

# Bonding Between Three-Dimensionally Printed Rebar and Three-Week-Old Conventional Concrete

Marcos Rivera, Civil Engineer<sup>1</sup> , Leonardo López, Civil Engineer<sup>2</sup> , Karla Uclés, M.Sc. <sup>3</sup>, Víctor Martínez, M.Sc. <sup>4</sup>, and Daniel Ramos, M.Sc. <sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Universidad Tecnológica Centroamericana, Honduras, marcosriv@unitec.edu, leonardo.lopez@unitec.edu, karla\_ucles@unitec.edu, victormreyes85@gmail.com, daniel.ramos@unitec.edu.hn

*Abstract - Faced with the need to investigate alternative solutions to the conventional reinforcement solution in reinforced concrete elements, this study analyzed the mechanical bonding capacity of deformed, three-dimensionally printed reinforcing bars. The test used was a test of pull-out of reinforcing bars in three-week-old concrete cylinders. The impression material for the bars was a polylactic acid thermoplastic material (PLA). Although this is a material whose tensile strength is much lower than the typical strengths of conventional steel, the actual study serves as a reference for future studies with printed bars of materials whose strengths compete with those of conventional steel, materials such as PLA printed with continuous carbon fiber (PLA-CCF). In this sense, four bars were evaluated, one with deformation dimensions in accordance with the NMX-B-457-CANACERO-2013 standard and three bars with deformation dimensions outside said standard. The practical results were verified considering a theoretical model of splitting of bars embedded in concrete. It was predicted that bars with deformation dimensions conforming to the NMX-B-457-CANACERO-2013 standard may be capable of transferring their maximum tensile strength to concrete within reasonable development lengths. In this way, a relevant reference model is generated to be developed with bars made of thermoplastic materials with strength greater than that of PLA.*

**Keywords**—Bonding, Pull-out, Development Length, Three-dimensional Printing, Thermoplastic materials

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

# Adherencia Entre Varillas Corrugadas Impresas Tridimensionalmente y Concreto Convencional de 3 Semanas de Edad

Marcos Rivera, Ingeniero Civil<sup>1</sup>, Leonardo López, Ingeniero Civil<sup>2</sup>, Karla Uclés, M.Sc.<sup>3</sup>, Víctor Martínez, M.Sc.<sup>4</sup>, y Daniel Ramos, M.Sc.<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Universidad Tecnológica Centroamericana, Honduras, marcosriv@unitec.edu, leonardo.lopez@unitec.edu, karla\_ucles@unitec.edu, victormreyes85@gmail.com, daniel.ramos@unitec.edu.hn

**Resumen** – Frente a la necesidad de investigar sobre soluciones alternativas a la solución convencional de refuerzo en elementos de concreto reforzado, en este estudio se analizó la capacidad de adherencia mecánica de varillas de refuerzo corrugadas e impresas tridimensionalmente. El ensayo empleado fue un ensayo de extracción de varillas de refuerzo en cilindros de concreto de tres semanas de edad. El material de impresión de las varillas fue un material termoplástico con ácido poli-láctico (PLA). Si bien éste es un material cuya resistencia a la tensión es mucho menor que las resistencias típicas del acero convencional, el estudio en cuestión sirve como referencia para futuros estudios con varillas impresas de materiales cuyas resistencias compiten con las del acero convencional, materiales tales como el termoplástico con ácido poli-láctico mejorado con fibra de carbono continua (PLA-CCF). En ese sentido, se evaluaron cuatro varillas, una con dimensiones de corrugas apegadas a la normativa NMX-B-457-CANACERO-2013 y tres varillas con dimensiones de corrugas fuera de dicha normativa. Los resultados prácticos se verificaron a la luz de un modelo teórico de deslizamiento de varillas embebidas en concreto. Se predijo que las varillas con dimensiones de corrugas apegadas a la normativa mencionada pueden ser capaces de transferir al concreto su máxima resistencia a la tensión dentro de longitudes de desarrollo razonables. Generándose de esta manera un modelo relevante de referencia para desarrollarse con varillas de materiales termoplásticos con resistencias mayores a la del PLA.

