

# Barras FRP De Basalto: Construcción De Estructuras De Hormigón Armado De Larga Duración Libres De Corrosión

## Basalt FRP Rebars: Building Long-lasting Reinforced Concrete Structures Free Of Corrosion

### Autores

**Álvaro Ruiz Emparanza<sup>1</sup>, Francisco De Caso<sup>2</sup>, Antonio Nanni<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Mafic USA, Shelby, North Carolina, USA, :e-mail [alvaro.ruiz@mafic.com](mailto:alvaro.ruiz@mafic.com)

<sup>2y3</sup> Univeristy of Miami, Dept. of Civil and Architectural Engineering, Florida USA

### RESUMEN

*El uso de barras de refuerzo de polímero reforzado con fibra, FRP (del inglés Fiber Reinforced Polymer), evita el deterioro acelerado que sufren las estructuras de hormigón armado debido a la corrosión de la armadura de acero. Las barras de refuerzo FRP están hechas de fibras alineadas longitudinalmente en una matriz de resina polimérica, siendo el vidrio E-CR el tipo de fibra predominante en la industria. Sin embargo, en la última década, el uso de fibra de basalto ha aumentado significativamente debido a las propiedades mecánicas mejoradas y al impacto ambiental reducido en comparación con el vidrio E-CR.*

*Este documento detalla las principales propiedades que tienen las barras de FRP de basalto (BFRP), resume los estándares y especificaciones existentes para su uso en estructuras de hormigón armado, incluida la nueva especificación ASTM para fibras de basalto, y evalúa su uso a través de proyectos prácticos de construcción existentes. El objetivo de este artículo es crear un marco de referencia para presentar las herramientas necesarias para que los profesionales de la industria de la construcción utilicen barras de refuerzo BFRP en lugar de acero donde se necesite un refuerzo anticorrosivo para extender la vida útil de estructuras de hormigón.*

**Palabras claves :** Basalto, BFRP, Construcción, Corrosión, Durabilidad, Hormigón, Sostenibilidad.

### ABSTRACT

*The use of fiber reinforced polymer (FRP) rebars avoid the accelerated deterioration that reinforced concrete structures suffer due to the corrosion of the steel reinforcement. FRP composite rebars are made of longitudinally aligned fibers embedded in a polymeric resin, being E-CR glass the predominant type of fiber in the FRP rebar industry. However, in the last decade the use of basalt fiber has increased significantly due to the enhanced mechanical properties and reduced environmental impact compared to E-CR glass.*

*This paper lists the main properties that BFRP rebars have, summarizes the existing standards and specifications including the new ASTM specification for basalt fibers, and evaluates their use through existing practical construction projects. The aim of this article is to create a frame of reference to introduce the necessary tools for professionals in the construction industry to use BFRP rebars in lieu of steel where non-corrosive reinforcement is needed to extend the service life of the built infrastructure.*

**Keywords:** Basalt, BFRP, Corrosion, Construction, Concrete, Durability, Sustainability.

Nota Editorial: Recibido: Octubre 2022 Aceptado: Noviembre 2022

# 1. INTRODUCCIÓN

Las barras de refuerzo de polímero reforzado con fibra (FRP) son una alternativa no corrosiva y duradera a las barras de acero tradicionales para el uso como refuerzo interno en estructuras de hormigón armado. Las barras de refuerzo FRP están hechas de fibras alineadas longitudinalmente en una matriz de resina fabricadas mediante un proceso llamado pultrusión. Las barras de refuerzo de FRP se han utilizado en estructuras de ingeniería civil durante más de tres décadas. La fibra de vidrio fue y sigue siendo el tipo de fibra más utilizado debido a su disponibilidad y bajo costo. Sin embargo, el interés en otras fibras como el basalto ha ido en aumento ya que sus propiedades mecánicas superan a las del vidrio [1,2] y la diferencia de costo es marginal. Con un suministro creciente de fibra de basalto en los EE. UU., su uso en barras de refuerzo de FRP se está volviendo económicamente factible [3].

