



! POSGRADOS !

MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA CON MENCIÓN EN DISEÑO DE ESTRUCTURAS METÁLICAS EN OBRAS CIVILES E INDUSTRIALES

RPC-SO-24-NO.540-2020

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON COMPONENTES DE
INVESTIGACIÓN APLICADA Y/O DE DESARROLLO

TEMA:

DETERMINACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO CUASISTÁTICO DE
UNA VIGA DE HORMIGÓN ARMADO DE
SECCIÓN HOMOLOGADA CON
ADHESIÓN DE FIBRA DE VIDRIO
MEDIANTE SOFTWARE ESPECIALIZADO

AUTOR(ES)

LUIS DANIEL CÓRDOVA NARVÁEZ
JOSÉ MANUEL QUICHIMBO QUICHIMBO

DIRECTOR:

JONNATHAN DARÍO SANTOS BENÍTEZ

CUENCA – ECUADOR
2023

Autor(es):**Luis Daniel Córdova Narváez**

Ingeniero Mecánico

Candidato a Magíster en Ingeniería Mecánica con mención en Diseño De Estructuras Metálicas En Obras Civiles E Industriales por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

lcordova@est.ups.edu.ec

**José Manuel Quichimbo Quichimbo**

Ingeniero Mecánico

Candidato a Magíster en Ingeniería Mecánica con mención en Diseño De Estructuras Metálicas En Obras Civiles E Industriales por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

jquichimboq@est.ups.edu.ec

Dirigido por:**Jonnathan Darío Santos Benítez**

Ingeniero Mecánico

Magister en mecánica de materiales y estructuras.

jsantos@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2023 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA– ECUADOR – SUDAMÉRICA

Luis Daniel Córdova Narváez – José Manuel Quichimbo Quichimbo

Determinación del comportamiento cuasiestático de una viga de hormigón armado de sección homologada con adhesión de fibra de vidrio mediante software especializado

DEDICATORIA

Con gran emoción y gratitud, dedico mi tesis a Dios, quien ha sido la fuerza que me ha impulsado y guiado en este arduo camino hacia el logro de este importante hito profesional.

A mis queridos padres, Luis y Fabiola, les dedico este trabajo con todo mi amor y admiración. Su apoyo incondicional, aliento constante y sacrificio incansable han sido los pilares fundamentales que me han permitido llegar hasta aquí.

A mis amadas hermanas y a mi querida familia en general, les dedico este logro con alegría y agradecimiento. Su presencia, cariño y apoyo constante han sido una fuente inagotable de motivación.

Por último, dedico esta tesis a mis amados abuelos, quienes desde el cielo siguen siendo mi guía y ejemplo a seguir. Aunque ya no estén físicamente conmigo, siento su presencia en cada paso que doy. Agradezco por su legado y por haberme enseñado la importancia del esfuerzo y la dedicación.

Luis Córdova

El presente trabajo dedico a la memoria de mi abuelito José, a quien le debo todo lo que soy como persona, por enseñarme el valor del trabajo y esfuerzo con tu ejemplo de vida. Gracias abuelito porque siempre creíste en mí.

José Manuel Quichimbo

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, doy gracias a Dios por guiar mis pasos y brindarme la fortaleza y determinación necesarias para superar los desafíos en este camino académico. Su presencia en mi vida ha sido mi mayor inspiración y sostén.

A mis queridos padres, quiero expresarles mi gratitud infinita por su paciencia, apoyo incondicional y amor inquebrantable. Han sido mi pilar fundamental en cada etapa de mi vida, y este logro no habría sido posible sin su constante aliento y sacrificio. Gracias por creer en mí y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A mi amada familia, les agradezco de corazón por su comprensión, ánimo y alegría compartida en cada paso de este camino. Su presencia ha sido una fuente de inspiración y consuelo en los momentos más desafiantes. Gracias por ser mi refugio y mi fuerza.

A mis distinguidos profesores de posgrado, quiero expresar mi más profundo reconocimiento por su sabiduría, guía y dedicación en mi formación académica. Sus enseñanzas y mentoría han sido fundamentales en mi crecimiento profesional.

