



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE GRADUACIÓN I

**ADHERENCIA DE VARILLAS IMPRESAS EN 3D DE FILAMENTO DE FIBRA DE CARBONO
AL CONCRETO DE BAJA RESISTENCIA**

PRESENTADO POR:

11941174 MARCOS DAVID RIVERA LOZANO

11911330 LEONARDO LÓPEZ MORENO

ASESOR TEMÁTICO: MSC. ING. VÍCTOR ALONZO MARTÍNEZ REYES

ASESOR TEMÁTICO: MSC. ING. EDUARDO FAVELL NÚÑEZ RODRÍGUEZ

ASESORA METODOLÓGICA: MSC. ING. KARLA ANTONIA UCLÉS BREVÉ

CAMPUS TEGUCIGALPA; ENERO, 2024.

DEDICATORIA

Le dedicamos el resultado de este trabajo a nuestras familias. Principalmente, a nuestros padres que nos apoyaron durante el proceso y han provisto todo lo que hemos necesitado a lo largo de nuestras carreras universitaria.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestra más sincera gratitud a todos aquellos que han formado parte de este proceso para realizar nuestro proyecto de graduación, especialmente destacando a los siguientes:

Le damos gracias a Dios porque nos ha ayudado y abierto puertas durante todo el proceso de la investigación, y nunca nos dejó a un lado. Quiero agradecer a mis hermanos que me han apoyado siempre escuchando lo que tengo que decirles y han sido parte del proceso de resolución de problemas con nosotros. También quiero agradecerle el apoyo en este trabajo a mis amigos, que han estado presentes con cada queja y desvelo ayudándome a levantarme cada día y afrontar los problemas de cara. Especialmente a mi amiga Sharon Reyes, que ha estado siempre durante el proceso conmigo y me ha dado nuevas maneras de ver las dificultades cuando se presentaron.

También agradecemos a los maestros de la carrera de Ingeniería Civil e Ingeniería Mecatrónica que han estado presentes para ayudarnos a culminar el proceso de la manera correcta, que han prestado de su tiempo para despejar dudas, nos han instruido en el camino correcto, y nos han apoyado cada día para ser mejores ingenieros en el futuro.

EPÍGRAFE

Porque hay abundancia, hay escasez; porque hay escasez, hay abundancia, pero una y otra pasan.

-Un Viaje a la India, Editorial Tres Editores

RESUMEN EJECUTIVO

El proyecto de investigación se ha realizado con el propósito de profundizar la investigación de alternativas para el refuerzo de elementos estructurales como las vigas y las columnas, por lo que como objetivo principal se ha definido hacer uso de la impresión 3D como herramienta para fabricar el prototipo del refuerzo con fibra de carbono, para lo que se han realizado 4 diseños diferentes, de varilla lisa; con corrugas a lo largo de toda la extensión; con la mitad de la cantidad de corrugas, y con un cuarto de corrugas.

Luego de concluir el diseño con el programa de SolidWorks, las varillas han sido impresas con ayuda del FABLAB de UNITEC. Al concluir la impresión, se han preparado 4 núcleos de concreto de forma cilíndrica que sirvieran para ensayar las varillas en una prueba de grado de adherencia. Para realizar el ensayo, se han utilizado las normas ASTM C234-91 "método de prueba estándar para comparar concreto para la adherencia desarrollada con el acero de refuerzo" y IS: 2770 (Part I) – 1967 (Reaffirmed 2007) "método de prueba estándar en concreto reforzado: ensayo de extracción".

Luego de ensayar varillas lisas y con 0.64, 0.32, y 0.18 corrugas/cm, se ha descubierto que la carga máxima aplicable es de 3, 27, 44 y 80 kg respectivamente, donde todas las varillas fueron extraídas de sus núcleos de concreto exceptuando la varilla con 0.64 corrugas/cm, para esta se recomienda repetir el procedimiento conforme a las indicaciones en el Capítulo VII: Recomendaciones. Con estos datos se ha podido verificar adherencia del filamento de fibra de carbono al concreto para corrugas distribuidas como mínimo en 0.64 corrugas/cm. Las varillas extraídas han presentado una pérdida en su integridad estructural en las partes que entraron en contacto directo con el concreto durante el proceso de fraguado.

Palabras clave: adherencia, concreto reforzado, corrugas, filamento de fibra de carbono, impresión 3D.

ABSTRACT

The research project has been carried out with the purpose of deepening the investigation of alternatives for the reinforcement of structural elements such as beams and columns, so the main objective has been defined to use 3D printing as a tool to manufacture the prototype. of the carbon fiber reinforcement, for which 4 different designs have been made, with smooth rods; with deformations along the entire length; with half the number of deformations, and with a quarter of deformations.

After concluding the design with the SolidWorks program, the rods have been printed with the help of UNITEC's FABLAB. At the end of the printing, 4 cylindrical concrete cores were prepared to test the rods in an adhesion "Pull-out" test. To carry out the test, ASTM C234-91 "Standard test method for comparing concrete for bond developed with reinforcing steel" and IS: 2770 (Part I) – 1967 (Reaffirmed 2007) "Standard in reinforced concrete: Pull-out test."

After testing smooth rods with 0.64, 0.32, and 0.18 deformations/cm, it has been discovered that the maximum applicable load is 3, 27, 44 and 80 kg respectively, where all the rods were extracted from their concrete cores except the rod with 0.64 deformations/cm, for this rod it is recommended to repeat the procedure according to the indications in Chapter VII: Recommendations. With this data, it has been possible to verify adhesion of the carbon fiber filament to the concrete for rods distributed with at least 0.64 deformations/cm. The extracted rods have shown a loss in their structural integrity in the section that came into direct contact with the concrete during the setting process.

Keywords: bond, reinforced concrete, deformations, carbon fiber filament, 3D printing.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	Introducción.....	10
II.	Planteamiento del Problema.....	11
2.1	Precedentes del Problema	11
2.2	Definición del Problema.....	12
2.3	Justificación.....	12
2.4	Preguntas de Investigación.....	13
2.5	Objetivos	13
2.5.1	Objetivos Generales.....	13
2.5.2	Objetivos Específicos.....	13
III.	Marco teórico.....	15
3.1	Fibra de carbono.....	15
3.2	Tipos de refuerzo para estructuras de concreto.....	16
3.2.1	Refuerzo de acero	17
3.2.2	Refuerzo de fibra de carbono.....	19
3.3	Impresión 3D.....	21
3.3.1	Impresión 3D para refuerzo con fibra de carbono	21
3.4	Adherencia del refuerzo al concreto	25
3.4.1	Adherencia del acero de refuerzo al concreto	25
3.4.2	Adherencia de la fibra de carbono al concreto.....	28
3.4.3	Ensayos para medir la adherencia al concreto	29
IV.	Metodología.....	31
4.1	Enfoque	31

4.2	Variables de investigación.....	31
4.3	Técnicas e instrumentos aplicados	33
4.4	Materiales y equipo	35
4.5	Metodología de estudio.....	36
4.5.1	Fuentes secundarias de investigación	37
4.5.2	Fuentes primarias de investigación	38
4.5.3	Diseño de varilla.....	39
4.5.4	Impresión de varilla	41
4.5.5	Núcleos de concreto	43
4.5.6	Prueba ensayo de adherencia.....	47
4.5.7	Flujograma de la metodología	52
V.	Resultados y análisis	53
5.1	Resultados de la adherencia al concreto de varillas lisas de fibra de carbono.....	53
5.2	Resultados de la adherencia al concreto de varillas corrugadas de fibra de carbono....	53
5.3	Comparación de la adherencia al concreto entre varillas de fibra de carbono lisas y corrugadas	54
VI.	Conclusiones	55
VII.	Recomendaciones.....	57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1	- Laboratorio de ingeniería civil UNITEC	10
Ilustración 6	- Acero de Refuerzo en Vigas.....	18
Ilustración 7	- Recubrimiento contra corrosión.....	19
Ilustración 8	- Refuerzo de Fibra de Carbono	19

Ilustración 9 - Refuerzo de Fibra de Carbono Externo.....	20
Ilustración 13 - Redes de octetos de polímero.....	22
Ilustración 14 - Comparación de curvas de carga vs deflexión al centro del tramo de vigas ensayadas.....	23
Ilustración 15 - Ejemplo de polímero reforzado con fibra de carbono.....	24
Ilustración 16 - Agrietamiento del concreto y aparición de primeras micro fisuras radiales, con pequeños deslizamientos entre superficies: límite de adherencia perfecta.....	26
Ilustración 17 - Aparición de grietas de cortante y propagación de fisuras radiales; transición de pequeños deslizamientos a grandes deslizamientos; degradación de la interacción mecánica por bloqueo entre concreto y nervaduras de acero (en caso de existir).	26
Ilustración 18 - Coalescencia de grietas de cortante y redireccionamiento hacia una macrogrieta, con grandes desplazamientos de la barrera de acero. La resistencia postpico es proporcionada por la fricción entre superficies de contacto.	26
Ilustración 19 - Resultados promedio de adherencia para CFRP	29
Ilustración 20 - Variables de investigación para adherencia de varillas corrugadas.....	32
Ilustración 21 - Variables de investigación para el deslizamiento en varillas corrugadas y lisa	32
Ilustración 22 - Filamento de fibra de carbono Overture.....	35
Ilustración 23 - Impresora 3D Original Prusa i3 MK3S+	36
Ilustración 24 - Proceso de diseño de varilla a impresión 3D.....	39
Ilustración 25 - Dimensión de costillas de varilla en modelo SolidWorks.....	39
Ilustración 26 - Dimensión de corruga con respecto al centro de la cara lateral de varilla en modelo SolidWorks.....	40
Ilustración 27 – Cara superior de varilla de 28 cm con 9.75 revoluciones en el espiral guía de corrugas en modelo SolidWorks.....	40
Ilustración 28 - Cara frontal de pieza superior para varilla en modelo SolidWorks.....	41

Ilustración 29 - Proceso de impresión de varilla.....	41
Ilustración 30 - Varilla de fibra de carbono impresa con todas las corrugas.....	42
Ilustración 31 - Impresión de varilla de fibra de carbono.	42
Ilustración 32 - Proceso de elaboración de núcleos de concreto	43
Ilustración 33 - Proceso de ensayo de adherencia.....	48
Ilustración 34 - Perforación de viga de apoyo.....	48
Ilustración 35 - Perforación de viga de apoyo con broca de 5/8"	49
Ilustración 36 - Lectura de carga compresiva aplicada a cilindro de concreto	49
Ilustración 37 - Enganche rodante	50
Ilustración 38 - Sistema para prueba de adherencia.....	51
Ilustración 39 - Sistema para prueba de adherencia con varilla lisa	51
Ilustración 40 - Varilla con mitad de corrugas cargada.....	52
Ilustración 41 - Secuencia de ensayo de extracción de varilla.....	52
Ilustración 42 - Varillas extraídas del ensayo de adherencia con pérdida de corrugas y parte de su estructura	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Requisitos de Corrugas	34
Tabla 2 - Resultados de carga máxima aplicada para ensayo de adherencia	53
Tabla 3 - Resultados comparativos entre varillas corrugadas y lisas.	54

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 - Acta #1 de asesoramiento técnico	65
--	----

Anexo 2 - Acta #2 de asesoramiento técnico	66
Anexo 3 - Acta #3 de asesoramiento técnico	67
Anexo 4 - Acta #4 de asesoramiento técnico	68
Anexo 5 - Acta #5 de asesoramiento técnico	69
Anexo 6 - Acta #6 de asesoramiento técnico	70
Anexo 7 - Acta #7 de asesoramiento técnico	71
Anexo 8 - Acta #8 de asesoramiento técnico	72
Anexo 9 - Acta #9 de asesoramiento técnico	73
Anexo 10 - Acta #10 de asesoramiento técnico	74

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

3D	Tres dimensiones
ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
AISC	American Institute of Steel Construction
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFRP	Polímero Reforzado con Fibra de Carbono
CHOC	Código Hondureño de la Construcción
FABLAB	Fabrication Lab
FRP	Polímero Reforzado con Fibra
KG	Kilogramo
MR	Módulo de Rotura
NASA	The National Aeronautics and Space Administration
NRMCA	National Ready Mixed Concrete Association
PLA	Ácido Polilactico
PSI	Libras por pulgada cuadrada
UNITEC	Universidad Tecnológica Centro Americana

GLOSARIO

Adherencia: “El fenómeno de interacción física que se produce entre la masa de concreto y las barras cilíndricas de acero que se ahogan dentro del elemento estructural” (Dominguez, 2013).

Corrugado: “Es una lámina de acero conformada por barras con relieves, que permiten una alta adherencia al concreto” (ENKONTROL, 2019).

Compresión: “Someter a un cuerpo a la acción de dos fuerzas opuestas para que disminuya su volumen” (Perez & Merino, 2021).

Durabilidad: “La durabilidad es la capacidad que tienen las estructuras de concreto reforzado de conservar inalteradas sus condiciones físicas y químicas durante su vida útil cuando se ven sometidas a la degradación de su material por diferentes efectos de cargas y sollicitaciones” (Muñoz & Mendoza, 2012).

Fibra de carbono: “Es una fibra sintética que se compone de finos filamentos, entre 5 y 10 micrómetros de diámetro. Los filamentos de este material son delgados y están compuestos por átomos de carbono unidos entre sí” (Vestalia , 2023).

Flexión: “Tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal” (Mengual & Martinez, 2016).

Integridad: “Capacidad del activo para cumplir con la función para la cual fue diseñado en condiciones seguras, eficientes y rentables” (Universidad de Piura, 2023).

Resistencia: “Capacidad para resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas sin romperse, adquirir deformaciones permanentes o deteriorarse de algún modo” (PRODEL, 2022).

Sostenibilidad: “La sostenibilidad es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones” (Acciona, 2020).

I. INTRODUCCIÓN

La impresión 3D ha sido utilizado en diferentes rubros desde su concepción. Implantes médicos, partes de mecanismos en dispositivos mecánicos, y hasta algunas secciones de automóviles, han sido fabricadas con ayuda de la impresión 3D (NASA , 2020).

El proyecto de investigación fue realizado en la Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), sede de Tegucigalpa, en el laboratorio de Ingeniería Civil de UNITEC, el FABLAB de UNITEC, y el laboratorio de Ingeniería Mecatrónica en UNITEC, donde se desarrollaron los ensayos y actividades necesarias para cumplir con los objetivos.