Históricamente, las barras de refuerzo FRP se han utilizado con mayor frecuencia en la infraestructura de transporte que en edificios. La razón principal ha sido el interés de los Departamentos de Transporte de aumentar la vida útil y reducir el costo de mantenimiento de los puentes y otras estructuras viales. Por ejemplo, Al-Khafaji et al. [4] evaluó 11 puentes reforzados con FRP de vidrio (GFRP) después de estar en servicio durante 15 a 20 años y, de los cupones extraídos, casi no se observó degradación de GFRP a pesar de que las barras de refuerzo utilizadas en estos proyectos se fabricaron con vidrio E-Glass en lugar del vidrio E-CR que se utiliza actualmente, el cual es una evolución libre de boro más reciente para mejorar la resistencia a la corrosión. De hecho, si bien el vidrio E-glass es la fórmula de fibra de vidrio más utilizada en el mundo, contiene boro y flúor, dos compuestos que quedan atrapados en partículas liberadas a la atmósfera durante la fabricación, lo que provoca contaminación ambiental. Por el contrario, la fibra de vidrio E-CR no contiene boro ni flúor y tiene mejores propiedades mecánicas, mayor resistencia al calor, resistencia al agua y mayor resistencia superficial que la fibra de vidrio E-glass. La fibra de vidrio E-CR se produce bajo la norma ASTM D578 desde 2005.

Últimamente, sin embargo, el uso de barras BFRP ha aumentado significativamente en edificios y otras obras comerciales después de los resultados positivos que ha mostrado el refuerzo de FRP en la infraestructura. Además de la durabilidad, una ventaja muy importante para los contratistas es el peso ligero del material (una cuarta parte del acero tradicional) que hace que el transporte, la manipulación y la instalación sean significativamente más fáciles y rentables.

## 2. PROPIEDADES DE LAS BARRAS BFRP



Las barras FRP de basalto (BFRP) tienen una resistencia alta a tracción (más de tres veces mayor que el acero Grado 60 (420 MPa) para diámetros de barra equivalentes), son livianas (una cuarta parte del peso del acero), eléctricamente no conductoras y transparentes a los campos electromagnéticos. Sin embargo, la principal ventaja de estas barras compuestas es la alta resistencia a la corrosión, incluso cuando se exponen a entornos hostiles como zonas costeras donde niveles altos de cloruros debido a la presencia de agua marina [1, 5-7]. Como en el caso de las barras FRP de vidrio, carbono o aramida, las barras BFRP son elásticas lineales hasta la falla y no exhiben una meseta plástica como en el caso del acero dulce. En comparación con otros tipos de FRP, las barras de refuerzo BFRP se encuentran entre el vidrio y el carbono tanto en resistencia como en rigidez. En comparación con las barras de refuerzo FRP de vidrio E-CR, las barras BFRP tienen un módulo y una resistencia ligeramente superiores, y una mayor durabilidad [1,5]. El módulo elástico de una barra de BFRP es aproximadamente un tercio del del acero.

La Tabla 1 resume las propiedades de las barras de refuerzo BFRP #5 (16 mm) que se ensayaron en la Universidad de Miami como parte del proceso de certificación del Departamento de Transporte de Florida (FDOT). Esta tabla presenta los valores medios o garantizados obtenidos experimentalmente siguiendo los diferentes métodos de ensayo ASTM, y se comparan con tres especificaciones de materiales existentes [8, 9 y 10].

**Tabla 1 - Propiedades de las barras de refuerzo BFRP #5**

Propiedad	Método de ensayo	Unid.	Valor	Especificaciones		
				ASTM D7957	ICC-ES AC454	FDOT 932
Área	ASTM D792	mm <sup>2</sup>	<b>228</b>	186-251	186-251	186-251
Contenido de fibra	ASTM D2584	%	<b>84</b>	≥ 70	≥ 70	≥ 70
Carga máxima a tracción		kN	<b>286.8</b>	≥ 130	≥ 144	≥ 130
Resistencia máxima a tracción (nominal)	ASTM D7205	MPa	<b>1441</b>	n/a	≥ 104.9ksi	n/a
Modulo elástico (nominal)		GPa	<b>65.2</b>	≥ 44.8	≥ 44.8	≥ 44.8
Elongación máxima		%	<b>2.21</b>	≥ 1.1	n/a	n/a
Capacidad de adherencia	ASTM D7913	MPa	<b>9.95</b>	≥ 7.6	≥ 7.6	≥ 7.6
Resistencia al corte transversal	ASTM D7617	MPa	<b>255</b>	≥ 131	≥ 152	≥ 152
Resistencia al corte horizontal	ASTM D4475	MPa	<b>48.6</b>	n/a	≥ 38	≥ 38
Resistencia a alcalinidad (con carga): retención de carga a tracción	ASTM D7705- Procedure B	%	<b>92</b>	n/a*	≥ 70	≥ 70
Temperatura de tránsito vítrea (DSC)	ASTM E1356	°C	<b>125</b>	≥ 100	≥ 100	≥ 100
Grado de curado	ASTM E2160	%	<b>99</b>	≥ 95	n/a	≥ 95
Absorción de humedad en 24h	ASTM D570	%	<b>0.07</b>	≤ 0.25	≤ 0.25	≤ 0.25
Absorción de humedad hasta saturación		%	<b>0.40</b>	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0