**Palabras clave**—Adherencia, Ensayo de Extracción, Longitud de Desarrollo, Impresión Tridimensional, Materiales Termoplásticos

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el empleo de la impresión tridimensional en la industria de la construcción ha conllevado varias ventajas. En múltiples proyectos ha aumentado la versatilidad arquitectónica, ha reducido el impacto ambiental negativo y ha reducido costos de construcción [1].

Algunos de los materiales de impresión tridimensional con características mecánicas de interés para la construcción son los materiales termoplásticos mejorados con fibras de carbono. Estudios [2] demuestran que algunos materiales tales como el termoplástico con ácido poli-láctico mejorado con fibra de carbono continua (PLA-CCF) pueden llegar a desarrollar resistencias últimas a tensión del orden de 250 MPa. En ese

sentido, la investigación del uso en ingeniería estructural de tales materiales cobra especial importancia.

Por otro lado, es sabido e investigado [3] el uso de varillas compuestas de polímeros reforzados con fibras de carbono, como refuerzo a tensión en elementos de concreto. Una de las principales ventajas de este tipo de varillas como sustituto del refuerzo convencional es que tienen una resistencia alta a la corrosión, en comparación con las varillas de acero. En tales materiales, este tipo de ventajas, así como también sus desventajas, sustentan la necesidad de seguir investigando alternativas al refuerzo convencional de elementos de concreto reforzado.

Todas las ideas descritas anteriormente motivan la importancia de estudiar el comportamiento de varillas impresas tridimensionalmente a base de materiales termoplásticos similares al PLA-CCF como sustitutos del refuerzo convencional en elementos de concreto reforzado. Es particularmente relevante el estudio de las propiedades mecánicas de elementos de concreto reforzado con este tipo de varillas. Es por ello por lo que en este estudio se indaga sobre la capacidad que poseen las varillas impresas tridimensionalmente de adherirse al concreto cuando se someten a fuerzas axiales de tensión. Las varillas en cuestión son corrugadas y fabricadas de material termoplástico con ácido poli-láctico (PLA). Dicho material es menos resistente a tensión que el PLA-CCF, sin embargo, el ensayo actual sirve como modelo importante de comparación para ser replicado con varillas fabricadas con PLA-CCF. El ensayo empleado para indagar sobre la adherencia a tensión de las varillas en concreto es un ensayo de extracción para lo cual se utilizan cilindros de concreto de 15 cm x 30 cm, con un 70% de su resistencia máxima a compresión. Tal resistencia reducida se alcanzó a las 3 semanas de ser colados. El colado de los cilindros y las pruebas de compresión realizadas son de acuerdo con [4] y [5] respectivamente. Las dimensiones de las varillas corrugadas se establecieron según [6]. Las varillas se modelaron con el programa SolidWorks y se imprimieron empleando modelado por deposición fundida (Fused Deposition Modeling, FDM), con una impresora tridimensional Original Prusa i3 MK3S+. Se imprimieron 4 tipos de varillas: una con las dimensiones de corrugas definidas según [6], 2 varillas con las dimensiones de corrugas fuera de dicha definición y una varilla lisa. Todas tienen una longitud de 28 cm. El ensayo se realizó tomando algunos criterios indicados en las normativas [7] y [8]. No se

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

podieron tomar todos los criterios especificados en dichas normativas debido a la falta del equipo requerido en tales normativas. En lugar de ello, tal y como se explica en la metodología, se realizaron procedimientos apegados al rigor ingenieril requerido para lograr los objetivos correspondientes. La carga se aplicó de forma estática. Los resultados se comparan con los arrojados por un modelo teórico de deslizamiento de varillas corrugadas en prismas de concreto [9]. El cotejo de resultados teóricos y empíricos permite evidenciar que las varillas impresas tridimensionalmente y con dimensiones de corrugas de acuerdo con [6] pueden llegar a transferir al concreto circundante sus máximas resistencias a la tensión dentro de valores razonables de longitudes de desarrollo. Permitiendo de esta manera generar un modelo relevante de comparación a ser replicado para varillas corrugadas de materiales termoplásticos más resistentes como el PLA-CCF. Sumado a lo anterior se genera un estudio de referencia para la indagación del resto de comportamientos mecánicos de elementos de concreto reforzado con este tipo de varillas y también para investigar el valor de estas soluciones constructivas respecto a las soluciones convencionales. Por todo lo anterior, la principal recomendación de este estudio es replicar el modelo descrito en esta investigación empleando varillas impresas con material PLA-CCF.