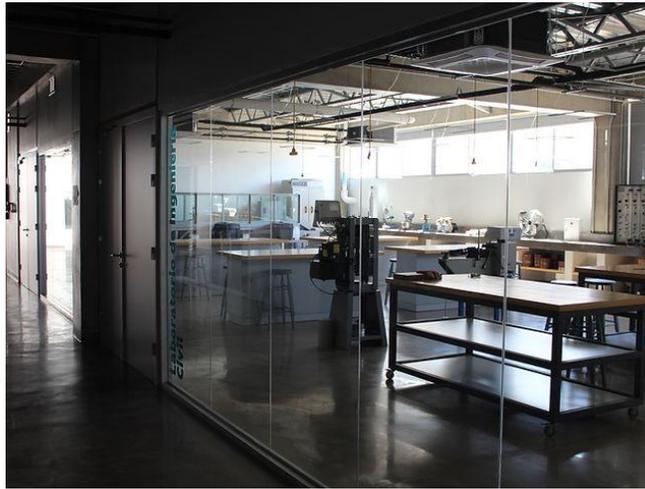


Ilustración 1 - Laboratorio de ingeniería civil UNITEC

Fuente: (Calona, 2023)

Los objetivos en los cuales se enfocará la investigación son el modelado de varillas lisas y corrugadas por medio del programa SolidWorks, la impresión de ellas, y el ensayo de su adherencia, usando parámetros descritos en las normas IS 2770 (reaffirmed 2007) y ASTM C234-91. Los resultados del ensayo de adherencia serán obtenidos con el propósito de expandir los conocimientos acerca del comportamiento de refuerzo compuesto de filamento de fibra de carbono y el concreto, para tener una base en el futuro donde trabajar con respecto al refuerzo impreso a 3D.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El sector de la construcción permanece en continuo crecimiento debido a la demanda de vivienda y edificios para oficinas, entre otros. La producción de materiales de construcción como el cemento, grava, arena, y acero es necesaria para la construcción convencional de vigas, sin embargo, a partir de la concientización acerca de la huella de carbono en el medioambiente, es necesario que se busquen alternativas que disminuyan el uso de materiales convencionales y promueva un futuro sostenible para el sector construcción.

2.1 PRECEDENTES DEL PROBLEMA

El uso de elementos estructurales fabricados mediante impresión 3D ha revolucionado la investigación en diversos campos. En la Ingeniería Aeroespacial, la NASA ha liderado la vanguardia al imprimir componentes ligeros y resistentes para cohetes y satélites. Además, la fabricación aditiva ha permitido la creación de estructuras complejas y optimizadas, lo que puede mejorar significativamente la eficiencia y reducir el peso de las aeronaves (NASA , 2020).

En el ámbito de la arquitectura y la construcción, la impresión 3D ha abierto nuevas perspectivas para la creación de edificios. Proyectos de investigación han demostrado la viabilidad de imprimir muros, columnas y otros elementos estructurales, lo que podría acelerar la construcción y reducir los costos en la industria de la construcción. Además, la capacidad de personalizar diseños arquitectónicos a través de la impresión 3D brinda oportunidades únicas para la investigación en la optimización de estructuras y la sostenibilidad en la construcción. (Cuaresma, 2023)

En conjunto, estos antecedentes demuestran que la impresión 3D de elementos estructurales se ha convertido en una herramienta poderosa para la investigación en una amplia gama de campos,

brindando la flexibilidad y la eficiencia necesarias para abordar desafíos científicos y tecnológicos en constante evolución.

2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El problema de investigación se enfoca en la falta de alternativas para refuerzo de elementos estructurales como son las vigas y columnas. Una alternativa es la varilla de fibra de carbono, fabricada mediante la impresión 3D, para lo cual es necesario el enfoque en la evaluación de la idoneidad y viabilidad de esta tecnología en campo, ya que la impresión 3D se ha convertido en una técnica cada vez más popular en diversos rubros, por lo que es necesario determinar cómo esta metodología puede aprovecharse para la construcción de estructuras de concreto armado. Este desafío radica en comprender la integridad estructural y la durabilidad de los elementos impresos en 3D, en comparación con los materiales de refuerzo tradicionales, que requieren procesos constructivos que aligeran el peso de los elementos estructurales y proporcionan similares características mecánicas. (Iribar, 2023)

2.3 JUSTIFICACIÓN

Explorar la eficiencia, impacto ambiental y seguridad estructural de la impresión 3D de fibra de carbono como refuerzo estructural de vigas, con el propósito de aprovechar el potencial de esta tecnología para personalizar diseños, reducir costos y residuos, así como adoptar nueva tecnología en el ámbito de la construcción. Para realizarlo, se requiere llevar a cabo una investigación bibliográfica y trabajo de laboratorio que permita demostrar las características físicas del modelo 3D, de manera que este logre aportar resistencia a la flexión a un espécimen de viga ensayado.

2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Cómo debe realizarse el modelo de una varilla compuesta de filamento de fibra de carbono y que programa puede ser utilizado?
2. ¿Con qué equipo debe realizarse la impresión de las varillas a usar en el ensayo, y qué corrugado se requiere para él?
3. ¿Cuál es la carga máxima que puede soportar la unión de las varillas al concreto antes de sufrir falla o deslizamiento, y cuál es el deslizamiento registrado?
4. ¿Cómo se comparan los resultados del ensayo de adherencia de varillas compuestas de filamento de fibra de carbono con los resultados de ensayos de adherencia realizados con varillas de acero?

2.5 OBJETIVOS

El uso de la tecnología de impresión 3D ha ganado prominencia como una herramienta con un potencial bastante grande para revolucionar la Ingeniería Civil. Este proyecto de investigación se enfoca en un aspecto poco explorado de esta tecnología nueva: el empleo de filamento de fibra de carbono impreso en 3D para reforzar varillas de acero en vigas. Este enfoque busca explorar nuevas posibilidades para aumentar la eficacia estructural, reducir costos y aumentar la eficiencia de los elementos estructurales.

2.5.1 OBJETIVOS GENERALES

Evaluar la adherencia al concreto de la fibra de carbono impresa en 3D, por medio de investigación bibliográfica, diseño y modelación de varilla #4 con el uso de los laboratorios de Mecatrónica e Ingeniería Civil de UNITEC, con el uso de los conocimientos adquiridos en las clases de Estructuras de Concreto I y II, laboratorio de Concreto I y Diseño Estructural.

2.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Modelar varillas lisas de fibra de carbono a impresión 3D, con el uso del programa SolidWorks.
2. Imprimir varillas de fibra de carbono en 3D, incorporando diferentes tipos de corrugado, con el uso de laboratorio FABLAB.

3. Evaluar la adherencia al concreto de varillas lisas y corrugadas de fibra de carbono impresas en 3D mediante la realización de pruebas experimentales hasta determinar la carga máxima que puede soportar la unión de las varillas al concreto.
4. Realizar una comparación de la adherencia entre varillas de fibra de carbono modeladas en 3D lisas y corrugadas.

III. MARCO TEÓRICO

Para lograr utilizar la impresión 3D en la fabricación de refuerzos para vigas de concreto, es necesario comprender los conceptos que se emplean en el diseño de elementos 3D, el uso de la impresora 3D como herramienta, el diseño de varillas corrugadas y de las vigas.

3.1 FIBRA DE CARBONO

Dentro de la ingeniería civil se encuentran una amplia variedad de materiales que se pueden utilizar para fines constructivos. Con el paso del tiempo, la aplicación y el uso de materiales nuevos ha ido incrementando ya que se han buscado maneras innovadoras de cumplir con los requisitos estructurales de diferentes obras (Universidad de Ingeniería y Tecnología , 2023).

Uno de los materiales que se ha implementado de manera más común es la fibra de carbono. La fibra de carbono es un compuesto con propiedades físicas y químicas que resultan en la alta resistencia mecánica y bajo peso que lo vuelven excepcional para aplicar en diferentes sectores de la Ingeniería Civil (Carboneum, 2019).

La combinación de resistencia y ligereza es uno de los factores más importantes y destacables que tiene la fibra de carbono. La rigidez y dureza del material le permite soportar cargas de gran magnitud, lo cual permite hacer uso de elementos estructurales con bajo peso, pero alta resistencia, optimizando así los recursos. Los elementos mantienen su tamaño y resistencia, conservando sus propiedades mecánicas aún bajo esfuerzos y cargas considerables (Castro Composites , 2022).

Otra propiedad destacada de la fibra de carbono es su resistencia a la corrosión, a diferencia de materiales convencionales como el acero. Esta resistencia la hace duradera y

adecuada para aplicaciones donde la exposición a ambientes corrosivos es una consideración importante. Además, su baja expansión térmica y buenas propiedades de conductividad térmica y eléctrica amplían su utilidad en una variedad de contextos (Castro Composites , 2022).

La flexibilidad natural de la fibra de carbono le permite adaptarse a una variedad de formas y superficies, lo que facilita su uso en una variedad de diseños y aplicaciones. Su resistencia a la fatiga es de gran importancia en estructuras sometidas a cargas dinámicas y asegura una larga vida útil incluso en condiciones severas (Castro Composites , 2022).

Incorporando paneles de fibra de carbono en vigas y columnas, se aumenta enormemente la repulsión y la durabilidad. Este método de refuerzo se utiliza a menudo en puentes y edificios y puede prolongar la vida útil de las estructuras sin requerir modificaciones importantes (Euclid Chemical Toxement, 2023).

En la construcción de nuevas infraestructuras, la fibra de carbono se utiliza como principal material estructural de elementos como barras y láminas. Su peso ligero y su alta durabilidad lo convierten en una opción ideal para reducir el peso total de las estructuras. Esto es muy importante en proyectos donde la carga máxima permitida es un factor importante (FixSupply, 2021).

3.2 TIPOS DE REFUERZO PARA ESTRUCTURAS DE CONCRETO

El refuerzo más utilizado en las estructuras de concreto es el acero. El acero es un componente esencial para garantizar el buen funcionamiento y la seguridad de una estructura. El acero de refuerzo se complementa de manera excelente con el concreto ya que aborda las limitaciones que tiene el concreto como lo son las fuerzas de tensión. El concreto funciona de

manera excepcional cuando se ve sometido a fuerzas de compresión, pero es débil en tensión donde las fibras del elemento se alargan y el acero tiene propiedades que contrarrestan esta debilidad del concreto. Si bien es cierto que su principal función es soportar los esfuerzos a tensión, el acero también aumenta la resistencia y durabilidad de los elementos. (Ingetek, 2023, p. 1)

3.2.1 REFUERZO DE ACERO

El refuerzo de acero en una estructura de concreto es una práctica común en Ingeniería Civil que consiste en incorporar barras o mallas de acero en el concreto para mejorar su capacidad de resistir cargas de tracción y mejorar su comportamiento estructural en general. El acero de refuerzo es vital ya que, sin su implementación, el concreto no sería capaz de soportar todas las cargas que se le están aplicando debido a su comportamiento mecánico (Jimenez, 2005).

La ubicación del refuerzo es un aspecto vital ya que se coloca estratégicamente en la estructura de concreto. Por lo general, se coloca en las zonas donde se espera que ocurran tensiones, como vigas, columnas, losas y cimientos. También se utiliza en juntas de construcción y juntas de dilatación para evitar el agrietamiento. (Jimenez, 2005)

El diámetro y el espaciamiento de las barras de acero se determinan en función de las cargas que la estructura debe soportar y las normativas aplicables. Barras más gruesas y un espaciamiento más estrecho proporcionan una mayor resistencia a la tracción (Jimenez, 2005).

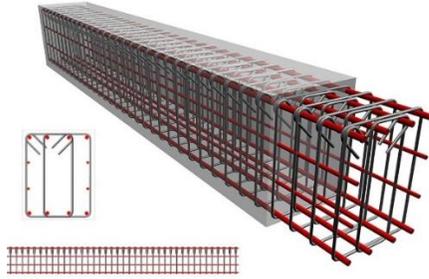


Ilustración 2 - Acero de Refuerzo en Vigas

Fuente: (Saavedra C. , 2016)

En las zonas donde se requieren longitudes de barras de acero mayores que las barras disponibles en el mercado, se utilizan empalmes o conexiones para unir las barras de forma segura. Estos empalmes deben cumplir con las normativas y códigos de construcción para garantizar la resistencia adecuada (DeAcero, 2020).

El acero de refuerzo debe estar protegido contra la corrosión, ya que la corrosión puede debilitar el refuerzo y afectar la integridad de la estructura. Esto se logra mediante la cobertura adecuada de concreto y la aplicación de recubrimientos protectores. Durante el proceso de construcción, se lleva a cabo una supervisión y control de calidad rigurosos para asegurar que el refuerzo de acero se coloca de manera adecuada y cumple con las especificaciones de diseño y las normativas aplicables (DeAcero, 2020).



Ilustración 3 - Recubrimiento contra corrosión

Fuente: (AceroMundo, 2022)

3.2.2 REFUERZO DE FIBRA DE CARBONO

El refuerzo de fibra de carbono, a menudo conocido como CFRP (refuerzo de polímero reforzado con fibra de carbono), es un material compuesto utilizado en la Ingeniería Civil para fortalecer y mejorar la resistencia de las estructuras existentes o nuevas (Sanchez, 2019). El refuerzo de fibra de carbono consiste en láminas o tejidos de fibras de carbono combinadas con resina epoxica u otros elementos. Las fibras de carbono son extremadamente ligeras y fuertes, lo que las hace ideales para reforzar estructuras (Sanchez, 2019).



Ilustración 4 - Refuerzo de Fibra de Carbono

Fuente: (Itecvál, 2020)

Las fibras de carbono son considerablemente más fuertes que el acero y tienen una alta resistencia a la tracción. El refuerzo de fibra de carbono es notablemente ligero en comparación con otros materiales de refuerzo, lo que facilita su aplicación sin aumentar significativamente la carga estructural. Tiene la propiedad de ser resistente a la corrosión y al deterioro químico, lo que lo hace adecuado para una variedad de entornos. La fibra de carbono es flexible y se adapta a diversas formas y geometrías, lo que facilita su aplicación en estructuras con formas complejas (Sanchez, 2019).

El uso de fibra de carbono para fortalecer estructuras en Ingeniería Civil representa un avance importante que cambiará la forma en que se abordan los desafíos de resistencia y durabilidad. Este material compuesto se utiliza mediante una variedad de técnicas para mejorar la integridad estructural de las edificaciones. Una aplicación común es el refuerzo de elementos de hormigón, donde se unen paneles o tiras de fibra de carbono a superficies críticas para proporcionar una capa adicional de resistencia. (Moncayo, 2016, pág. 5)



Ilustración 5 - Refuerzo de Fibra de Carbono Externo

Fuente: (ANCLAF, 2017)

3.3 IMPRESIÓN 3D

Se conoce como impresión 3D al conjunto de procesos que logran producir objetos a través de la adición de material en capas que corresponden a las sucesivas secciones transversales de un modelo 3D. Para lograr hacer uso de impresora 3D, la mayoría usa filamentos compuestos de plásticos y aleaciones de metal, aunque con el tiempo se han desarrollado impresoras que pueden hacer uso de mezclas para concreto (AutoDesk, 2023).