\*ASTM D7957 especifica el uso de ASTM D7705 - Procedimiento A (sin carga) como prueba de durabilidad. Se requiere una retención mínima del 80 % para que se acepte la barra de refuerzo de FRP.

En general, como se observa en la Tabla 1, los valores físico-mecánicos obtenidos experimentalmente están significativamente por encima de los valores mínimos establecidos por las normas ASTM D7957, ICC-ES AC454 o FDOT 932 [8, 9 y 10] (explicadas en la sección 3). Hay dos razones para explicar estos hallazgos: (i) las fibras de basalto tienen mayor resistencia y rigidez que las fibras de vidrio E-CR que se utilizaron como referencia en el desarrollo de estas especificaciones de materiales; y (ii) el proceso de fabricación y los sistemas aglutinantes (es decir, resina, rellenos y aditivos) han mejorado considerablemente desde que se crearon estas especificaciones por primera vez, lo que ha dado lugar a barras de refuerzo de FRP con propiedades físico-mecánicas más altas. En la futura revisión de estas especificaciones, se espera que los requisitos mínimos se incrementen para reflejar el desempeño actual del material.

### 3. NORMAS Y ESPECIFICACIONES

Para un uso seguro y eficiente de cualquier material de construcción, es fundamental que existan especificaciones del material y guías de diseño adecuadas. En el caso de las barras de refuerzo BFRP, se han logrado avances significativos para proporcionar un marco técnico y legal para su uso en estructuras de hormigón. Aunque los documentos existentes se crearon primero para las barras de refuerzo GFRP, la mayoría de ellos planean incluir o han incluido recientemente las barras BFRP.

#### Especificaciones de materiales

La primera especificación ASTM para la fibra de basalto se aprobó a principios de septiembre 2022, lográndose así un hito muy importante en el mundo de la fibra de basalto. El ASTM D8448-22 [11], Especificación Estándar de Fibras de Basalto, tiene como objetivo definir las especificaciones necesarias que la fibra de basalto debe tener para asegurar una calidad adecuada. Entre otras cosas, se definen los rangos aceptables en cuanto a la composición química del basalto, la nomenclatura de los productos de fibra de basalto, las propiedades físicas y mecánicas mínimas, etc.

En cuanto a las barras, en EE.UU. existe la especificación ASTM D7957-17 [8] para barras GFRP. Esta especificación no cubre las barras BFRP debido a la falta de un ASTM para la fibra de basalto (equivalente al ASTM D578 para la fibra de vidrio [12]) cuando se desarrolló esta especificación para barras FRP en 2017. Ahora, ya con el ASTM D8448-22 aprobado, el subcomité ASTM D30.10 está terminando de desarrollar un documento ASTM nuevo para barras BFRP y GFRP de propiedades superiores a las especificadas en el ASTM D7957-17. Además de las especificaciones ASTM, ciertos estados de los EE.UU. tienen sus propias certificaciones de materiales, como es el caso de Florida: en la sección 932-3 de la Especificación del Departamento de Transporte de Florida [10] se definen los requisitos mínimos para el uso de las barras BFRP como refuerzo de hormigón en la infraestructura del estado de Florida.