## II. METODOLOGÍA

### A. Descripción del experimento

El experimento consistió en la extracción de una varilla corrugada e impresa tridimensionalmente desde un cilindro de concreto, con el objetivo de verificar la adherencia entre los 2 materiales. Los detalles del experimento y sus resultados se muestran a lo largo del documento. En la Fig. 1 se muestra un esquema del experimento realizado. El equipo empleado para el experimento y los laboratorios empleados pertenecen a la Universidad Tecnológica Centroamericana, Campus Tegucigalpa [10].

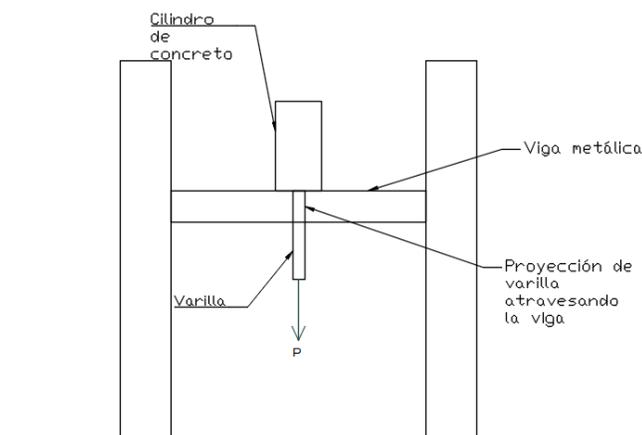


Fig. 1 Representación esquemática del experimento realizado.

### B. Dimensionamiento de Varillas y Modelado en SolidWorks

Se establecieron 4 tipos de varillas a ser ensayadas:

- 1) Varilla con el dimensionamiento de corrugas conforme a [6] (varilla A, 0.64 corrugas/cm). Cantidad de varillas de este tipo: 1.
- 2) Varilla con separaciones entre corrugas mayores a la separación máxima indicada por [6] (varilla B, 0.32 corrugas/cm). Cantidad de varillas de este tipo: 1.
- 3) Varilla con separaciones entre corrugas mayores a la separación máxima indicada por [6] (varilla C, 0.18 corrugas/cm). Cantidad de varillas de este tipo: 1.
- 4) Varilla lisa (varilla D). Cantidad de varillas de este tipo: 1

La altura de las corrugas fue de 0.095 cm. El ancho fue de 0.076 cm. Todas las varillas fueron del mismo diámetro. El diámetro de las varillas (1.27 cm) se seleccionó en base a [7]. Todas las varillas tuvieron una longitud de 28 cm. La selección de la longitud fue de acuerdo con [8]. El dimensionamiento de la varilla A se muestra en la Fig. 2. Las costillas de las varillas tuvieron un ancho y altura de 0.10 cm, según se muestra en la Fig. 3. Las varillas fueron modeladas en el programa SolidWorks.

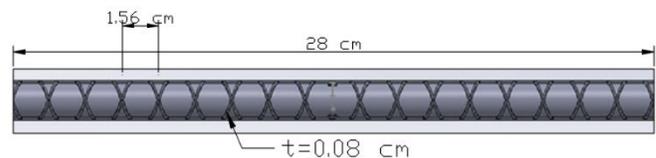


Fig. 2 Varilla A.

