y MÉTODOS

Proceso de rizado de la fibra de PET

El proceso de rizado de la fibra de PET tiene principios de termoformado, el cual consta de dos etapas principales, el calentamiento y el formado. En este proceso comúnmente se hace uso de calentadores eléctricos radiantes, localizados a una distancia de 125 mm. Posteriormente se genera una presión que fuerza al plástico calentado a tomar cierta forma [22].

Diseño del dispositivo

El dispositivo rizador de tiras de plástico se compone de un par de engranes, una manivela que permite la transmisión de fuerza, un calentador y guías. La Figura 4 muestra el bosquejo conceptual del dispositivo. El principio de ondulado de las tiras de PET es el siguiente: por medio de una serie de guías se conducirá la tira plástica por el calentador, para obtener una temperatura adecuada en el proceso de ondulado; posteriormente, la tira de plástico caliente se pasará por los engranes, donde se deformará plásticamente para obtener la forma deseada, el movimiento de la tira se generará mediante una manivela ubicada en la parte posterior del dispositivo.

Los engranes tienen las siguientes características: engranes rectos con un paso diametral 7 de 9 dientes, con un diámetro de paso de 30.48 mm, dimensiones de la cabeza y raíz de los dientes del engrane de 3.55 y 4.31 mm, respectivamente, y una holgura de 1.27 mm.

El generador de calor tiene el objetivo de producir una inyección térmica reversible en el PET, produciendo reblandecimiento del material por temperatura. Se propone que la temperatura que adquiera la tira de PET esté por debajo de los 100 °C, de acuerdo con Posada, 2012 [23] las macromoléculas que constituyen el PET son estables térmicamente por debajo de los 100°C. De lo contrario las moléculas se descomponen en fragmentos, debido a que la energía térmica incidida rompe las uniones covalentes que la constituyen.

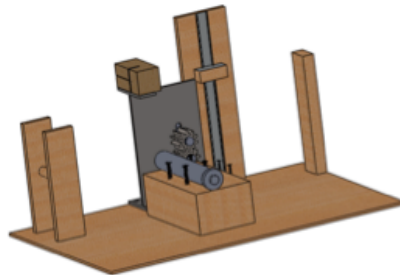


FIGURA 4.
Boceto del dispositivo para rizar tiras de PET.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis FEM

El estudio de transferencia de calor producido por el calentador hacia la tira plástica se estudió con el apoyo del *Software SolidWorks*, utilizando el complemento de elemento finito (FEM). Para la modelación se dibujó una tira de PET de 3x0.3x50 mm, los datos de caracterización térmica y mecánica están basados en los parámetros de biblioteca de *SolidWorks*, atribuidos al material antes mencionado. La Tabla 1 indica los parámetros utilizados en la simulación de la tira plástica reciclada.

TABLA 1
Propiedades del PET, fuente biblioteca de SolidWorks.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo de elasticidad	2.96	GPa
Coefficiente de Poisson	0.37	Sin unidades
Límite de tracción	57.3	MPa
Límite de compresión	92.9	MPa
Calor específico	1140	J/kgK

La simulación se generó en un régimen transitorio, controlando el tiempo de la carga térmica y el intervalo de cálculo. El tiempo total de la carga térmica es de 1 segundo, con intervalo de cálculo de 0.1 segundos. De la misma forma, se estableció una temperatura de inicio de 20°C, para posteriormente aplicarle una carga térmica equivalente a 50°C. El mallado utilizado en toda la pieza está basado en tetraedros

Una vez que el análisis fue ejecutado, los resultados indicaron que un tiempo de 1 segundo se tiene una temperatura mínima de 46.5°C y una máxima de 50°C. Esta diferencia de temperatura (3.5°C) es considerada adecuada, mostrando uniformidad de calentamiento en toda la sección de la tira plástica, efecto que es

de importancia para el proceso de ondulado. La Figura 5 muestra las secciones donde se encontraron las temperaturas máximas y mínimas.