En el marco internacional, el 'International Code Council – Evaluation Service (ICC-ES)' ha publicado dos documentos de certificación: ICC-ES AC454 [9] e ICC-ES AC521 [13]. Ambos hacen referencia a las barras de refuerzo BFRP: el AC454 define las características fisio-mecánicas mínimas de las barras BFRP para su uso como refuerzo estructural en miembros de hormigón armado, mientras que el AC521 es el criterio de aceptación para el uso de barras de refuerzo BFRP como refuerzo no estructural.

### Códigos de diseño

El primer código para el diseño de estructuras reforzadas con armadura FRP se aprobó a principios de septiembre de 2022, marcando un antes y un después en la industria de la construcción. Bajo el nombre 'ACI 440.11-22 - Hormigón estructural reforzado con barras de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP)' [14], el código solo contempla el uso de barras GFRP. Sin embargo, dado que las propiedades mecánicas de las barras BFRP son generalmente superiores a las barras GFRP con vidrio E-CR, muchas instituciones promueven el uso de este documento para el diseño de estructuras de hormigón armado con armadura BFRP.

Para las estructuras de transporte, existe la guía de diseño para estructuras de hormigón armado con barras FRP de AASHTO [15], la cual también está redactada solo para GFRP. Sin embargo, también podría usarse para el refuerzo de BFRP como se indica en el Volumen 4 del Manual de Estructuras del FDOT (2021) [16]. De hecho, este documento permite el uso de BFRP en el estado de Florida al prescribir los mismos criterios de diseño que para GFRP: *"...el diseño de todos los miembros de hormigón que contengan barras de refuerzo de GFRP deberá estar de acuerdo con las especificaciones de la guía de diseño de puentes AASHTO LRFD para hormigón reforzado con GFRP. Para BFRP utilice los mismos criterios de diseño que para GFRP."*

## 4. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

El acero es el material más utilizado como refuerzo interno de estructuras de hormigón. El componente principal en la producción de acero es el mineral de hierro. La minería y fabricación de acero requiere un alto consumo de energía, emitiendo en promedio 1,74 toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de acero producida en EE.UU. Esto hace que la producción de acero sea uno de los principales contribuyentes al calentamiento global [17]. Las fibras de basalto, sin embargo, están hechas únicamente de roca basáltica (sin productos químicos adicionales). El basalto es una roca orgánica inerte que es muy abundante en la tierra. Es reciclable y no combustible, por lo que no genera residuos durante la producción [18]. En comparación con el acero, la energía requerida durante la producción de fibra de basalto es significativamente menor: mientras que se necesitan en promedio 14 kWh/kg para producir acero en un horno eléctrico, la fibra de basalto requiere solo 5 kWh/kg, lo que reduce el consumo de energía en aproximadamente un 65% [18].

En el proceso de fabricación de las barras de refuerzo BFRP, las fibras de basalto se alinean en una matriz de resina termoestable, que suele ser resina de éster de vinilo o epoxi. Incluso si se tiene en cuenta que las barras de refuerzo BFRP están hechas de aproximadamente un 20 % de resina termoestable y un 80 % de fibra de basalto (de la masa total), siguen siendo un refuerzo interno para el hormigón respetuoso con el medio ambiente. Inman et al. [19] realizaron un estudio sobre la evaluación mecánica y ambiental de vigas de hormigón reforzadas con barras BFRP y barras de acero. Los resultados de la evaluación del ciclo de vida mostraron que las vigas reforzadas con barras BFRP obtuvieron significativamente mejor valoración en los dieciocho indicadores ambientales evaluados en el estudio (p. ej., agotamiento del ozono, acidificación y eutrofización), en comparación con las vigas reforzadas con barras de acero. En términos de potencial de calentamiento global, se observó que las emisiones de cambio climático se redujeron en un 62% cuando se usó refuerzo BFRP sobre acero convencional [19]. Esto convierte a BFRP en una solución ecológica para el refuerzo del hormigón.