Actualmente en el sector de la construcción, se utiliza esta tecnología principalmente haciendo uso de mezclas de concreto, geo polímeros, fibra y arena. Gran parte de la facilidad que la tecnología presenta para su uso está en su diseño. Hoy en día los ingenieros ya están familiarizados al uso de programas para trabajar en el sector, lo cual lleva a una integración con tecnología de impresión 3D menos complicada. Con programas como SolidWorks o Fusion360, se crea un modelo y luego se alimenta a la impresora 3D con las especificaciones de impresión del modelo, para que la maquina comience a sobreponer los niveles de material de acuerdo a las indicaciones. (Iribar, 2023)

3.3.1 IMPRESIÓN 3D PARA REFUERZO CON FIBRA DE CARBONO

La impresión 3D se ha implementado para el refuerzo de elementos estructurales de diversas maneras. En la universidad de Berkley, un estudio liderado por el profesor asociado de Ingeniería Mecánica Hayden Taylor, desarrollo un refuerzo de concreto compuesto por una estructura octogonal fabricada con un polímero que fue fundido con concreto de alta resistencia (hormigón cuatro veces más resistente a compresión que el concreto convencional). Se utilizaron dos polímeros diferentes: ácido polilactico (PLA), un polímero fácil de producir, pero relativamente frágil, y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), un polímero más resistente y utilizado en diversos rubros como cascos de motocicletas y paragolpes de automóviles. El estudio encontró que no

hubo diferencia significativa en el cambio de material al momento de ensayar resistencia a la compresión. Todas las muestras tuvieron un buen desempeño en ensayos de densidad de energía de deformación (absorción de energía), y de flexión. (Berkeley Engineer magazine, 2021)

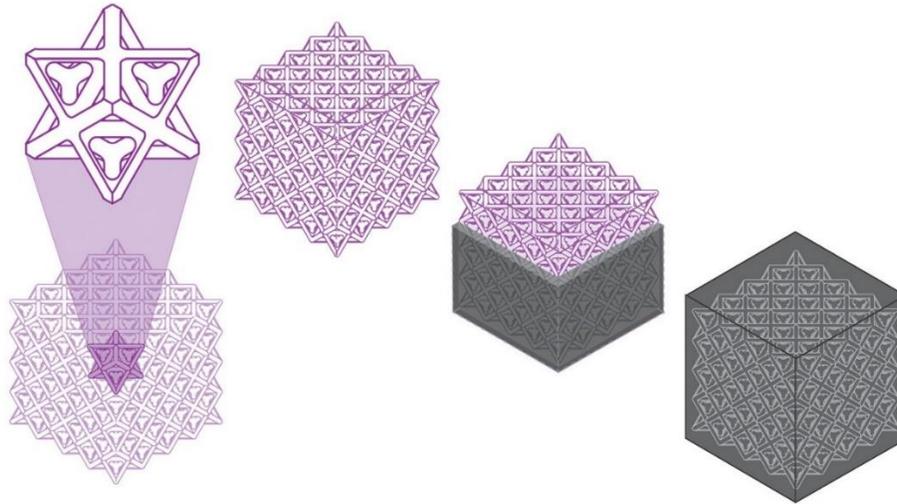


Ilustración 6 - Redes de octetos de polímero.

Fuente: (Berkeley Engineer magazine, 2021)

Ingenieros de la Universidad Democritus de Thrace, Grecia investigaron el uso de refuerzo de varillas compuestas por un polímero reforzado con fibra de carbono (FRP) como alternativa al acero tradicional. La investigación ensayo siete vigas de concreto reforzado con varillas de carbono-FRP bajo carga estática creciente. (Chris G. Karayannis, 2018)

Visualizando las curvas de deflexión, se puede ver que cada vez que una grieta aparecía en el elemento reforzado con el C-FRP, el espécimen experimentaba una caída súbita en la carga. Luego del agrietamiento, puede ser que solo parte de la sección transversal del concreto que está sometida a compresión está haciendo efecto, mientras que la contribución del refuerzo a tensión C-FRP es demasiado baja debido a su módulo de elasticidad (Chris G. Karayannis, 2018).

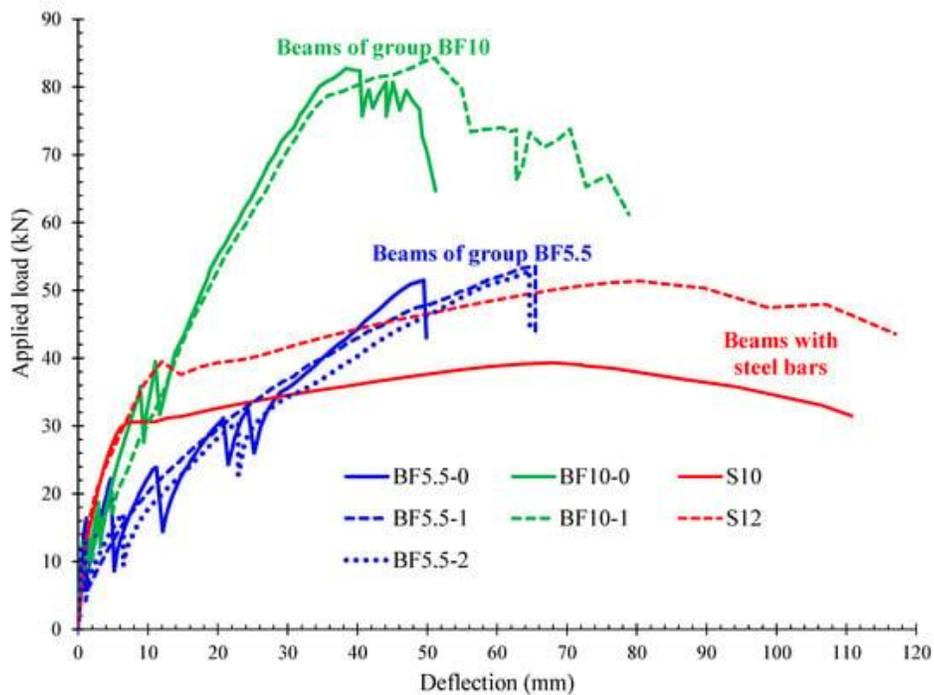


Ilustración 7 - Comparación de curvas de carga vs deflexión al centro del tramo de vigas ensayadas.

Fuente: (Chris G. Karayannis, 2018)

Este tipo de caso no se visualiza en especímenes reforzados con acero debido al alto módulo de elasticidad y una cuantía mayor. También es importante tomar en cuenta que en los elementos reforzados con C-FRP, las grietas se muestran rápidamente debido a la baja rigidez axial de las varillas en comparación a los elementos reforzados con acero, donde las grietas se mostraron lentamente y debido a eso, no se vieron caídas súbitas de carga cuando aparecen las grietas (Chris G. Karayannis, 2018).

El estudio titulado "Refuerzo a Flexión de Vigas de Hormigón Mediante Polímeros Reforzados con Fibra de Carbono" realizado por el Ing. MSC Javier López Molina, investigo la

factibilidad de utilizar el polímero reforzado con fibra de carbono (CRFP) en el refuerzo de estructuras de manera externa. Determino que los materiales CFRP destacan enormemente en su puesta en obra, son ligeros, de gran maniobrabilidad, capaces de adaptarse a la geometría del sustrato, cuenta con valores muy altos de resistencia a la tracción y módulo de elasticidad en contraste con su baja densidad y ligereza. El único percance siendo el requerimiento de protección con un revestimiento ignífugo (Molina, 2013).



Ilustración 8 - Ejemplo de polímero reforzado con fibra de carbono.

Fuente: (AICE 25, 2022)

Con estos estudios se puede visualizar que existen aplicaciones en el sector de la construcción para la impresión 3D de refuerzos y el uso de la fibra de carbono como refuerzo estructural. Al mismo tiempo, se carece de un estudio que se enfoque en producir refuerzo estructural impreso con filamento de fibra de carbono, y aunque se han impreso refuerzos estructurales con otros filamentos, raramente se han hecho impresiones con geometrías similares a las de una varilla de acero.

3.4 ADHERENCIA DEL REFUERZO AL CONCRETO

“La adherencia es el principio básico del funcionamiento del concreto reforzado como material estructural mediante la cual se transmiten los esfuerzos de tracción entre sus materiales constitutivos” (Vanegas, 2014).

3.4.1 ADHERENCIA DEL ACERO DE REFUERZO AL CONCRETO

El concepto de adherencia se refiere al fenómeno de la interacción entre la masa del concreto y las barras cilíndricas del acero una vez que se encuentran ahogadas dentro de esta. Es el fenómeno que permite la transferencia y continuidad de esfuerzos y fuerzas entre los dos elementos, asegurando que trabajen como uno solo (Ramírez, 2013).

3.4.1.1 Varillas lisas

En el artículo de Investigación y Ciencia, Ramírez (2013) enumera las tres fases identificadas de la adherencia:

Etapa (A) de pseudo-adherencia perfecta, asociada a la adherencia química; (b) etapa de deslizamientos de transición, provocados por el microagrietamiento inducido por el bloqueo mecánico creado por la presencia de las nervaduras de la varilla de acero incrustadas en el concreto circundante; y (c) fase de grandes deslizamientos asociados a un mecanismo de fricción entre dos posibles superficies rugosas (acero-concreto o concreto-concreto).

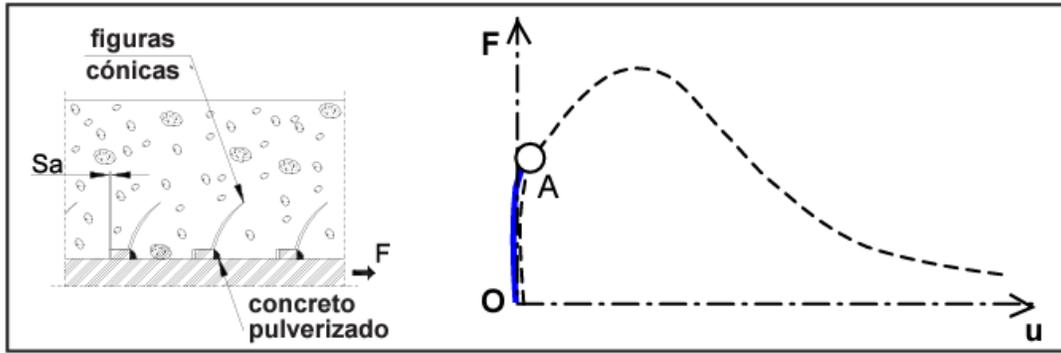


Ilustración 9 - Agrietamiento del concreto y aparición de primeras microfisuras radiales, con pequeños deslizamientos entre superficies: límite de adherencia perfecta.

Fuente: (Ramírez, 2013)

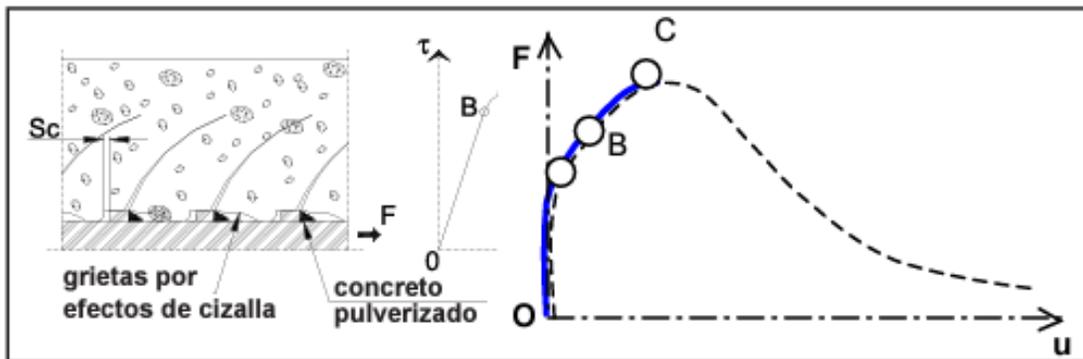


Ilustración 10 - Aparición de grietas de cortante y propagación de fisuras radiales; transición de pequeños deslizamientos a grandes deslizamientos; degradación de la interacción mecánica por bloqueo entre concreto y nervaduras de acero (en caso de existir).

Fuente: (Ramírez, 2013)

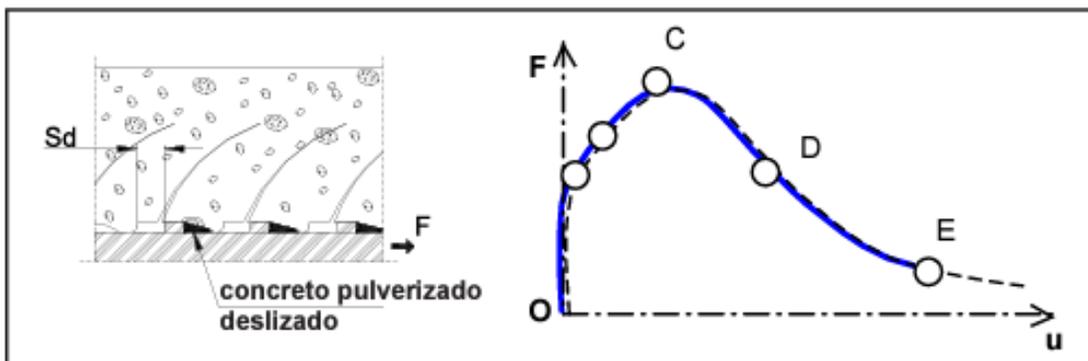


Ilustración 11 - Coalescencia de grietas de cortante y redireccionamiento hacia una macrogrieta, con grandes desplazamientos de la barrera de acero. La resistencia pospico es proporcionada por la fricción entre superficies de contacto.

Fuente: (Ramírez, 2013)

La respuesta del conjunto depende de la capacidad del concreto y del acero para deformarse, debido a que el acero tiende a deslizarse al interior de la masa de concreto. La razón por la cual es necesario que las varillas sean corrugadas y no lisas, es que estas corrugas refuerzan la adherencia entre el acero y el hormigón (Ramírez, 2013).

3.4.1.2 *Varillas corrugadas*

Hasta la versión de 1971, el ACI-1963 no consideraba la longitud del desarrollo, la cual depende de la adherencia entre refuerzo y concreto. En la versión actualizada de 1971, se introdujo el concepto de "longitud de desarrollo", haciendo referencia al cálculo de los esfuerzos de cortante en la cara lateral de las barras de acero (Ramírez, 2013).