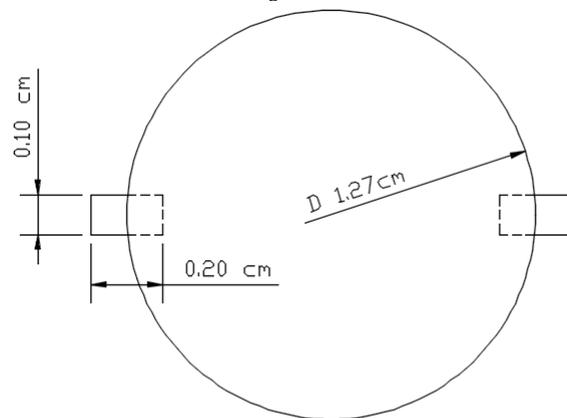


Fig. 3 Dimensiones de costillas de varilla

### C. Impresión tridimensional

Las varillas se imprimieron empleando modelado por deposición fundida con una impresora tridimensional Original Prusa i3 MK3S+. El material de impresión fue a base de filamentos PLA de 0.175 cm, con una resistencia a la tensión axial de  $20.90 \pm 1.95$  MPa [11]. Es importante mencionar que el relleno usado para los modelos de varillas fue de 100% sin

vacíos, con temperatura de impresión de boquilla de 210° C para todas las capas y 60°C de cama para todas las capas. Las temperaturas se configuraron de acuerdo a las requeridas por el tipo de filamento empleado (PLA).

#### D. Cilindros de concreto

Se colaron 4 cilindros de concreto con una resistencia máxima a la compresión de 21 MPa. Los cilindros se desencofraron 3 semanas después de su colado. Se midió su resistencia a la compresión mediante la prueba de compresión de concreto sobre un cilindro adicional. Se verificó que la resistencia del concreto a las 3 semanas de edad fue de un 70% de su resistencia máxima. Las especificaciones de los materiales del concreto, el colado, mezclado y curado de los especímenes fueron de acuerdo con [4]. Las pruebas de compresión realizadas fueron de acuerdo con [5]. La longitud embebida de la varilla dentro del cilindro fue de 10 cm y la longitud que sobresalió del cilindro fue de 18 cm. Se consideró apropiado emplear una longitud embebida de varillas no mayor de 10 cm porque se necesitó reducir el requerimiento de colocar cargas mayores a las disponibles en el laboratorio. Tal requerimiento se reduce al no emplear longitudes de varillas embebidas excesivas. Por otro lado, se consideró apropiada la longitud sobresaliente de 18 cm debido a la necesidad de proporcionar una longitud no embebida suficientemente larga como para poder fijar la carga a la varilla. El esquema de colocación de las varillas dentro de los cilindros se muestra en la Fig. 4.

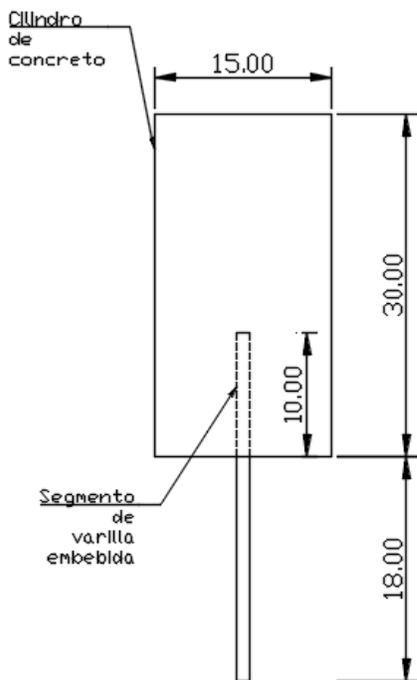


Fig. 4 Esquema de colocación de las varillas dentro de los cilindros (unidades: cm).

#### E. Ensayos de extracción

Los ensayos de extracción sobre cada cilindro se realizaron de la siguiente manera:

1) Cada cilindro se apoyó sobre una viga metálica perforada de manera que la varilla pudiera sobresalir a través de la perforación hacia abajo según se muestra en la Fig. 5.



Fig. 5 Cilindro apoyado sobre viga metálica

2) Para aplicarle la carga directamente a la varilla, se utilizaron lazos de polipropileno con resistencia de carga de 870 N. El tipo de nudo utilizado en los lazos para asegurar las cargas en las varillas fue un enganche rodante [12].