## 5. BENEFICIOS DEL USO DE BARRAS BFRP PARA LOS CONTRATISTAS

El uso en el refuerzo BFRP brinda múltiples beneficios a los contratistas debido a su peso ligero y resistencia a la corrosión. En esta sección se presentan algunas de las principales ventajas:

- **Transporte:** El costo y el impacto ambiental del transporte de materiales a obra es considerablemente menor para el refuerzo BFRP que para el acero: siendo el peso de las barras corrugadas BFRP una cuarta parte del peso del acero, permite reducir los costos de transporte en aproximadamente un 60%.
- **Manipulación e instalación:** La manipulación e instalación de barras de refuerzo BFRP es más rápida, más eficiente, más económica y, por lo tanto, más sostenible. La ligereza de la armadura BFRP en comparación con el acero permite el uso de maquinaria más liviana en obra (es decir, menos consumo de combustible) y una reducción de personal de trabajo. Además, la manipulación de las barras es más seguro para los trabajadores (menos dolores de espalda y lesiones). Esto equivale a una reducción en las emisiones y el costo. En la obra, las barras de refuerzo se pueden cortar fácilmente con una sierra normal si es necesario, y una vez cortadas, los extremos de las barras no necesitan un tratamiento especial como sería el caso de las barras de refuerzo de acero recubiertas de epoxi.
- **Construcción sostenible:** el uso de armadura no corrosivos permite a los contratistas ofrecer a los clientes estructuras "verdes" y duraderas, lo que agrega un valor significativo al proyecto y evita posibles reclamos por deterioro durante la vida útil.

## 6. USO DE BARRAS BFRP EN LA CONSTRUCCION: PROYECTOS

En Estados Unidos, Florida es uno de los estados que más utiliza el refuerzo de FRP en proyectos de infraestructura debido a los problemas de corrosión en sus extensas zonas costeras. Algunos de los proyectos en este estado incluyen:

- **Puente peatonal en la Universidad de Miami (2016):** este puente de un vano de 70 pies de largo (21,3 m) fue construido en la Universidad de Miami y diseñado para una vida útil de más de 75 años sin costos anticipados de reparación debido a la corrosión. Fue construido completamente con refuerzo anticorrosivo. Se utilizaron barras de BFRP para reforzar el alma y el ala de las vigas doble-T prefabricadas. Otros elementos hormigonados in-situ como bordillos y cabezales de pilotes, también se reforzaron con estribos y barras rectas de BFRP.
- **I-dock en Miami, Florida (2019):** Se utilizó refuerzo de BFRP para reforzar las losas prefabricadas del muelle que se construyó para reemplazar el que resultó dañado por el huracán Irma. No se usó acero en todo el proyecto.
- **Muros de contención del Túnel del Puerto de Miami (2014):** En dos de los muros de contención del Túnel del Puerto de Miami se utilizó refuerzo de BFRP en lugar de acero según propuesta del contratista general, Bouygues Civil Works Florida, debido a su durabilidad y ligereza.



Figura 1. Proyectos de infraestructura en Florida

Las barras BFRP también están ganando mucho protagonismo en edificios. Algunos ejemplos del uso de barras BFRP en edificios son:

- Torre Avocet en Bethesda, Maryland (2022): Esta es una estructura de hotel y oficina de 22 pisos que está coronado por una terraza en la azotea. El edificio cuenta con dos niveles de estacionamiento bajo rasante y cinco sobre rasante. Las losas de acabado fueron reforzadas con barras BFRP.
- Bodega de vinos en Lake Ozark, Missouri (2023): Los cimientos de esta bodega de tres pisos y una superficie construida de 1,100 m<sup>2</sup> fueron completamente reforzados con barras BFRP. Se prevé que la obra se finalice en junio 2023.
- Residencia, tipo casa adosada en Miami, Florida (2021): Esta residencia de dos pisos, tiene una estructura de hormigón, y bloque, donde todos los elementos de hormigón están reforzados con armadura BFRP incluido los cimientos. Además, se adoptaron nuevas tecnologías de fabricación de estribos para la armadura.



**Figura 2.** Uso de armadura BFRP en edificios

## 7. CONCLUSIONES

El uso de la armadura BFRP está en auge y su uso está aumentando exponencialmente debido a sus beneficios en comparación con la armadura de acero tradicional.