Al momento del deslizamiento, la resistencia por adhesión se pierde, y debido a que la resistencia por fricción es no significativa, se necesita el apoyo directo de las corrugaciones de la barra sobre el concreto, las cuales tienen una capacidad muy grande de adherencia. Esto se debe a la trabazón que ocurre entre las costillas y el concreto que las rodea (Sequeira, 2018).

Es conocido que al cambiar los momentos flexionantes en una viga también cambiara la magnitud de los esfuerzos de adherencia. De no haber adherencia, se comportará como miembro sin refuerzo, y será sometido a un colapso repentino en cuanto se presente la aparición de una grieta. El propósito del refuerzo es poder transmitir la tensión longitudinal a la varilla al momento de desarrollarse una grieta, lo cual hace aún más importante la presencia de adherencia, por ende, corrugas, en el refuerzo a flexión de los elementos (Sequeira, 2018).

"La corrugación en las varillas se propuso para que además de la adhesión y de la fricción, hubiera también una resistencia debido al apoyo del concreto en las corrugaciones (o

deformaciones) de las varillas, así como también la llamada resistencia de fricción al cortante del concreto entre las corrugaciones” (Sequeira, 2018).

Aunque las varillas corrugadas son las necesarias para desarrollar adherencia en el refuerzo a flexión, no significa que las varillas lisas no tienen propósito. “Las varillas corrugadas se usan en casi todo tipo de trabajo. Sin embargo, las varillas lisas se usan algunas veces para el refuerzo lateral en los miembros a compresión (como los estribos o las espirales), para miembros sometidos a torsión para el refuerzo confinado en empalmes” (Sequeira, 2018).

3.4.2 ADHERENCIA DE LA FIBRA DE CARBONO AL CONCRETO

En un ensayo realizado para diversos tipos de varillas reforzadas con polímeros, El-Nemr (2023) determinó que incrementar el diámetro de la varilla en general reduce la adherencia de las varillas FRP, cuando el impacto es insignificante en varillas de acero. Cuando se ensayó el concreto con la resistencia a la compresión más baja, la falla ocurría en la interfaz de resina – concreto. En cambio, con un concreto de alta resistencia a la compresión, la falla ocurrió en la interfaz de fibra y resina, debido al alto nivel de confinamiento generado por el concreto de alta resistencia.

Con ayuda del Departamento de Ingeniería Arquitectónica de la Universidad de Mokwon, y el Centro de Investigación del Instituto de Concreto de Corea, Kim (2022) desarrolló una investigación con respecto a la adherencia de varillas CFRP y GFRP en relación a la resistencia de su relación agua-cemento, de acuerdo a la norma ASTM C234. Sus resultados mostraron que entre más baja su relación agua cemento, mayor la resistencia a compresión y la adherencia; donde las CFRP mostraron una adherencia de 23% mayor que las GFRP. La fuerza de adherencia de CRFP

fue de 16.41 MPa con relación 40% agua-cemento, 11.18 MPa con relación 50%, and 8.76 MPa con 60%.

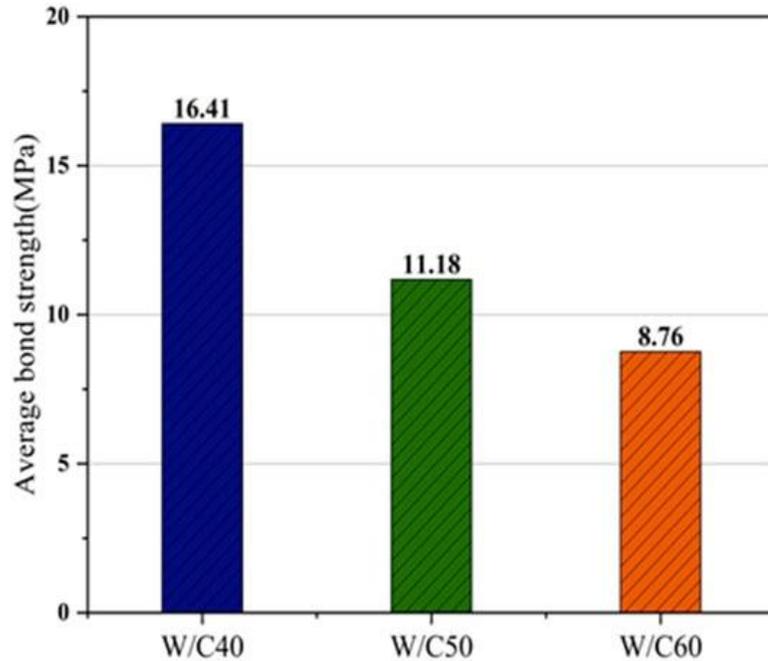


Ilustración 12 - Resultados promedio de adherencia para CFRP

Fuente: (Jusung Kim, 2022)

3.4.3 ENSAYOS PARA MEDIR LA ADHERENCIA AL CONCRETO

Para propósito de la investigación, se tomarán referencias de dos diferentes normativas para ensayar adherencia del refuerzo al concreto. La norma Americana ASTM C234-91, y la norma Hindú IS: 2770 (Part I) – 1967 (Reaffirmed 2007)

3.4.3.1 Norma ASTM C234-91

Este método de prueba estándar cubre la comparación de concretos en base a su adherencia desarrollada con acero de refuerzo. El método es adaptable para usarse solamente en propósitos de investigación, y no para establecer valores de adherencia para propósitos de diseño estructural (ASTM, 1991).

3.4.3.2 *IS: 2770 (Part I) – 1967 (Reaffirmed 2007)*

Este método de prueba estándar fue adaptado por el Indian Standards Institution, y cubre la comparación en resistencia de adherencia de diferentes tipos de varillas de refuerzo con concreto por medio de un ensayo de extracción de varilla. Además, el método es adaptable para comparación de las características de adherencia entre diferentes mezclas de concreto y varillas de acero de refuerzo (Indian Standards Institution, 2007).

IV. METODOLOGÍA

La metodología es el estudio de los métodos de investigación, es un proceso estructurado para alcanzar ciertos objetivos, como verificar declaraciones o adquirir conocimientos. Su objetivo es especificar definiciones operacionales de conceptos que pueden ser repetidos y probados (Lune & Berg, 2017).

4.1 ENFOQUE

Para la investigación se utilizó un enfoque cuantitativo, ya que el análisis estará basado en datos cuantificables que indiquen los ensayos para determinar la adherencia y deslizamiento de las varillas impresas con filamento de fibra de carbono, para lo que se utilizaron las normas ASTM C234-91 "método de prueba estándar para comparar concreto para la adherencia desarrollada con el acero de refuerzo" y IS: 2770 (Part I) – 1967 (Reaffirmed 2007) "método de prueba estándar en concreto reforzado: ensayo de extracción".

4.2 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

Las variables de investigación dependen de los datos obtenidos después de realizar el ensayo de adherencia, se espera con el ensayo obtener datos de carga requerida para vencer la adherencia entre el filamento de fibra de carbono y el concreto, o el desplazamiento obtenido en caso de que la adherencia no falle con la carga aplicada en el ensayo. Para motivos de esto, se usaron núcleos de concreto con varillas incrustadas en sus centros, las cuales tienen diferentes cantidades de corrugas. Específicamente, una varilla con 0.6 corrugas/cm, una varilla con 0.3 corrugas/cm, una varilla con 0.2 corrugas/cm y una varilla completamente lisa.

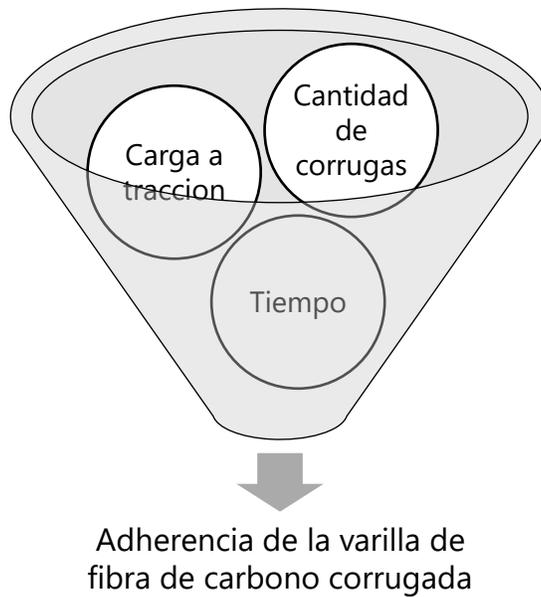


Ilustración 13 - Variables de investigación para adherencia de varillas corrugadas

Además, en caso de no alcanzar la extracción de la varilla en el ensayo, se estimó el dato del desplazamiento que tuvieron las varillas en referencia a su posición inicial en el núcleo de concreto.

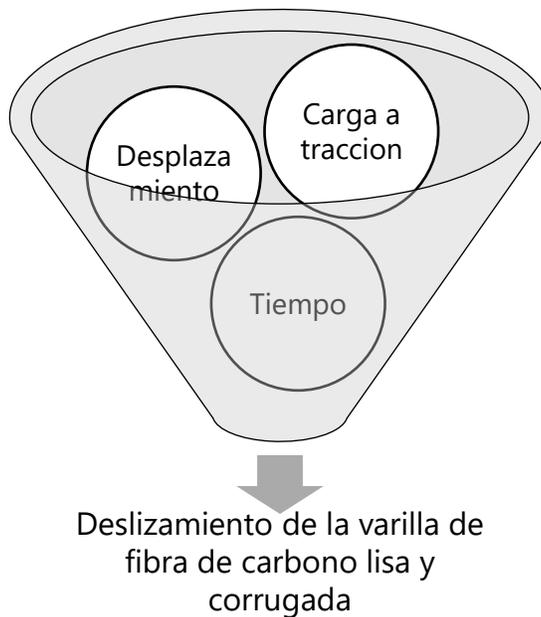


Ilustración 14 - Variables de investigación para el deslizamiento en varillas corrugadas y lisa

4.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

Para poder ensayar la adherencia entre diferentes materiales de refuerzo y el concreto, es necesario hacer uso de diversas normas para la elaboración de los especímenes de concreto, además del diseño de las varillas utilizadas como refuerzo. Además, se deben de utilizar herramientas como SolidWorks para el modelado de los elementos a impresión 3D.

4.3.1.1 Investigación bibliográfica

Para lograr una comprensión del tema a tratar y de las técnicas a ser utilizadas en la investigación, se utilizaron bancos de información con de artículos científicos como Science Direct, además de buscadores web para encontrar información relacionada con la fibra de carbono y el refuerzo a flexión. Así se logró obtener información acerca de previas investigaciones en el tema, y del ensayo necesario para adquirir los resultados que requiere la investigación.

4.3.1.2 Impresión 3D

Para poder trasladar el modelo de la varilla del programa a un objeto físico, se introdujo el archivo del modelo final a una impresora 3D Original Prusa i3 MK3S+. Una vez introducido, la impresora permite imprimir en un área de 25x25cm, con una altura de impresión máxima de aproximadamente 80 cm. Además, la impresora permite el uso de diversos filamentos para la impresión de objetos, en el caso del proyecto de investigación, se estará usando el filamento de fibra de carbono.

4.3.1.3 Norma Mexicana NMX – B – 457 – Canacero – 2013:

La NMX – B – 457 – Canacero – 2013 se utilizó como referencia para el diseño de las dimensiones de corrugas y separación necesaria entre ellas. Con la norma se obtuvieron los datos requeridos para dimensionar en referencia a el diámetro de la varilla.

Tabla 1 – Requisitos de Corrugas

Número de designación	Espaciamiento máximo promedio mm	Altura mínima promedio mm	Costilla máxima mm
3	6.7	0.4	3.6
4	8.9	0.5	4.9
5	11.1	0.7	6.1
6	13.3	1.0	7.3
7	15.5	1.1	8.5
8	17.8	1.3	9.7
9	20.0	1.4	10.9
10	22.3	1.6	12.2
11	24.4	1.7	13.4
12	26.7	1.9	14.6
14	31.2	2.2	17.5
16	35.7	2.4	20.0
18	40.0	2.6	22.5

4.3.1.4 *SOLIDWORKS*

SolidWorks es un programa de diseño, dibujo y modelado de sólidos. Este programa se utilizó para modelar la varilla una vez obtenidos los datos requeridos de su diámetro, tipo de corrugas, y dimensiones de corrugas y costillas.

4.3.1.5 *PrusaSlicer*

PrusaSlicer es una herramienta gratuita que tiene como función exportar modelos 3D a una interfaz compatible con una impresora 3D. Permite editar la orientación de los elementos, las temperaturas de la cama y la boquilla de la impresora.

4.3.1.6 *IS: 2770 (Part I) – 1967 (Reaffirmed 2007)*

El código hindú IS: 2770 (reaffirmed 2007) fue utilizado como referencia para el ensayo de adherencia. Consiste en normas para la comparación de la resistencia de adherencia entre diferentes tipos de varillas de refuerzo con concreto, haciendo uso de un ensayo de extracción. De la norma se obtuvieron los datos de referencia para el diámetro de la varilla correspondiente al tamaño del cilindro de concreto, la tasa de esfuerzo/tiempo que debe de aplicar el gato hidráulico a la varilla, y los intervalos en los cuales se deben de tomar los datos.

4.3.1.7 ASTM C234-91

El código americano ASTM C234-91 “método de prueba estándar para comparar concreto para la adherencia desarrollada con el acero de refuerzo” consiste en normas para la comparación de concreto en base al vínculo formado con el acero de refuerzo. De la norma se obtuvieron datos que son requeridos para la elaboración de los moldes de prueba, la ubicación de la varilla en la probeta de concreto, y la longitud requerida de esta.

4.4 MATERIALES Y EQUIPO

Para realizar los ensayos descritos en esta investigación, es necesario hacer uso de un filamento de fibra de carbono que pueda ser usado en una impresora de 3D tipo convencional. Además, es necesario el acceso a una impresora 3D, y moldes de cilindros de concreto.

4.4.1.1 Filamento de Fibra de Carbono:

El filamento utilizado para el ensayo es el filamento PLA de fibra de carbono matte 1.75 mm de la compañía Overture. Con este filamento se imprimió la totalidad de las varillas usadas en los ensayos, incluyendo lisas y corrugadas.



Ilustración 15 - Filamento de fibra de carbono Overture

Fuente: (Overture3D, 2020)

4.4.1.2 Impresora Prusa

La impresora que se utilizó en la impresión de las varillas ensayadas fue la Impresora 3D Original Prusa i3 MK3S+. Con ayuda del programa PrusaSlicer, se transfirió el modelo de la varilla a un programa que puede transferir el modelo a la impresora. La impresora produjo 4 varillas para el ensayo, una varilla lisa, y 3 varillas con diferentes grados de corrugación.