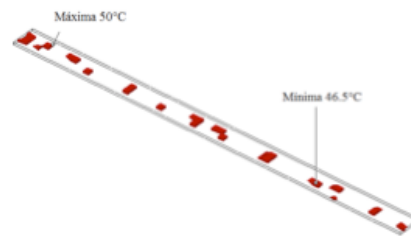


FIGURA 5.

Localización de las temperaturas máximas y mínimas en el estudio.

De la misma forma, se realizó un estudio de gradiente térmico en el plano x y el correspondiente al plano y . La Figuras 6 y 7 muestran los gradientes térmicos en los ejes x y y , respectivamente. Las cuales permiten observar una proyección de temperatura uniforme en los dos ejes, expresando un comportamiento adecuado de la distribución de calor en toda la pieza.

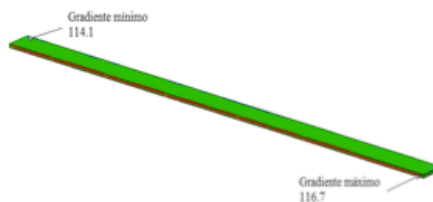


FIGURA 6.

Gradientes térmicos en el eje x .

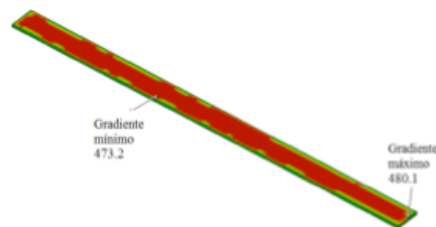


FIGURA 7.

Gradientes térmicos en el eje y .

Análisis de rizado de fibras

La fuerza requerida para realizar el doblado de la tira plástica depende su geometría en la sección transversal, así como de sus propiedades mecánicas. La Ecuación 1 muestra la relación utilizada para la fuerza de ondulado [22].

$$F = \frac{KT_y W L^2}{D}$$

Ec. (1)

Donde:

F : fuerza requerida para el ondulado

K : constante de ondulación

T_s : límite de tracción de la tira plástica

w : ancho de la tira plástica

t : espesor de la tira plástica

D : ancho del diente del engrane.

En el cálculo de la fuerza requerida para el ondulado se consideró los siguientes datos: límite de tracción de la tira plástica de 57.3 MPa, con una sección transversal de la tira plástica de 3x0.3 mm, un ancho del diente del engrane para el ondulado de 3 mm, y una constante de ondulación de 1.33 [22]. El resultado indica una fuerza requerida para el ondulado de 6.85 N, parámetro que será utilizado para el proceso de diseño en la fase de cálculo de esfuerzos.

El diseño del engrane para el ondulado fue controlado en base a criterio de falla por flexión, debido a ser la más común en engranes, por su peculiaridad de operación. Para el cálculo del esfuerzo se utilizó la Ecuación 2, basada en la formulación propuesta por Lewis.

$$\sigma = \frac{WP}{FY} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

σ : esfuerzo en el diente del engrane

W : fuerza aplicada

P : paso diametral de los dientes del engrane

F : espesor de la cara del diente

Y : factor de forma de Lewis.

Los valores considerados en la determinación del esfuerzo en el diente del engrane son una fuerza aplicada de 6.85N, un paso diametral de los dientes del engrane de 7, espesor de la cara del diente de 3 mm, factor de forma de Lewis de 0.245 [24]. El resultado indica un esfuerzo de 65.23 kPa, el valor calculado fue empleado para la selección del material de los engranes.

Para el diseño del engrane se consideró un acero SAE 1020 con una resistencia a la fluencia de 210 MPa, una resistencia máxima de 380 MPa [25], resistencia permisible a flexión de 170 MPa, y una resistencia a tensión por contacto de 590 MPa [24]. Todas las resistencias indicadas están por debajo del esfuerzo calculado (65.32 kPa), lo que indica un buen funcionamiento mecánico del engrane en el proceso de ondulación.