- Las barras de refuerzo de BFRP tienen un módulo de elasticidad, una resistencia y una durabilidad ligeramente superiores a las barras FRP hechas de vidrio E-CR.
- En comparación con el acero tradicional de grado 60, las barras BFRP tienen una mayor resistencia a tracción (alrededor de tres veces mayor), tienen un peso menor (alrededor de una cuarta parte del acero), no son corrosivas y son sostenibles. Sin embargo, el módulo de elasticidad es un tercio del del acero.
- Existen especificaciones de materiales y guías de diseño actualizadas para las barras de refuerzo BFRP, lo que hace que su uso sea seguro y eficiente.
- Múltiples proyectos han utilizado BFRP como refuerzo principal o secundario con resultados positivos, incluyendo infraestructura y estructuras de edificios.



1. Ali, A. H., Mohamed, H. M., Benmokrane, B., ElSafty, A., & Chaallal, O. (2019). Durability performance and long-term prediction models of sand-coated basalt FRP bars. *Composites Part B: Engineering*, 157(August 2018), 248–258. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.065>
2. Kampmann, R., Telikapalli, S., Emparanza, A. R., Schmidt, A., & Dulebenets, M. A. (2021). Tensile Properties of Basalt Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars for Reinforcement of Concrete. *ACI Materials Journal*, 118(1). <https://doi.org/10.14359/51729288>
3. Schmidt, A., Telikapalli, S., Ruiz Emparanza, A., Kampmann, R., & De Caso Y Basalo, F. (2019). Basalt FRP Production - Market Analysis and a State-Of-The-Art Report. *FIB Symposium 2019; Innovations in Materials, Design and Structures*. Krakow, Poland.
4. Al-Khafaji, A. F., Haluza, R. T., Benzecry, V., Myers, J. J., Bakis, C. E., & Nanni, A. (2021). Durability Assessment of 15-to 20-Year-Old GFRP Bars Extracted from Bridges in the US. II: GFRP Bar Assessment. *Journal of Composites for Construction*, 25(2), 4021008.
5. Dhand, V., Mittal, G., Rhee, K. Y., Park, S. J., & Hui, D. (2015). A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 73, 166–180. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.011>
6. Mohamed, O. A., Al Hawat, W., & Keshawarz, M. (2021). Durability and Mechanical Properties of Concrete Reinforced with Basalt Fiber-Reinforced Polymer (BFRP) Bars: Towards Sustainable Infrastructure. *Polymers*, 13(9), 1402.
7. Wu, G., Wang, X., Wu, Z., Dong, Z., & Xie, Q. (2015). Degradation of Basalt FRP Bars in Alkaline Environment. *Science and Engineering of Composite Materials*, 22(6), 649–657.
8. ASTM D7957-17 (2017), Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
9. AC454 (2020), “ICC-ES Acceptance Criteria for Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars for Internal Reinforcement of Concrete Members”, AC454, ICC Evaluation Services, Inc., last revision December 2020.
10. Florida Department of Transportation Standard Specifications for Road and Bridge Construction, (January 2021), Standard Specification 932-3.
11. ASTM D8448-22, Standard Specification for Basalt Fiber Strands, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022.
12. ASTM D578 / D578M-18, Standard Specification for Glass Fiber Strands, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
13. AC521 (2020), “Fiber-reinforced Polymer (FRP) Bars and Meshes for Internal Reinforcement of Non-structural Concrete Members”, AC521, ICC Evaluation Services, Inc., last revision April 2021.
14. [14]ACI 440.11-22 (2022), “Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars - Code and Commentary”, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
15. AASHTO (2018), Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete (2nd ed.). American Association of State Highway Officials.
16. Florida Department of Transportation Fiber Reinforced Polymer Guidelines (FRPG) Structures Manual Volume 4, January 2021.
17. Hasanbeigi, A., Arens, M., Cardenas, J. C. R., Price, L., & Triolo, R. (2016). Comparison of carbon dioxide emissions intensity of steel production in China, Germany, Mexico, and the United States. *Resources, Conservation and Recycling*, 113, 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.06.008>
18. De Fazio, P. (2011). Basalt fiber: from earth an ancient material for innovative and modern application. *Energia, Ambiente e Innovazione*, 3, 89–96.
19. Inman, M., Thorhallsson, E. R., & Azrague, K. (2017). A Mechanical and Environmental Assessment and Comparison of Basalt Fibre Reinforced Polymer (BFRP) Rebar and Steel Rebar in Concrete Beams. *Energy Procedia*, 111(March), 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.005>