3) Para aplicar la carga a cada varilla, se amarró de ella una cubeta metálica, y en ésta se introdujeron pesas metálicas. Estas fueron colgadas progresivamente, hasta que la varilla fuera extraída del núcleo, el concreto fallara, o la varilla fallara, para los 4 cilindros ensayados. La colocación de la carga sobre la varilla de cada cilindro se muestra en la Fig. 6.



Fig. 6 Carga aplicada sobre la varilla principal

#### F. Modelo teórico de deslizamiento de varillas

Sumado al experimento físico, se empleó un modelo teórico de comparación y verificación de los resultados arrojados por los ensayos de extracción realizados. Se empleó el modelo de deslizamiento de varillas corrugadas en prismas de concreto el cual consiste en la extracción de una varilla corrugada desde un prisma circular de concreto. Bajo este modelo, la longitud de la varilla requerida para transferir la fuerza axial de la varilla al concreto circundante sin provocar la falla a tensión en éste (y el deslizamiento subsecuente)  $l_d$ , es la indicada en (1).

$$l_d = (f_b \cdot d_b) / \{2[(f'_c)^{0.5}] \cdot [(c_b/d_b) - 0.5]\} \quad (1)$$

En la ecuación (1)  $f_b$  es el esfuerzo axial en la varilla,  $d_b$  es el diámetro de la varilla,  $c_b$  es el radio del prisma de concreto y  $f'_c$  es el esfuerzo máximo a compresión del concreto. Los

esfuerzos deben considerarse en unidades de MPa. La sección transversal circular del prisma se muestra en la Fig. 7.

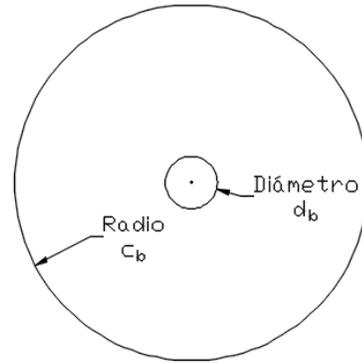


Fig. 7 Sección circular del prisma del modelo de deslizamiento de varillas

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. Preliminar

En este proyecto se estudió la transferencia de fuerzas de adherencia entre concreto y varillas corrugadas impresas tridimensionalmente a base de filamentos termoplásticos PLA, para lo cual se realizaron ensayos de extracción de varillas embebidas en cilindros de concreto, aplicando en todos los ensayos cargas estáticas. Se ensayó una varilla con dimensiones de corrugas acorde con [6] (varilla A). Por otro lado, también se ensayaron 2 varillas con separaciones de corrugas no acordes con [6] (varillas B y C), además de una varilla lisa (varilla D). Sumado a lo anterior, se empleó un modelo teórico de comparación y verificación de los resultados arrojados por los ensayos de extracción. Partiendo de las acciones mencionadas, se obtuvieron unos resultados los cuales son descritos y discutidos a continuación.

#### B. Resultados de los ensayos de extracción

La varilla D se extrajo con una carga de 43 N. Las varillas B y C se extrajeron al colgar de ellas cargas de 450 N y 285 N respectivamente. Es importante mencionar que todas las cargas mencionadas son mucho menores que la carga máxima resistente de la varilla (2650 N). La varilla A soportó una carga máxima de 805 N. Dicha carga fue soportada sin que se extrajera la varilla. Además, ante dicha carga, la varilla no presentó ningún desplazamiento respecto al cilindro. Adicionalmente, se observó que las varillas corrugadas extraídas perdieron sus corrugas y parte del material de dichas varillas, según se muestra en la Fig. 8.