Ilustración 16 - Impresora 3D Original Prusa i3 MK3S+

Fuente: (Prusa, 2019)

4.5 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

La metodología es el marco sistemático que se utiliza para la resolución del problema de investigación; lo comprenden procedimientos, técnicas y herramientas utilizadas para llevar a cabo la investigación (Enago Academy, 2023).

Los siguientes son los pasos que se siguieron para realizar el diseño e impresión de las varillas, las proporciones usadas para la mezcla de concreto de los cilindros, además de las indicaciones seguidas para el ensayo de adherencia que se le aplicó a los cilindros de concreto.

4.5.1 FUENTES SECUNDARIAS DE INVESTIGACIÓN

4.5.1.1 *Revisión de fuentes bibliográficas*

La revisión de fuentes bibliográficas fue el primer paso que se tuvo que realizar para poder obtener una cantidad de información adecuada ya que los temas a ser investigados son extensos y requieren un nivel de entendimiento alto. Se tomaron en cuenta una gran cantidad de diferentes fuentes provenientes de distintas bases de datos para expandir el conocimiento sobre los temas relevantes que elevan el nivel de profesionalismo dentro de la investigación.

4.5.1.2 *CRAI*

El CRAI fue un recurso indispensable ya que la gran parte de la información recopilada para realizar la investigación fue por medio del uso del CRAI y las bases de datos que este proporciona. Se visitó el CRAI de manera presencial, en busca de libros o revistas que brindaran información relevante acerca de una tecnología tan nueva como la impresión 3D y también sobre la fibra de carbono. La gran mayoría del uso que se le dio a este recurso fue a través de investigaciones en línea debido a que la mayoría de los estudios e investigaciones científicas que consideran la impresión 3D y la fibra de carbono se encontraban en línea, pero no había mucha disponibilidad de recursos físicos.

4.5.1.3 *Bases de datos*

Las bases de datos que se encuentran dentro de la página web del CRAI fueron indispensables al momento de buscar información relevante a los temas que desarrollan los conceptos fundamentales de la investigación. La base de datos ProQuest fue una de las más utilizadas ya que contiene una gran variedad de artículos científicos que son innovadores y tienen información destacada de otras investigaciones que se han desarrollado en la ingeniería civil, en especial con la fibra de carbono la cual es objetivo de la investigación.

ScienceDirect es una base de datos que se utilizó de manera regular para buscar información pertinente a ensayos de tracción que han sido realizados para poder comparar y obtener ideas de la manera en la cual se pueden realizar los ensayos. Esta base de datos se centra más en las

investigaciones científicas como lo dice su nombre, por lo tanto, la información es relevante a la Ingeniería Civil.

4.5.2 FUENTES PRIMARIAS DE INVESTIGACIÓN

4.5.2.1 *Entrevistas a expertos*

Se entrevisto al Ingeniero Civil Carlos Flores, dirigente de la empresa GeoConsult. En dicha reunión se discutieron las maneras posibles de realizar el ensayo de tracción con diferentes equipos y tomando en cuenta los diferentes factores que podrían afectar el ensayo.

Se entrevisto al director del FabLab de UNITEC, el Ingeniero Favell Núñez sobre las maneras en las cuales se podía realizar la impresión de varillas con fibra de carbono y también se definieron parámetros de diseño, de manera que la impresión de las varillas fuera la correcta para obtener los mejores resultados posibles.

Se discutió acerca de los materiales y recursos disponibles en el laboratorio de Ingeniería Civil con el Ingeniero Juan Carlos Reyes, director del laboratorio de Ingeniería Civil de UNITEC. Se busco también la ayuda del ingeniero para obtener ideas de la manera más factible para realizar el ensayo, teniendo en cuenta los recursos que se tenían a disposición y las limitaciones que estos mismos imponían en la investigación.

4.5.2.2 *Visitas a empresas relacionadas*

Se visito la empresa GeoConsult para estudiar la factibilidad de realizar los ensayos de tracción de varilla dentro de las instalaciones de ellos ya que cuentan con una gran cantidad de recursos y equipamiento que se adapta a diferentes solicitudes y situaciones.

Debido al funcionamiento de la maquina utilizada para realizar la prueba de tracción en varillas y la geometría de los especímenes a probar, no fue posible realizar la prueba, pero se discutieron ideas y planes de acción con un dirigente de la empresa sobre cómo se podría realizar el ensayo de una manera rudimentaria, las cuales fueron implementadas en el ensayo final.

4.5.3 DISEÑO DE VARILLA

A continuación, se comparte el diagrama de flujo para el diseño de la varilla de filamento de fibra de carbono, con la debida explicación del proceso:

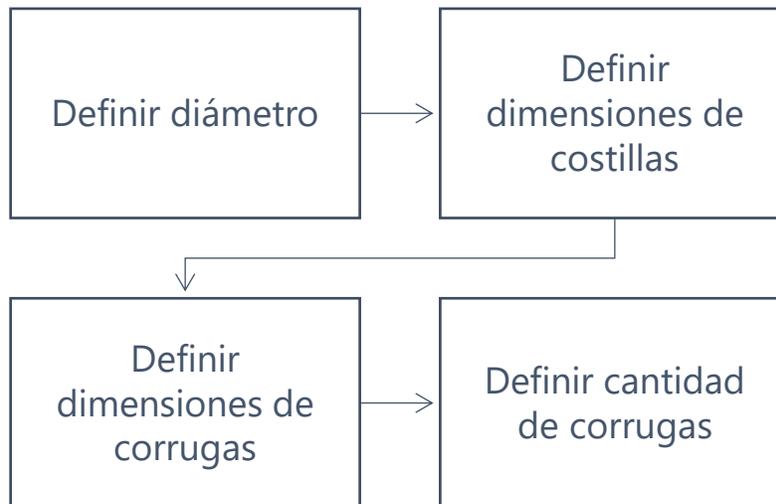


Ilustración 17 - Proceso de diseño de varilla a impresión 3D

4.5.3.1 Diámetro

La varilla fue diseñada en el programa SolidWorks versión 2023, con un diámetro de 4/8 de pulgada, de acuerdo con la Normativa IS: 2770 (Part I). Esta especifica que, para un núcleo de concreto con diámetro o cara de 15 cm de longitud, se necesita usar diámetros de 4/8 a 8/8 de pulgada de varillas.

4.5.3.2 Dimensiones de costillas

Las costillas de varilla fueron diseñadas con 0.04 pulgadas de alto y ancho, de acuerdo con la normativa NMX – B – 457 – Canacero – 2013, que permite para una varilla designación #4, una costilla máxima de 4.9 mm (0.2 in).



Ilustración 18 - Dimensión de costillas de varilla en modelo SolidWorks.

4.5.3.3 Dimensiones de corrugas

Las corrugas fueron diseñadas con una altura de 0.0375 pulgadas, y un ancho de 0.03 pulgadas, de acuerdo con la norma NMX – B – 457 – Canacero – 2013, la cual exige una altura mínima promedio de corruga de 0.5 mm (0.02in) para las corrugas de varillas con designación #4.

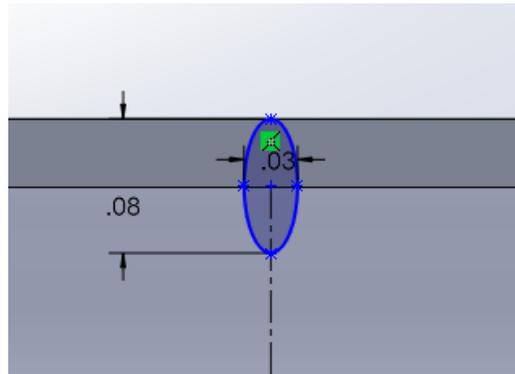


Ilustración 19 - Dimensión de corruga con respecto al centro de la cara lateral de varilla en modelo SolidWorks.

Para crear las corrugas, se dibujó primero un espiral que partiera desde el centro de la varilla, de frecuencia 0.543307 in, con 9.75 revoluciones, con grado de comienzo de onda de 0° para la pieza inferior de la varilla, y grado 60° para la superior.

Una vez se realizó el espiral, y con ayuda de la función barrido de saliente/base, se dibujó la elipse correspondiente a la corruga, y se usó el espiral como camino para extruir la corruga a lo largo de la varilla en ambas direcciones desde su centro.



Ilustración 20 – Cara superior de varilla de 28 cm con 9.75 revoluciones en el espiral guía de corrugas en modelo SolidWorks.

Una vez completada la pieza, se usó la función de corte extruido, para poder tener una separación de corruga diferente para cada pieza de la varilla, así cortando la varilla inferior y superior a la mitad.

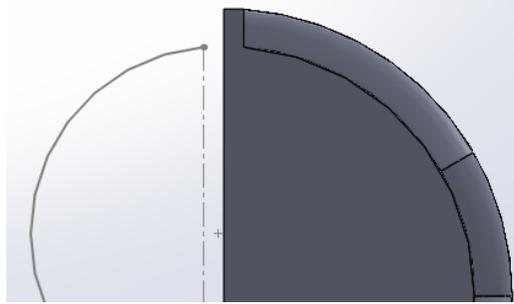


Ilustración 21 - Cara frontal de pieza superior para varilla en modelo SolidWorks.

Una vez terminadas ambas piezas, se creó un ensamble, juntando ambas piezas en torno a relaciones de coincidencia de caras frontales. El proceso se repitió con una frecuencia de espiral de 1.15433071 pulgadas con 4.75 revoluciones, y frecuencia de 2.15433071 pulgadas con 2.5 revoluciones para el modelo de varilla con un cuarto y mitad de corrugas originales respectivamente. Además, se realizó un modelo de varilla completamente liso, con el mismo diámetro y dimensión de costillas que las demás.

4.5.4 IMPRESIÓN DE VARILLA

A continuación, se comparte el diagrama de flujo para la impresión de la varilla de filamento de fibra de carbono, con la debida explicación del proceso:

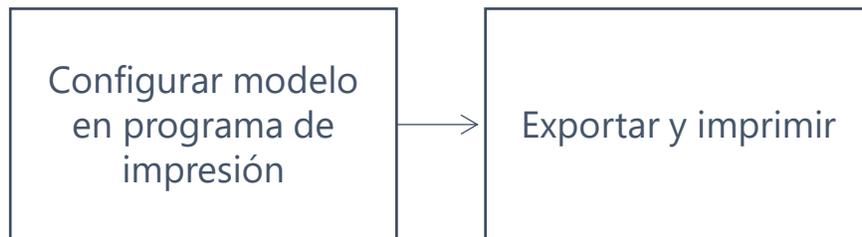


Ilustración 22 - Proceso de impresión de varilla

4.5.4.1 Configuración de modelo:

Para realizar la impresión del modelo de varilla, se exportó el archivo de los ensambles como un archivo tipo STL, para poder abrir ambas caras de la varilla en el programa PrusaSlicer. Una vez abierto el programa, se abrió el archivo de la cara inferior, y se rotó de manera que esta estuviera diagonal a la placa. Siguiendo, se cambiaron las configuraciones del objeto en el menú izquierdo para importar la cara superior. Luego de juntar ambas caras, se seleccionó la ubicación de los

apoyos que necesitan ser impresos junto con el modelo, para que este no se mueva en el proceso de impresión.

En los ajustes se utilizó una velocidad de impresión de 0.2 mm, con un filamento Prusament PC Blend Carbon Fiber (modificado), una impresora Original Prusa i3 MK3S+ y configuración de apoyo "para ejecución de apoyo solamente". El relleno usado fue de 100% para el modelo, 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 al requerido por el tipo de filamento a utilizad (PLA).

4.5.4.2 *Impresión de modelo*

Se repitió el proceso para todos los modelos de varilla y se ejecutó el programa para exportar el código G de lectura de la impresora, luego se cargó el filamento a la impresora y se comenzó el proceso de impresión de los 4 modelos, aplicando una capa de pegamento en barra a la placa de impresión antes de cada nueva ejecución.



Ilustración 23 - Varilla de fibra de carbono impresa con todas las corrugas.

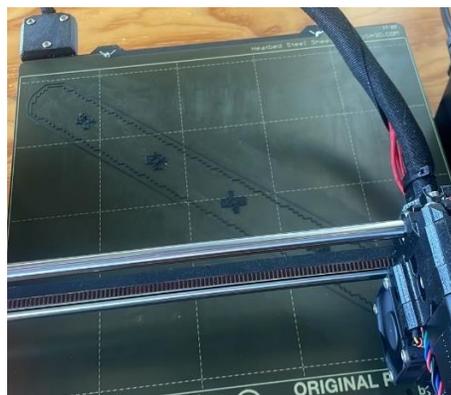


Ilustración 24 - Impresión de varilla de fibra de carbono.

4.5.5 NÚCLEOS DE CONCRETO

A continuación, se comparte el diagrama de flujo para la elaboración de los núcleos de concreto, con la debida explicación del proceso:

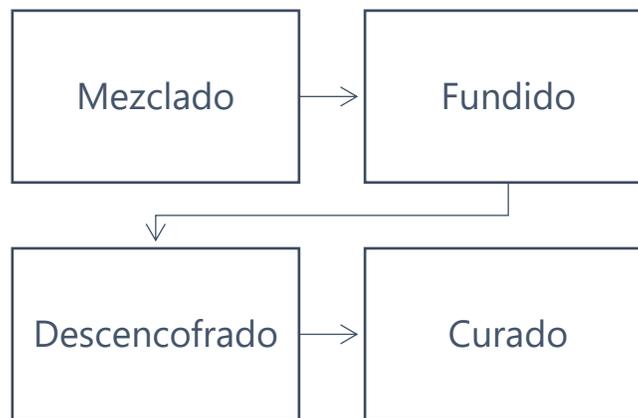


Ilustración 25 - Proceso de elaboración de núcleos de concreto

4.5.5.1 Mezcla de concreto

La mezcla de concreto utilizada en los cilindros en los cuales fueron embebidas las varillas de fibra de carbono impresas a 3D utilizaron una proporción de 1:2:3 con una proporción de agua de 0.71 con respecto a los otros valores de los agregados. Los pesos de cada agregado se calcularon al obtener el peso de los cuatro cilindros a realizar y luego sumar todos los pesos y realizar una ponderación según las proporciones brindadas previamente.

La mezcla de concreto fue realizada en el laboratorio de Ingeniería Civil de UNITEC con los materiales brindados por las autoridades de este. La grava y la arena también fue brindada por los recursos del laboratorio y la mezcla fue realizada con los conocimientos adquiridos en clases como el Laboratorio de la clase de Procedimientos y Equipos de Construcción debido a las practicas que fueron realizadas dentro del campus de UNITEC en el cual se aprendió a poder realizar mezclas de concreto y luego ser capaz de utilizar la mezcla en diferentes aplicaciones, dichas destrezas fueron utilizadas para poder realizar los cilindros que son necesarios para poder realizar la prueba de tracción que es necesaria para poder obtener los datos de adherencia de las varillas de fibra de carbono impresas a 3D.