Dispositivo construido

La Figura 8 muestra el dispositivo final construido, basado en el boceto de diseño y los cálculos realizados en forma analítica, así como por elemento finito. El dispositivo consta de un generador de calor de 1875 w, un juego de engranes con las características mencionadas en el diseño, una manivela para la transmisión de potencia con una longitud de 95 mm. La temperatura promedio de calentamiento de la tira plástica antes de ser ondulada fue medida con un pirómetro, indicando un valor promedio de 42.6°C. La figura 9 muestra el ingreso de la tira plástica y su egreso una vez que ha pasado por el proceso de ondulación. La Figura 10, ilustra las dimensiones promedio de la ondulación generada.



FIGURA 8.
Dispositivo para el ondulado de tira plástica.



FIGURA 9.
Proceso de ondulado de la tira plástica.



FIGURA 10.
Dimensiones promedio de la ondulación generada en la tira plástica.

CONCLUSIÓN

El concreto debido a su baja resistencia a tensión es reforzado con fibras, el desempeño de las fibras depende en gran medida de su capacidad de adherencia entre la interfaz fibra-concreto, para mejorar esta capacidad comúnmente las fibras son generadas con ganchos o con ondulaciones. En este artículo se propone la ondulación de tiras plásticas provenientes de botellas desechadas, para producir fibras recicladas onduladas para el refuerzo del concreto.

El dispositivo ondulador diseñado tiene el principio de termoformado, constituido por un generador de calor que permite calentar la tira de plástico reciclada, para después ser deformada mediante un par de engranes.

El análisis térmico de calentamiento de la tira plástica reciclada se realizó por computadora, utilizando el *SolidWorks* en la aplicación de elemento finito. Mientras que el estudio mecánico de los engranes onduladores se realizó analíticamente. Los resultados indican uniformidad en el calentamiento de la tira plástica analizada, indicando buena distribución de temperatura para el proceso de ondulado.

Los engranes onduladores fueron diseñados con un acero SAE 1020, el cual permite garantizar un trabajo adecuado en la operación mecánica de la deformación plástica de la tira reciclada.

El presente trabajo fomenta el uso de materiales desechados para ser utilizados en el sector de la industria de la construcción. Futuros estudios podrían estar enfocados en analizar el comportamiento del concreto reforzado con las fibras propuestas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Tecnológico Nacional de México/I.T. Aguascalientes, por su apoyo en la Convocatoria Fomento a la Investigación. De la misma forma se agradece a los alumnos de la carrera de Ingeniería Mecánica por su participación en este proyecto, en forma especial a Abraham Alvarado Laguna.