Fig. 8 Varillas extraídas con pérdida de corrugas y parte de su material

### C. *Influencia de las corrugas en la adherencia*

A la luz de los resultados experimentales se observa claramente que, a medida que aumenta el número de corrugas por unidad de longitud, aumenta la capacidad de carga por parte de la varilla, y también la capacidad de transferencia de esfuerzos entre la varilla y el concreto circundante. Se evidencia claramente que, en este caso particular, la varilla con separaciones de corrugas de acuerdo con [6] tiene un desempeño superior respecto a las varillas con separaciones de corrugas no acordes con [6]. Por otro lado, tales resultados empíricos motivan la investigación de las leyes de transferencia de esfuerzos entre las varillas corrugadas y el concreto circundante bajo las situaciones particulares del presente estudio. De igual forma se motiva el estudio de los parámetros que gobiernan tales leyes. De esta manera se podría explicar cuantitativa y detalladamente las razones por las cuales la varilla con separaciones de corrugas acordes con [6] tiene un desempeño superior respecto a aquellas varillas fuera de norma.

### D. *Resultados del modelo teórico y comparación con los resultados experimentales*

Al aplicar el modelo teórico de deslizamiento de varillas mencionado en la metodología al presente caso de estudio se supone que la falla crítica que controla la transferencia de esfuerzos entre ambos materiales es la falla debido al esfuerzo máximo resistente a tensión en el concreto circundante. Esta es la situación esperada para varillas cuyas dimensiones de corrugas es de acuerdo con [6]. Por ende, se supone que la falla de remoción de corrugas no es la falla crítica de control. Los resultados empíricos observados en todas las varillas fabricadas sustentan esta suposición. También se supone conservadoramente que  $c_b$  es igual a  $1.5 d_b$  (esta es la situación típica de diseño que se presenta en las secciones transversales de elementos sometidos a flexión y a flexión-carga axial). En base a las suposiciones anteriores, al emplear el modelo se determina lo siguiente:

- 1) La mínima longitud requerida para evitar la extracción de la varilla sometida a su máxima carga resistente, 2650 N, es del orden de 4.18 cm.
- 2) La carga requerida para extraer la varilla con longitud embebida de 10 cm es del orden de 6330 N. Al ser esta carga mayor que la máxima carga resistente de la varilla, se pronostica la posibilidad de que la varilla con longitud embebida de 10 cm sea capaz de transferir su máxima carga resistente (2650 N) al concreto circundante sin que ocurra la falla debido al esfuerzo máximo resistente a tensión en el concreto.

En consecuencia y, a la luz de estas consideraciones, se sustenta teóricamente el hecho bajo el cual la varilla A (con longitud embebida de 10 cm) soportó la carga de 805 N sin siquiera desplazarse significativamente respecto al cilindro de concreto. Por otro lado, se puede ver que este modelo y este experimento es fuerte candidato para replicarlo con varillas

impresas de PLA-CCF (varillas con resistencias que compiten con las resistencias del acero convencional). De esta manera, se posibilita obtener resultados relevantes que fortalezca el empleo de estas varillas como sustitutos del refuerzo convencional en casos de excepción, tal y como lo es su uso en situaciones de corrosión significativa.

## IV. CONCLUSIONES

- 1) La varilla lisa D y las varillas con separaciones de corrugas no acordes con [6] (B y C) no fueron capaces de adherirse al concreto y fueron extraídas con cargas menores a la máxima resistente de la varilla (2650N). Se puede ver que, dentro de las consecuencias del modo de falla de estas varillas, está la remoción de las corrugas.
- 2) La varilla A (con dimensiones de corrugas de acuerdo con [6]) logró soportar una carga de 805N sin extraerse ni desplazarse del cilindro de concreto. Se observa claramente que la varilla A tuvo un desempeño superior respecto al resto de varillas.
- 3) Al aplicar el modelo de deslizamiento de varillas corrugadas en prismas de concreto, se calcula que la mínima longitud requerida para evitar la extracción de la varilla sometida a su máxima carga resistente (2650N) es de 4.18 cm y que la carga requerida para extraer la varilla con longitud embebida de 10 cm es una carga de 6330 N. No obstante, al ser esta carga mayor que la carga máxima resistente de la varilla, se predice que dicha varilla con longitud embebida de 10 cm puede ser capaz de transferir su máxima carga resistente al concreto circundante. Todos estos resultados numéricos son consistentes con el panorama real presentado en el laboratorio en el cual la varilla A (con longitud embebida de 10 cm) soportó una carga de 805 N sin siquiera desplazarse respecto al cilindro de concreto. Se concluye lo anterior asumiendo que la falla está controlada por la ruptura del concreto circundante a tensión y no por el desprendimiento de las corrugas de la varilla. Esta suposición está sustentada bajo el comportamiento observado experimentalmente en las varillas B y C respecto a la varilla A.
- 4) Partiendo de las afirmaciones anteriores, se concluye que la aplicación de este ensayo a cilindros de concreto con varillas de PLA-CCF (varillas con resistencias que compiten con las resistencias del acero convencional) puede llegar a generar resultados relevantes que apuntalan el uso de este tipo de varillas como sustitutos del refuerzo convencional en situaciones excepcionales tales como ambientes altamente corrosivos.