Cada uno de los especímenes fue hecho de la misma manera, con las mismas dimensiones y el procedimiento que fue utilizado para realizar los cilindros fue exactamente el mismo, siempre respetando los códigos de la ACI para poder respaldar los procedimientos y validarlos de manera que se pueda poner utilizar los resultados en investigaciones futuras donde se podrá expandir sobre los conocimientos adquiridos ya que por falta de recursos y tiempo no se ha podido profundizar sobre los temas que han sido muy importantes dentro del ámbito de la Ingeniería Civil donde hacen falta investigaciones donde se puedan obtener y graficar datos relevantes que son los resultados de cada una de las investigaciones donde se realizan pruebas empíricas y que sean utilizados en momentos futuros donde se puedan obtener alternativas para utilizar los materiales y elementos estructurales convencionales que siempre se han utilizado y se han vuelto la norma dentro del ámbito de la ingeniería civil pero que pueden ser mejorados o implementados en otros aspectos donde se pueden expandir y se pueden utilizar como elementos estructurales que representen avances significativos para poder

4.5.5.2 *Fundido*

Verter concreto en el cilindro es un paso importante en la creación de elementos de prueba que permitan evaluar las propiedades mecánicas y la resistencia del hormigón. Este proceso es una parte integral de los procedimientos de control de calidad y pruebas estructurales en la construcción. La fabricación precisa de cilindros de hormigón fundido es esencial para obtener resultados fiables en las pruebas de laboratorio.



Ilustración 20. Cilindros de Concreto

El fundido de cilindros generalmente implica verter concreto fresco en moldes específicos diseñados para dar forma a cilindros de tamaño y dimensiones estandarizadas. Es crucial seguir procedimientos cuidadosos durante el vertido para asegurar la uniformidad del concreto y evitar la presencia de aire atrapado, segregación o cualquier otro defecto que pueda afectar la calidad de las pruebas.

La selección y preparación adecuada de los moldes, así como la correcta mezcla y colocación del concreto, son factores esenciales para garantizar la representatividad y confiabilidad de los cilindros. Después de verter el concreto, se lleva a cabo un proceso de consolidación para eliminar burbujas de aire y asegurar la compactación adecuada.

Una vez que el concreto ha alcanzado la resistencia requerida después de un período de curado, los cilindros están listos para ser desmoldados y sometidos a pruebas de resistencia a la compresión en laboratorio. Estas pruebas proporcionan datos valiosos que permiten a ingenieros y constructores evaluar la calidad del concreto utilizado en un proyecto y garantizar su cumplimiento con las especificaciones y normativas aplicables. En consecuencia, el fundido de cilindros de concreto constituye un paso fundamental en la evaluación y garantía de calidad del material antes de su implementación en estructuras y obras de construcción.

Se procedió a fundir la mezcla de concreto en los moldes de los cilindros según la norma ACI 316

4.5.5.3 Desencofrado

El desmoldamiento de cilindros de concreto es un paso importante para probar la resistencia y la calidad del concreto. Los cilindros de hormigón se colocan en moldes especiales y, tras un período de curado adecuado, se retiran del molde en un proceso llamado desmolde. Este paso es importante al evaluar la resistencia y otras propiedades del concreto en laboratorios de control de calidad y pruebas estructurales.

El desmoldamiento debe llevarse a cabo con precaución para evitar dañar los cilindros y garantizar que conserven su forma y dimensiones originales. Este proceso suele llevarse a cabo después de un período de curado estándar, durante el cual el concreto ha tenido la oportunidad de desarrollar su resistencia adecuada.



Ilustración 21. Desencofrado de Cilindros

Una vez que los cilindros son retirados de los moldes, se procede a realizar pruebas de resistencia a la compresión, una medida crucial para evaluar la calidad del concreto. Estas pruebas proporcionan datos esenciales para los ingenieros y constructores, ayudándoles a confirmar si el concreto cumple con las especificaciones de diseño y las normativas de construcción.

Se desencofraron o desmoldaron los cilindros luego de 16 horas de manera que la integridad de los elementos estructurales no se haya visto afectada por condiciones externas.

4.5.5.4 Curado

El curado del concreto es un proceso importante en la construcción que garantiza un desarrollo óptimo de las propiedades físicas y mecánicas. Este proceso ocurre después de que el concreto ha sido colocado y compactado y tiene como objetivo mantener suficiente hidratación del cemento para permitir que el material alcance la resistencia y durabilidad deseadas.

Durante la hidratación, el cemento reacciona con el agua para formar un gel de silicato de calcio, responsable de la resistencia del hormigón. Sin un proceso de curado adecuado, la evaporación del agua y las condiciones ambientales adversas pueden afectar negativamente esta reacción química, comprometiendo la calidad y el rendimiento del hormigón.

Un curado adecuado es esencial para asegurar la durabilidad y longevidad de las estructuras de concreto, así como para minimizar la posibilidad de fisuras y agrietamientos. La implementación de prácticas de curado adecuadas contribuye significativamente a la calidad final de la

construcción, asegurando que el concreto alcance su resistencia y desempeño máximo a lo largo del tiempo.

El curado de los cilindros de concreto se realizó como el paso siguiente después de desencofrar los cilindros y se pusieron dentro de una pila llena de agua a la temperatura adecuada para proveer el curado necesario, así evitando deficiencias o problemas estructurales.



Ilustración 22. Curado de Cilindros

4.5.6 PRUEBA ENSAYO DE ADHERENCIA

El ensayo de extracción de varilla no pudo ser realizado con el equipo requerido en las normas mencionadas debido a limitaciones de tiempo y de acceso a recursos específicos, es por eso que se va a describir el proceso rudimentario que se utilizó para aplicar cargas de tensión a los núcleos de concreto.

A continuación, se comparte el diagrama de flujo para la elaboración del ensayo de adherencia realizado en este proyecto:

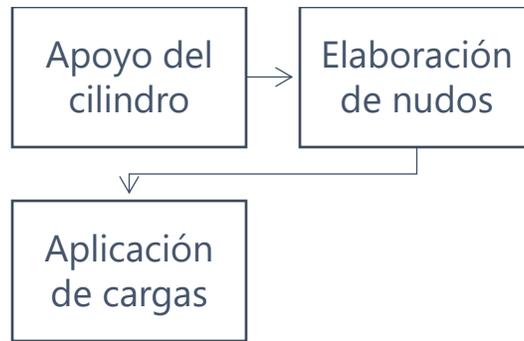


Ilustración 26 - Proceso de ensayo de adherencia

4.5.6.1 *Apoyo del Cilindro*

Para lograr distribuir las cargas al núcleo de concreto de la mejor manera, se apoyó el cilindro de concreto en una viga de acero que forma parte de una presa hidráulica. Para lograr hacerlo, se perforo un agujero de 5/8 de pulgada en el centro de la viga. Una vez hecho el agujero, se colocó el cilindro boca abajo apoyado con la viga, de manera de que la varilla que sobresale de este pudiera atravesar la viga.



Ilustración 27 - Perforación de viga de apoyo



Ilustración 28 - Perforación de viga de apoyo con broca de 5/8"

La mezcla de concreto utilizada en los cilindros fue sometida a compresión a los 21 días de curado, y presentó una resistencia a compresión de 2075 PSI (140.61 kg/m²).



Ilustración 29 - Lectura de carga compresiva aplicada a cilindro de concreto

4.5.6.2 *Elaboración de nudos*

Para poder aplicarle la carga directamente a la varilla, se utilizaron lasos de polipropileno, específicamente se utilizaron dos de las cuatro trenzas que componen el laso de media pulgada. Este laso. Según la ficha técnica de Truper correspondiente a las cuerdas de polipropileno, tiene capacidad de carga de 177 kg, lo cual significa que una de sus trenzas tiene una resistencia

aproximada de 44.25 kg. Haciendo uso de dos trenzas, se aplicó un máximo de carga a los cilindros de 88 kg.

El tipo de nudo utilizado para asegurar las cargas en las varillas fue un enganche rodante. Este tipo de enganche funciona a tensión, y es ajustable en distancia, pero se ajusta más entre más fuerza se le aplica al elemento.

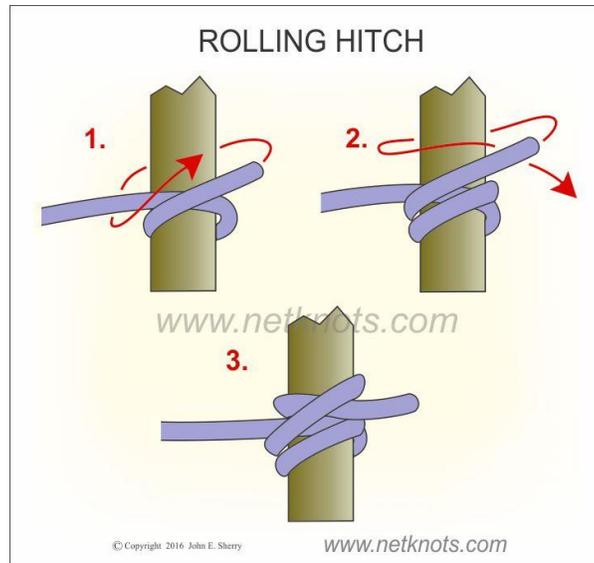


Ilustración 30 - Enganche rodante

Fuente: (Sherry, 2016)

4.5.6.3 Aplicación de cargas

Para lograr colocarle el peso requerido a las varillas, se amarró de ellas una cubeta metálica, y en esta se introdujeron las pesas. Estas fueron colgadas progresivamente, hasta que la varilla fuera extraída del núcleo, el concreto fallara, o el filamento de fibra de carbono fallara, para los 4 núcleos que fueron ensayados, cada uno con una varilla de con diferentes cantidades de corrugas.



Ilustración 31 - Sistema para prueba de adherencia

Para la varilla lisa únicamente, se utilizó una tabla de madera para colgar los pesos, la cual funcionó como trabe. El peso de esta trabe fue de 1.1 kg, e incluyendo ese peso, la varilla lisa fue extraída de su núcleo de concreto al aplicarle 4.4 kg en total.

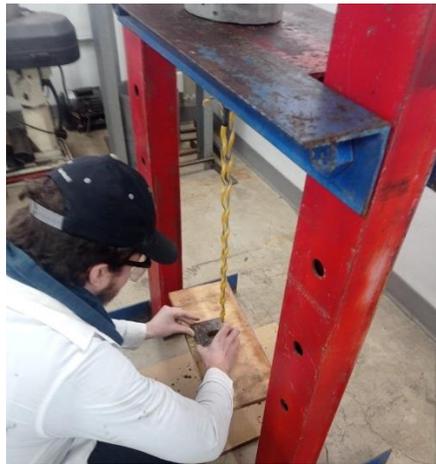


Ilustración 32 - Sistema para prueba de adherencia con varilla lisa

La varilla con un cuarto de la cantidad original de corrugas fue extraída al colgar de ella un peso de 27 kg (sin incluir el peso de la cubeta donde se colocaron las pesas). La varilla con la mitad de la cantidad original de corrugas fue extraída al colgar de esta un peso de 44 kg, cabe notar que la adherencia falló luego de dos minutos sin agregarle peso extra a la varilla. La última varilla con todas sus corrugas no falló aun cuando se le aplicaron 80 kg de carga, además, no presentó ningún deslizamiento del núcleo.



Ilustración 33 - Varilla con mitad de corrugas cargada

4.5.7 FLUJOGRAMA DE LA METODOLOGÍA

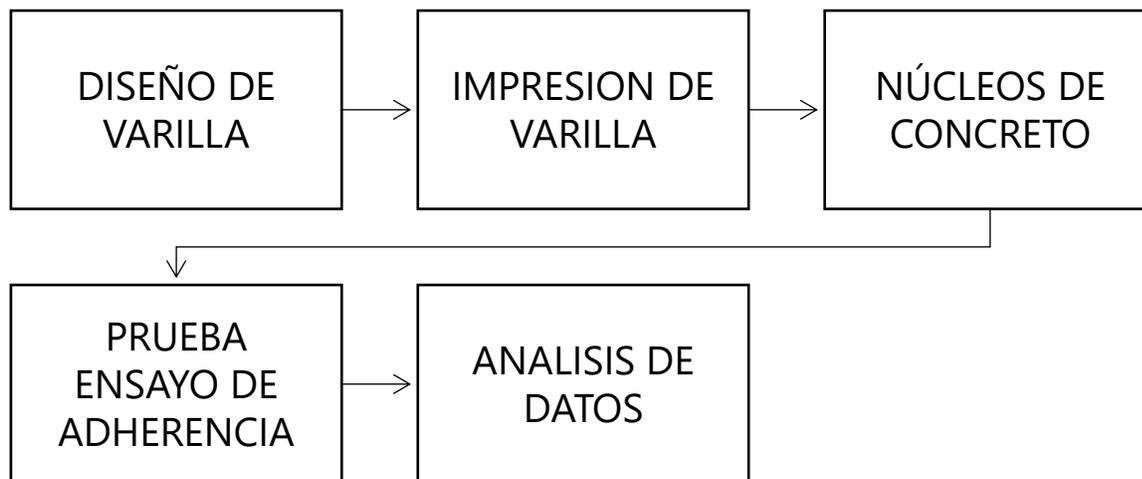


Ilustración 34 - Secuencia de ensayo de extracción de varilla

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Después de completar el ensayo de adherencia para las cuatro probetas, se recopilaron los datos de carga máxima aplicada para cada una de las varillas corrugadas y la varilla lisa, los siguientes son los resultados.

5.1 RESULTADOS DE LA ADHERENCIA AL CONCRETO DE VARILLAS LISAS DE FIBRA DE CARBONO

A partir del ensayo para probar la adherencia al concreto de varillas lisas de fibra de carbono de ½ pulgada, realizado a partir de someter a tracción la varilla embebida en cilindros de concreto en un extremo, con una carga de 3 kg se observó que no existe adherencia al concreto, ya que con la carga aplicada la varilla lisa de fibra de carbono se liberó de forma inmediata, de lo que se puede concluir, tras un ensayo diseñado para este efecto, que no hay adherencia de la varilla de fibra de carbono lisa con el concreto.