REFERENCIAS

- [1] Meza, A. (2015). Optimización del Concreto Reforzado con Fibras de Acero y Polipropileno en pisos industriales, basado en análisis experimental y numérico. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- [2] Mészöly, T., Randl, N. (2018). Shear behavior of fiber-reinforced ultra-high-performance concrete beams. *Engineering Structures*, 168, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.075>.
- [3] Yoo, D.Y., & Banthia, N. (2017). Experimental and numerical analysis of the flexural response of amorphous metallic fiber reinforced concrete. *Materials and Structures*, 50, 50-64. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0899-0>.
- [4] Facconi, L., Minelli, F., Plizzari, G. (2016). Steel fiber reinforced self-compacting concrete thin slabs – Experimental study and verification against Model Code 2010 provisions. *Engineering Structures*, 122, 226-237. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.030>.
- [5] Meza, A., Ortiz, J.A., Peralta, L., Pacheco, J., Soto, J.J., Rangel, S.H., Padilla, R., Alvarado, J. (2014). Estudio experimental de caracterización mecánica del concreto reforzado con fibras de acero y de polipropileno. *Revista técnica de la facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia*, Vol. 37, No 2, pp. 106-115.
- [6] Ghoddousi, P., Ahmadi, R., Sharifi, M. (2010). Fiber pullout model for aligned hooked-end steel fiber. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37, 1179-1188. <https://doi.org/10.1139/L10-053>.
- [7] Cunha, V.M., Barros, J.A., Sena-Cruz, J.M. (2010). Pullout Behavior of Steel Fibers in Self-Compacting Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22, 1-9.
- [8] Meza, A. & Siddique, S. (2019). Effect of aspect ratio and dosage on the flexural response of FRC with recycled fiber. *Construction and Building Materials*, 213, 286-291. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.081>
- [9] Lakavath C., Joshi, S.S., Prakash, S.S. (2019) Investigation of the effect of steel fibers on the shear crack-opening and crack-slip behavior of prestressed concrete beams using digital image correlation. *Engineering Structures*, 193, 28–42. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.030>
- [10] Joshi, S.S., Thammishetti, N., Prakash, S.S. (2018) Efficiency of steel and macro-synthetic structural fibers on the flexure-shear behaviour of prestressed concrete beams. *Engineering Structures*, 171, 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.067>
- [11] The guardian (2019) <https://www.theguardian.com/environment/2017/jun/28/a-million-a-minute-worlds-plastic-bottle-binge-as-dangerous-as-climate-change>, consultado el 11 noviembre 2019.
- [12] Green planet (2019) <https://www.onegreenplanet.org/animalsandnature/whats-the-problem-with-plastic-bottles>, consultado el 11 noviembre 2019.
- [13] Green peace (2019) <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos>, consultado el 11 noviembre 2019.

- [14] Arabani, M., Pedram, M. (2016) Laboratory investigation of rutting and fatigue in glassphalt containing waste plastic bottles. *Construction and Building Materials*, 116, 378–383. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.105>
- [15] Modarres A., Hamed, H. (2014) Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes. *Materials and Design*, 6, 8–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.046>
- [16] Abdallah, S. & Rees, D.W.A. (2019) Comparisons Between Pull-Out Behaviour of Various Hooked-End Fibres in Normal–High Strength Concretes. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 13:27.
- [17] Deng, F., Ding, X., Chi, Y., Xu, L., Wang, L. (2018) The pull-out behavior of straight and hooked-end steel fiber from hybrid fiber reinforced cementitious composite: Experimental study and analytical modelling. *Composite Structures*, 206, 693–712. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.066>
- [18] Ferreira, S.R., Pepe, M., Martinelli, E., Silva, F.A., Filho, R.D.T. (2018) Influence of natural fibers characteristics on the interface mechanics with cement-based matrices. *Composites Part B*, 140, 183–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.016>
- [19] Ye, J. & Liu, G. (2019) Pullout Response of Ultra-High-Performance Concrete with Twisted Steel Fibers. *Applied Sciences*, 9, 648.
- [20] Zhang, X. & Deng, Z. (2018) Experimental study and theoretical analysis on axial compressive behavior of concrete columns reinforced with GFRP bars and PVA fibers. *Construction and Building Materials*, 172, 519–532. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.237>
- [21] Breitenbücher, R., Meschke, G., Song, F., Zhan, Y. (2014) Experimental, analytical and numerical analysis of the pullout behaviour of steel fibres considering different fibre types, inclinations and concrete strengths. *Structural Concrete*, 15(2), 126-136. DOI: 10.1002/suco.201300058
- [22] Groover, M.P., (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. Mc. Graw Hill, tercera edición.
- [23] Posada Bustamante, B. (2012). La degradación de los plásticos. *Revista Universidad EAFIT*, 30(94), 67-86. Recuperado a partir de <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1408>
- [24] Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. Pearson Educación, cuarta edición.
- [25] Budynas, R.G., Keith Nisbett, J. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Mc. Graw Hill Educación, novena edición.