## V. RECOMENDACIONES

- 1) Replicar el ensayo con varillas de PLA-CCF, las cuales son varillas con resistencias que compiten con las resistencias del acero convencional.
- 2) Complementar la investigación con un estudio que analice las razones por las cuales las varillas extraídas perdieron sus corrugas y parte del material de dichas varillas.

- 3) Correlacionar los resultados empíricos con análisis computacionales empleando métodos de elementos finitos para modelar el comportamiento mecánico de forma explícita.
- 4) Replicar el ensayo procurando el equipo requerido por las normativas. Adicionalmente, emplear el número de especímenes requerido con varillas cuyas dimensiones de corrugas estén dentro de las normativas.
- 5) Realizar el ensayo de tracción sobre las varillas de PLA y PLA-CCF para corroborar la resistencia a tensión del elemento, obteniendo de esta manera la carga máxima por aplicarse al realizar los ensayos con el equipo descrito por las normativas correspondientes.
- 6) Investigar el valor entre ambas soluciones constructivas (varillas de acero y varillas de PLA-CCF) mediante técnicas tales como la ingeniería de valor.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración brindada por Juan Carlos Reyes, Fávell Núñez y Fernanda Cáceres para la realización de esta investigación.

#### REFERENCIAS

- [1] M. Li, X. Zhang, Y. W. D. Tay, G. H. A. Ting, B. Lu, y M. J. Tan, “Chapter 9 - Three-dimensional (3D) printing for building and construction”, en *Digital Manufacturing*, C. D. Patel y C.-H. Chen, Eds., Elsevier, 2022, pp. 345–385. doi: 10.1016/B978-0-323-95062-6.00004-8.
- [2] N. Maqsood y M. Rimašauskas, “Characterization of carbon fiber reinforced PLA composites manufactured by fused deposition modeling”, *Compos. Part C Open Access*, vol. 4, p. 100112, mar. 2021, doi: 10.1016/j.jcomc.2021.100112.
- [3] C. G. Karayannis, P.-M. K. Kosmidou, y C. E. Chalioris, “Reinforced Concrete Beams with Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Bars—Experimental Study”, *Fibers*, vol. 6, núm. 4, Art. núm. 4, dic. 2018, doi: 10.3390/fib6040099.
- [4] ASTM, *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. West Conshohocken, PA: American Society For Testing Materials, 2015.
- [5] ASTM, *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA: American Society For Testing Materials, 2023.
- [6] Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero, *Industria Siderúrgica - Varilla Corrugada de Acero de Baja Aleación para Refuerzo de Concreto - Especificaciones y Métodos de Prueba*. Ciudad de México: Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero, 2013.
- [7] Bureau of Indian Standards, *Methods of Testing Bond in Reinforced Concrete*. New Delhi: Bureau of Indian Standards, 2007.
- [8] ASTM, *Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel*. West Conshohocken, PA: American Society For Testing Materials, 1991.
- [9] J. Wight, *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2015.
- [10] UNITEC, “Universidad Tecnológica Centroamericana”. [En línea]. Disponible en: <https://www.unitec.edu/>
- [11] Overture, “Overture 3D Printing Filament”. [En línea]. Disponible en: <https://overture3d.com/products/overture-matte-pla>
- [12] NetKnots, “NetKnots, The Most Trusted Knots On The Net”. [En línea]. Disponible en: [www.netknots.com](http://www.netknots.com)