5.2 RESULTADOS DE LA ADHERENCIA AL CONCRETO DE VARILLAS CORRUGADAS DE FIBRA DE CARBONO

Tabla 2 - Resultados de carga máxima aplicada para ensayo de adherencia

Corrugas por centímetro	Carga máxima aplicada (kg)
0.64	80
0.32	44
0.18	27

Para determinar la adherencia al concreto de varillas corrugadas de fibra de carbono, se fabricaron tres tipos de varilla según el número de corrugas, de 0.64, 0.32 y 0.18 corrugas por centímetro, embebidas en cilindros de concreto en un extremo, con una carga de 80, 44 y 27 kg respectivamente. Se observó que la varilla de fibra de carbono con corrugas cada 0.64 cm no cedió ante la carga aplicada, de lo que se puede concluir que la varilla corrugada de fibra de carbono se puede adherir al concreto, sin embargo, no se logró determinar el punto de falla debido a que fue la máxima carga que permitió aplicar el equipo utilizado consistente en una plataforma de metal para colocar el cilindro, lazo de polipropileno para anudarlo a la varilla, una

cubeta de metal y pesas de 1, 4 y 16 kg, material existente en el laboratorio de Ingeniería Civil, sistema no regulado por las normas IS: 2770 (Part I) y ASTM C234-91. Las varillas con 0.32 y 0.18 corrugas por centímetro fallaron a menor carga, de lo que se deduce que de acuerdo con las pruebas realizadas el número óptimo de corrugas, tomando como referencia las varillas corrugadas de acero, es de 0.64 corrugas por centímetro. Adicionalmente, se observó que las varillas que fallaron perdieron las corrugas y parte de la estructura de la varilla de fibra de carbono, no obstante, resistieron más carga a tracción que la varilla lisa de fibra de carbono.



Ilustración 35 - Varillas extraídas del ensayo de adherencia con pérdida de corrugas y parte de su estructura

5.3 COMPARACIÓN DE LA ADHERENCIA AL CONCRETO ENTRE VARILLAS DE FIBRA DE CARBONO LISAS Y CORRUGADAS

Se puede visualizar que la presencia de corrugas en las varillas de filamento de fibra de carbono impresas en 3D si ejerce un incremento en la adherencia de estas a la estructura de concreto; este las ha llevado desde una carga máxima a fallo de 3 kg para varilla lisa, a una varilla sin falla (0.64 corrugas/cm) con carga aplicada de 80 kg. Aun así, es valioso notar la relación química visualizada entre el filamento y el concreto, ya que todas las varillas extraídas presentaron pérdida en la estructura que se encontró en contacto directo con el concreto.

Tabla 3 - Resultados comparativos entre varillas corrugadas y lisas.

Corrugas por centímetro	Carga máxima aplicada (kg)
0.64	80
0.32	44
0.18	27
lisa	3

VI. CONCLUSIONES

Utilizando como apoyo la información obtenida de las fuentes bibliográficas, se puede ver el futuro del refuerzo de fibra de carbono como uno brillante, el cual requiere aun de mas tiempo para poder establecerse como una alternativa viable para refuerzo longitudinal de elementos a flexión. La alternativa de impresión 3D presenta más libertad de diseño, pero al mismo tiempo sin un desarrollo de impresoras especializadas en manufactura industrial de elementos, se limita su implementación en la industria a uno exclusivamente teórico.

1. Se ha logrado la impresión de varillas lisas con el uso de equipo del FABLAB de UNITEC para la impresión en 3D con el uso del programa de diseño SolidWorks, específicamente para determinar el diámetro y longitud, para lo que ha sido necesario realizar previamente un curso virtual en Xpertme.com con el fin de adquirir habilidades en el manejo del programa de diseño, proceso que ha permitido imprimir varillas de fibra de carbono, con dimensiones de ½ pulgada de diámetro y 28 centímetros de longitud.
2. Se ha realizado la impresión de varillas con fibra de carbono a impresión 3D con diferentes grados de corrugado de tal manera que se tengan diferentes patrones que sean capaces de brindar una diferencia en los resultados para así poder interpretar y clasificar los resultados con el fin de poder observar algún patrón que sea indicativo de el concepto de corrugación en acero de refuerzo convencional, para así poder expandir e explorar los conceptos en investigaciones posteriores que sean capaces de contemplar variables más complejas para obtener resultados más concretos.
3. Se ha comprobado la adherencia entre el concreto y varillas lisas y corrugadas de fibra de carbono impresas a 3D mediante una prueba de tracción en la cual se mide la carga aplicada y se determina la elongación de las varillas. Se pudo determinar un patrón de comportamiento positivo en el cual, entre mayor es el grado de corrugación de la varilla, mayor es la carga que puede soportar a tracción, brindando resultados congruentes con lo que se conoce como acero de refuerzo convencional, donde el comportamiento de las varillas también es similar al que fue observado durante el ensayo. Se observo que la varilla lisa fue capaz de soportar apenas 2 kilogramos de carga antes de fallar, la varilla de un cuarto de corrugas soporto 27 kilogramos, la de media corruga soporto 44 kilogramos y

por último la que tenía el mayor grado de corrugación soporto 80 kilogramos, pero sin fallar.

4. Se ha logrado realizar una comparación analítica que demuestre un patrón de resistencia entre las varillas de fibra de carbono impresa a 3D, considerando los diferentes grados de corrugación que tiene cada varilla. Los resultados indican que un mayor grado de corrugación tiende a brindar un grado de adherencia mayor en comparación a las varillas que tienen un menor grado de corrugación. El comportamiento observado, a pesar de que es congruente y muestra señales de promesa, no se puede comparar aun con el acero convencional ya que la carga que esas varillas son capaces de soportar es mucho mayor a la que fue observada por las varillas de fibra de carbono impresas a 3D.

VII. RECOMENDACIONES

1. Realizar el curso para el uso del programa de diseño SolidWorks en el sitio web Xpertme.com, para adquirir habilidades necesarias para la modelación de varillas lisas y fabricación mediante equipo para impresión en 3D, estudio crucial para asegurar la correcta impresión de las varillas de fibra de carbono, en función del diámetro y longitud.
2. Complementar la investigación con un estudio que analice la reacción química entre compuestos del concreto y el filamento de fibra de carbono, para comprender el efecto que causa pérdida de su integridad estructural para las varillas en el proceso de curado con el concreto.
3. Realizar el ensayo de tracción de varilla para obtener el dato de resistencia a tracción del elemento, obteniendo de esta manera la carga a la cual se llevará un gato hidráulico en caso de hacer el ensayo de adherencia de acuerdo a las normas ASTM C234-91 y IS: 2770 (Part I).
4. Repetir el ensayo de adherencia para la varilla de media pulgada de filamento de fibra de carbono impresa a 3D, utilizando el patrón de corrugas de 0.64 corrugas/cm, y haciendo uso de mangos de traslape de varilla. Para usarlos es necesario modificar el diseño para que el patrón de la corruga sea compatible con un mango de traslape disponible en el mercado. Una vez diseñado, se debe de imprimir y traslapar varillas de manera de que se forme un solo lance de 1.30 metros de longitud; este debe de ser embebido en una losa de concreto de 70x70x20 cm para lograr realizar el ensayo de adherencia con los intervalos de carga especificado en las normas ASTM C234-91 y IS: 2770 (Part I).

BIBLIOGRAFÍA

- 123RF. (2018). *123RF*. Obtenido de https://es.123rf.com/photo_37703750_la-fabricaci%C3%B3n-de-barras-de-acero-de-refuerzo-para-vigas-y-encofrado-de-madera-las-barras-de.html
- Acciona. (2020). *¿Qué es el desarrollo sostenible?* Obtenido de Acciona: https://www.acciona.com/es/desarrollo-sostenible/?_adin=02021864894
- AceroMundo. (2022). *Acero Mundo*. Obtenido de <https://aceromundo.com.mx/como-evitar-la-corrosion-en-el-acero-en-5-minutos/>
- AICE 25. (18 de Noviembre de 2022). *¿Por que emplear FRP (Polimero Reforzado con Fibra) al momento de realizar un reforzamiento estructural?* Obtenido de AICE 25: <https://aice.cl/web/por-que-emplear-frp-polimero-reforzado-con-fibra-al-momento-de-realizar-un-reforzamiento-estructural-2/>
- ALION. (5 de Mayo de 2023). *Alion Corona* . Obtenido de <https://alion.com.co/por-que-debemos-controlar-la-temperatura-en-una-mezcla-de-concreto-fresco/>
- Amr El-Nemr, E. A. (2023). *Bond performance of fiber reinforced polymer bars in normal- and high-strength concrete*. Obtenido de Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061823016719>
- ANCLAF. (2017). *ANCLAF*. Obtenido de <https://anclaf.com/reforzamiento-estructural-con-fibra-de-carbono/>
- ASTM. (1991). *Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel*. Obtenido de ASTM Designation: C234-91a: chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/13045/dd474f75a207478a9a0fcf1752ecd92d/ASTM-C234-91a.pdf>
- AutoDesk. (2023). *Impresión 3D*. Obtenido de AutoDesk: <https://www.autodesk.mx/solutions/3d-printing>

- Bastidas, L. (18 de Febrero de 2019). *Medium*. Obtenido de <https://medium.com/@2520171108/usos-y-recomendaciones-de-las-estructuras-en-concreto-52be0c61a2e6>
- Berkeley Engineer magazine. (2021). *Bring in the reinforcements*. Obtenido de <https://engineering.berkeley.edu/news/2021/04/bring-in-the-reinforcements/>
- CANDO. (2017). *Bloques CANDO*. Obtenido de <https://bloquescando.com/que-es-el-codigo-de-edificacion/#:~:text=Los%20c%C3%B3digos%20de%20edificaci%C3%B3n%20se,seguridad%20ante%20incendio%20o%20terremotos>).
- Carboneum. (2019). *Carboneum*. Obtenido de <https://www.carboneum.com/es/aplicaciones-fibra-carbono/ing-civil-estructuras#:~:text=Ingenier%C3%ADa%20civil%20y%20estructuras%20con,simples%20y%20de%20menor%20peligro>.
- Castro Composites . (Julio de 2022). *Castro Composites* . Obtenido de <https://castrocomposites.com/informacion-tecnica/propiedades-principales-de-la-fibra-de-carbono/#:~:text=Resistencia%20a%20la%20corrosi%C3%B3n%3A,a%20la%20salinidad%20del%20agua>.
- Ceballos, A. (16 de Junio de 2019). *AndresCeballos2019*. Obtenido de <https://andresceballos2019.wixsite.com/inicio/post/vigas-en-concreto-balanceada-sub-reforzadas-o-sobre-reforzadas>
- CHOC. (2008). *Codigo Hondureño de la Construcción*. Tegucigalpa.
- Chris G. Karayannis, P.-M. K. (2018). *Reinforced Concrete Beams with Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Bars—Experimental Study*. Obtenido de MDPI: <https://www.mdpi.com/2079-6439/6/4/99>
- CivilMac. (Febrero de 2020). *CivilMac*. Obtenido de <https://www.civilmac.com/acero/refuerzo-de-acero-en-vigas-de-hormigon/>

CONSTRUNEIC. (8 de Abril de 2022). *CONSTRUNEIC*. Obtenido de <https://construneic.com/concreto-armado/viga-de-concreto/>

Cuaresma, J. (3 de Abril de 2023). *La Revolución de la Impresión 3D en la Arquitectura*. Obtenido de <https://www.whatsnews.com/2023/04/03/la-revolucion-de-la-impresion-3d-en-la-arquitectura/>

DeAcero. (11 de Febrero de 2020). *DeAcero*. Obtenido de <https://blog.deacero.com/proteccion-contra-la-oxidacion-y-corrosion-en-aceros>

DomingoSerna. (2019). *DomingoSerna*. Obtenido de <https://domingoserna.com/news/ventajas-de-las-estructuras-metalicas/>

Dominguez, N. (2013). *La adherencia en el concreto reforzado: breve revisión histórica de la investigación del fenómeno*. Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguascalientes .

Enago Academy. (2023). *¿Cómo elegir la mejor metodología de investigación para su estudio?* Obtenido de Enago Academy: <https://www.enago.com/es/academy/choose-best-research-methodology/>

ENKONTROL. (23 de Julio de 2019). *ENKONTROL*. Obtenido de <https://enkontrol.com/tipos-de-acero-y-sus-diferentes-usos-en-la-construccion/#:~:text=Acero%20corrugado%3A%20es%20una%20%20%20mina,en%20conjunto%20con%20este%20material.>

Euclid Chemical Toxement. (2023). *Toxement*. Obtenido de <https://www.toxement.com.co/productos/portafolio-productos/reparaci%C3%B3n-vertical-y-sobre-cabeza/fibras-de-carbono-para-reparaci%C3%B3n-estructural/?prodId=1744>

Exsolven. (20 de Junio de 2022). *Exsolven*. Obtenido de <https://exsolven.com.co/diseño-de-una-estructura-metalica/>

FixSupply. (2021). *FixSupply*. Obtenido de <https://www.fixsupply.com/raw-materials/composites/composite-sheets-bars/carbon-fiber-sheets-bars/>

Gomez, N. (2008). *Construcciones Metalicas. Estructuras Livianas de Acero*.

- Indian Standards Institution. (2007). *METHODS OF TESTING BOND IN REINFORCED CONCRETE*. Obtenido de IS : 2770 (Part I) - 1967 (Reaffirmed 2007): chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://law.resource.org/pub/in/bis/S03/iss.2770.1.1967.pdf
- Ingenium . (2022). *Ingenium: Escuela de Formacion Profesional*. Obtenido de <https://ingenium.edu.pe/blog/construccion/que-son-las-estructuras-metalicas-lo-que-necesitas-saber/>
- Ingetek. (30 de Junio de 2023). *Ingetek de Acero* . Obtenido de <https://blog.ingetek.mx/aceros-de-refuerzo-caracteristicas-y-propiedades#:~:text=El%20acero%20de%20refuerzo%20es,y%20estabilidad%20de%20los%20edificios.>
- Iribar, I. (11 de Julio de 2023). *Cómo funciona la impresion 3D en la industria de la construccion*. Obtenido de Cemex Ventures: <https://www.cemexventures.com/es/impresion-3d-en-la-construccion/>
- Itecvál . (11 de Mayo de 2020). *Itecvál*. Obtenido de <https://itecvál.com/refuerzos-estructurales-con-fibra-de-carbono/>
- Jimenez, M. (2005). *Detallado de Acero de Refuerzo en Estructuras de Concreto*. Ciudad de Mexico: Universidad Nacional Autonoma de Mexico.
- Jusung Kim, S. J. (2022). *Bond Strength Properties of GFRP and CFRP according to Concrete Strength*. Obtenido de MDPI: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/20/10611#:~:text=The%20CFRP%20bond%20strength%20was,and%208.76%20MPa%20with%2060%25.>
- Lazcano, R. H. (2015). *Mecanica de Los Materiales*. Obtenido de Instituto Tecnologico de Puebla: <https://www.studocu.com/es-mx/document/instituto-tecnologico-de-puebla/mecanica-de-los-materiales/flexion-vigas/5750476>
- Lune, H., & Berg, B. L. (2017). From a Symbolic Interactionist Perspective. En H. Lune, & B. L. Berg, *Qualitative Research Methods for the Social Sciences* (pág. 17). Pearson.

- Mengual, A., & Martínez, I. (2016). *Urbipedia*. Obtenido de [https://www.urbipedia.org/hoja/Flexi%C3%B3n_\(ingenier%C3%ADa\)](https://www.urbipedia.org/hoja/Flexi%C3%B3n_(ingenier%C3%ADa))
- Molina, J. L. (2013). *Refuerzo a Flexión de Vigas de Hormigón Mediante Polímeros Reforzados con Fibra de Carbono*. Obtenido de Universitat Politècnica de València: <https://riunet.upv.es/handle/10251/27670>
- Moncayo, M. (24 de Noviembre de 2016). *Redalyc*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/467/46750927006/html/#:~:text=La%20fibra%20de%20carbono%20puede%20ser%20utilizada%20para%20reforzar%20vigas,de%20acero%20est%C3%A1n%20muy%20deterioradas.>
- Muñoz, F., & Mendoza, C. J. (Diciembre de 2012). *SciELO Mexico*. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112012000200004#:~:text=La%20durabilidad%20es%20la%20capacidad,previstas%20en%20su%20dise%C3%B1o%20estructural.
- NASA . (9 de Diciembre de 2020). *The National Aeronautics and Space Administration*. Obtenido de <https://www.nasa.gov/image-article/3d-printed-rocket-parts-future-of-spacecraft/#:~:text=Future%20lunar%20landers%20might%20come, costs%20and%20reduce%20production%20time.>
- NRMCA. (2023). *CIP 16 - Resistencia a Flexión del Concreto*. Obtenido de NRMCA: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcglclefindmkaj/https://concretesupplyco.com/wp-content/uploads/2017/01/16pes.pdf>
- Overture3D. (2020).
- Panel. (2019). *Alambre MX*. Obtenido de <https://alambre.com.mx/articulos/importancia-del-acero-de-refuerzo/>
- Parra, S. (4 de Octubre de 2018). *Laminas y Aceros* . Obtenido de <https://blog.laminasyaceros.com/blog/caracter%C3%ADsticas-del-acero-estructural>
- Perez, J., & Merino, M. (19 de Agosto de 2021). *Definición*. Obtenido de <https://definicion.de/compresion/>

PNGWING. (2019). *PNGWING*. Obtenido de <https://www.pngwing.com/es/free-png-svuor>

PRODEL. (2022). *Prodel* . Obtenido de <https://www.prodel.es/subareas/resistencia-de-materiales/#:~:text=La%20resistencia%20de%20un%20elemento,o%20deteriorarse%20de%20alg%C3%BAn%20modo.>

Prusa. (2019).

Ramírez, N. D. (2013). *La adherencia en el concreto reforzado: breve revision historica de la investigacion del fenomeno*. Obtenido de Universidad Autonoma de Aguascalientes: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://biblat.unam.mx/hevila/InvestigacionyCienciaUniversidadAutonomadeAguascalientes/2013/no58/8.pdf>

Saavedra, C. (29 de Octubre de 2016). *SaavedraOnline*. Obtenido de <https://saavedraonline.wordpress.com/2016/10/29/combinaciones-de-acero-de-refuerzo/>

Saavedra, S. (5 de Diciembre de 2019). *LinkedIn*. Obtenido de <https://es.linkedin.com/pulse/corrosi%C3%B3n-en-estructuras-de-acero-sleyter-saavedra-murrieta>

Sambrano, M. (2015). *Concreto Armado* . Guayana: Universidad Catolica Andres Bello .

Sanchez, G. (Octubre de 2019). *Refuerzo Estructural con Fibra de Carbono* . Obtenido de <https://www.masterbrace.es/refuerzo-fibra-carbono/>

Sequeira, J. J. (2018). *INFORME DE ADHERENCIA, LONGITUDES DE DESARROLLO Y EMPALMES*. Obtenido de Universidad Nacional Autonoma de Nicaragua: <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-nacional-autonoma-de-nicaragua-managua/hidraulica-1/informe-de-adherencia-y-longitudes-de-desarrollo-1/6127480>

Universidad de Ingenieria y Tecnologia . (02 de Enero de 2023). *UTEC*. Obtenido de <https://utec.edu.pe/blog-de-carreras/ingenieria-civil/ingenieria-civil-estos-son-seis-de-los-materiales-mas-innovadores-que-se-usan-en-la-industria-de-la-construccion>

Universidad de Piura. (2023). *UDEP*. Obtenido de <https://www.udep.edu.pe/ingenieria/maestria/maestria-integridad-estructural/#:~:text=La%20integridad%20estructural%2C%20est%C3%A1%20definida,condiciones%20seguras%2C%20eficientes%20y%20rentables>.

Vanegas, A. T. (Junio de 2014). *Adherencia de la varilla con la mezcla de concreto obedeciendo a la forma y textura de las gravas de la misma procedencia* . Obtenido de PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA : <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://core.ac.uk/download/pdf/71419315.pdf>

Vestalia . (1 de Enero de 2023). *Vestalia Blog* . Obtenido de <https://vestalia.es/actualidad/que-es-la-fibra-de-carbono-y-para-que-sirve/>

ANEXOS

Anexo 1 - Acta #1 de asesoramiento técnico

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Adherencia de Varillas Impresas en 3D de Filamento de Fibra de Carbono al Concreto de Baja Resistencia

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Leonardo López Moreno	11911330
Marcos David Rivera Lozano	11941174

ASESORAMIENTO		Nº: <u>1</u>
ASESOR: MSC. ING. VÍCTOR ALONZO MARTÍNEZ REYES		
1. Revisar estudios previos de adherencia entre fibra de carbono y concreto hidráulico.		
2. Revisar estudios previos de longitud de desarrollo para elementos reforzados con fibra de carbono.		
3. _____		
4. _____		
 FIRMA DEL ASESOR		SEIIO Fecha: <u>18/10/23</u>

Anexo 2 - Acta #2 de asesoramiento técnico

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Adherencia de Varillas Impresas en 3D de Filamento de Fibra de Carbono al Concreto de Baja Resistencia

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Leonardo López Moreno	11911330
Marcos David Rivera Lozano	11941174

ASESORAMIENTO	Nº: <u>2</u>
ASESOR: MSC. ING. EDUARDO FAVELL NÚÑEZ RODRÍGUEZ	
1. Antes de usar filamento de fibra de carbono es necesario conseguir una boquilla extrusora de acero (o latón) para evitar daños a la impresora.	
2. Un posible proveedor del filamento son C&D Tecnologías	
3. La boquilla debe de ser de 0.4 mm	
4. Filamento necesario es de 1.75 mm	
5. Obtener licencia de programa de diseño (SolidWorks) para comenzar modelado.	
6. Otra alternativa de laboratorio de impresión es el FabLab de la Cámara de Comercio	
 FIRMA DEL ASESOR	SEIIO Fecha: <u>18/10/23</u>

Anexo 3 - Acta #3 de asesoramiento técnico

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Adherencia de Varillas Impresas en 3D de Filamento de Fibra de Carbono al Concreto de Baja Resistencia

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Leonardo López Moreno	11911330
Marcos David Rivera Lozano	11941174

ASESORAMIENTO		Nº: <u>3</u>
ASESOR: MSC. ING. VÍCTOR ALONZO MARTÍNEZ REYES		
1. Recolectar datos acerca de las propiedades del filamento de fibra de carbono para su viabilidad.		
2. <u>Revisar el concepto del proyecto por medio de la ingeniería de valor para verificar su relevancia e importancia.</u>		
3. _____		
4. _____		
5. _____		
 FIRMA DEL ASESOR		SEIIO Fecha: <u>20/10/23</u>

Anexo 4 - Acta #4 de asesoramiento técnico

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Adherencia de Varillas Impresas en 3D de Filamento de Fibra de Carbono al Concreto de Baja Resistencia

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Leonardo López Moreno	11911330
Marcos David Rivera Lozano	11941174

ASESORAMIENTO		Nº: <u>4</u>
ASESOR: MSC. ING. VÍCTOR ALONZO MARTÍNEZ REYES		
1. Cambiar el enfoque del proyecto a un ensayo de extracción de varilla, para descubrir longitud necesaria debido al material de refuerzo.		
2 Investigar la viabilidad de realizar un ensayo de extracción de varilla y el equipo/normas necesarias para hacerlo.		
3 Antes de realizar ensayos compuestos, primero es importante obtener datos de adherencia de los materiales a trabajar.		
4 _____		
5 _____		
 FIRMA DEL ASESOR		SEIIO Fecha: <u>25/10/23</u>

Anexo 5 - Acta #5 de asesoramiento técnico

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Adherencia de Varillas Impresas en 3D de Filamento de Fibra de Carbono al Concreto de Baja Resistencia

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Leonardo López Moreno	11911330
Marcos David Rivera Lozano	11941174

ASESORAMIENTO	Nº: <u>5</u>
ASESOR: MSC. ING. EDUARDO FAVELL NÚÑEZ RODRÍGUEZ	
1. Se puede imprimir la varilla en dos tapas a lo largo de su eje transversal, y juntarlas con epóxico o superglue.	
2 Otra solución para cumplir la longitud necesaria de varilla es derretir la mitad de una varilla y juntarlas una vez derretidas.	
3 Para imprimir una varilla de 6/8, se necesitarían 5 horas de impresión y 100 gramos de material.	
4 _____	
5 _____	
 FIRMA DEL ASESOR	SEIIO Fecha: <u>01/11/23</u>

Anexo 6 - Acta #6 de asesoramiento técnico

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Adherencia de Varillas Impresas en 3D de Filamento de Fibra de Carbono al Concreto de Baja Resistencia

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Leonardo López Moreno	11911330
Marcos David Rivera Lozano	11941174

ASESORAMIENTO	Nº: <u>6</u>
ASESOR: MSC. ING. VÍCTOR ALONZO MARTÍNEZ REYES	
1. Descartar el ensayo de flexión de vigas completamente, ya que los datos obtenidos de él no serían lo suficientemente conclusos sin saber grado de adherencia entre filamento de fibra de carbono y concreto, o resistencia a la tensión de una varilla compuesta del filamento.	
2 Enfocarse en encontrar la manera de realizar algún tipo de ensayo de extracción de varilla, que permita una extracción parcial de la varilla de dentro del núcleo de concreto, por medio de fuerzas aplicadas a ella, ya sea colgando pesos de ella o alguna otra metodología.	
3 _____	
4 _____	
 FIRMA DEL ASESOR	SEIIO Fecha: <u>09/11/23</u>

Anexo 7 - Acta #7 de asesoramiento técnico

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Adherencia de Varillas Impresas en 3D de Filamento de Fibra de Carbono al Concreto de Baja Resistencia

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Leonardo López Moreno	11911330
Marcos David Rivera Lozano	11941174

ASESORAMIENTO		Nº: <u>7</u>
ASESOR: ING. OSCAR RENE SUAZO MORAZÁN		
1.	Al momento de realizar el ensayo de extracción de varilla, aplicar la fuerza con un apoyo que distribuya la fuerza de manera equitativa en todo el núcleo de concreto.	
2.	Una manera de realizar el ensayo es por medio del uso de un gato hidráulico de monotorón, que le aplique la fuerza requerida a la varilla.	
3.	Empresas con acceso a equipo de postensado son Postensa y Williams y Molina	
4.	_____	
5.	_____	
 FIRMA DEL ASESOR		SEIIO
		Fecha: <u>09/11/23</u>

Anexo 8 - Acta #8 de asesoramiento técnico

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Adherencia de Varillas Impresas en 3D de Filamento de Fibra de Carbono al Concreto de Baja Resistencia

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Leonardo López Moreno	11911330
Marcos David Rivera Lozano	11941174

ASESORAMIENTO		Nº: <u>8</u>
ASESOR: MSC. ING. EDUARDO FAVELL NÚÑEZ RODRÍGUEZ		
1. Las varillas de filamento de fibra de carbono deben de ser impresas en patrones que sean fuertes cargados a tensión, entonces debe procurarse imprimir en líneas rectilíneas.		
2 _____		
3 _____		
4 _____		
5 _____		
 FIRMA DEL ASESOR		SEIIO Fecha: <u>20/11/23</u>

Anexo 9 - Acta #9 de asesoramiento técnico

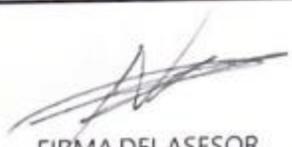
ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Adherencia de Varillas Impresas en 3D de Filamento de Fibra de Carbono al Concreto de Baja Resistencia

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Leonardo López Moreno	11911330
Marcos David Rivera Lozano	11941174

ASESORAMIENTO		Nº: <u>9</u>
ASESOR: ING. NEFTALI GONZÁLES		
1.	Antes de realizar el ensayo de extracción es necesario conocer la resistencia a tracción de la varilla, para que la maquina aplique carga <u>antes del límite y se eviten accidentes.</u>	
2.	Para usar el gato hidráulico disponible con los equipos de Geotécnica Soluciones, se deben de diseñar las varillas de manera enroscadas, y usar mango de traslape para enroscar varillas impresas hasta lograr alcanzar una longitud de un metro treinta.	
3.	Las lecturas se deben de tomar en intervalos definidos como <u>porcentajes de la carga máxima aplicable a la varilla.</u>	
4.	La varilla debe de ser fundida en una losa de 70x70x20 cm.	
5.		
 FIRMA DEL ASESOR		SEIIO Fecha: <u>29/11/23</u>

Anexo 10 - Acta #10 de asesoramiento técnico

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Adherencia de Varillas Impresas en 3D de Filamento de Fibra de Carbono al Concreto de Baja Resistencia

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Leonardo López Moreno	11911330
Marcos David Rivera Lozano	11941174

ASESORAMIENTO		Nº: <u>10</u>
ASESOR: ING. DANIEL ALEJANDRO RAMOS		
1.	Para realizar el ensayo de manera rudimentaria, se puede comisionar una pieza con un herrero que se cierre entre más peso se le aplica, pero se debe de dimensionar y se tienen que diseñar los dientes que la ayudarían a morder la varilla.	
2.	Se pueden utilizar piezas ajustadas con el diámetro de la varilla que se puedan socar con pernos para luego colgar de ella un laso.	
3.	Con nudos de sogas, se podrían colgar pesas de la varilla, apoyando el cilindro en una viga de una presa hidráulica, la cual primero debe de ser perforada.	
4.	_____	
5.	_____	
FIRMA DEL ASESOR		SEIIO
		Fecha: <u>01/12/23</u>