A mi tutor, Jonnathan Santos, quiero agradecerle de manera especial por su paciencia, compromiso y perseverancia. Su guía constante y apoyo incondicional han sido determinantes en la finalización exitosa de este trabajo.

A mis compañeros de carrera y amigos, gracias por ser parte de este viaje académico y por compartir risas, experiencias y momentos inolvidables. Su compañerismo y aliento han sido un estímulo constante en este camino hacia la meta.

Luis Córdova

A Dios, por la oportunidad de vivir y por su presencia en cada paso, por la fortaleza para desafiar la vida todos los días.

A mi madre Rosario, por darme la vida ser mi amiga y compañera, enseñarme el valor de la humildad y por su amor infinito.

A mi padre Jorge, por sus valores, confianza y consejos, con vuestro cariño ha sido mucho más fácil afrontar los retos de la vida.

A mi tutor, Jonnathan Santos, por su gran ayuda y colaboración en el desarrollo de esta investigación, por el soporte técnico y acompañamiento.

A mi compañero de Tesis Daniel Córdova, gracias por toda la paciencia, apoyo y perseverancia brindada en el transcurso de esta etapa de formación, gracias por tu tiempo compartido

José Manuel Quichimbo

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Introducción | 11 |
| 2. | Determinación del Problema..... | 12 |
| 2.1 | Problema General..... | 13 |
| 2.2 | Problemas específicos | 14 |
| 3. | Objetivos..... | 14 |
| 3.1 | Objetivo General..... | 14 |
| 3.2 | Objetivos Específicos | 14 |
| 4. | Marco teórico referencial..... | 15 |
| 4.1 | Materiales estructurales en la construcción | 15 |
| 4.1.1 | Acero | 15 |
| 4.1.2 | Comportamiento del acero en tensión y compresión..... | 16 |
| 4.1.3 | Hormigón..... | 19 |
| 4.1.4 | Comportamiento del hormigón en tensión y compresión..... | 20 |
| 4.1.5 | FRP | 22 |
| 4.1.6 | Disposición de refuerzo FRP en la viga de hormigón armado. | 23 |
| 4.2 | Flexión en vigas de hormigón armado con FRP..... | 25 |
| 4.3 | Ley cohesiva..... | 27 |
| 4.4 | Contracción del hormigón | 28 |
| 4.5 | Simulación mediante elementos finitos de vigas sometidas a flexión con FRP. | 29 |
| 4.3.1 | Variable de daño de tensión y compresión..... | 30 |
| 5. | Materiales y metodología de investigación | 32 |
| 5.1 | Tipo, diseño y nivel de investigación | 32 |
| 5.2 | Método de investigación | 33 |
| 5.3 | Determinación de la muestra | 33 |
| 5.4 | Diseño de la investigación. | 34 |
| 5.5 | Propiedades de los materiales | 35 |
| 5.5.1 | Acero | 35 |
| 5.5.2 | Hormigón..... | 35 |
| 5.5.3 | Polímero reforzado con fibra de vidrio GFRP | 36 |
| 5.6 | Configuración del modelo numérico | 37 |

| | |
|---|----|
| 5.7 Validación del modelo numérico y exploración del comportamiento con barras de fibra de vidrio. | 40 |
| 6. Resultados y Discusión | 41 |
| 6.1 Resultados del modelo numérico de validación (CB)..... | 41 |
| 6.2 Resultados de la simulación del caso GFRP..... | 42 |
| 7. Conclusiones..... | 44 |
| 8. Referencias | 47 |
| 9. ANEXOS..... | 52 |
| 9.1 Anexo 1. | 52 |

LISTADO DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Comportamiento a tensión del acero..... | 17 |
| Figura 2. Comportamiento a compresión del acero. | 19 |
| Figura 3. Curva de esfuerzo-deformación del hormigón en tensión. | 20 |
| Figura 4. Curva de esfuerzo-deformación del hormigón en compresión. | 22 |
| Figura 5. Relación tensión-deformación cuando fibra de vidrio tiene deformación de rotura inferior a matriz. | 22 |
| Figura 6. Disposición de FRP sobre viga de hormigón armado. | 24 |
| Figura 7. Disposición de las láminas de FRP sobre vigas de hormigón armado..... | 24 |
| Figura 8. Orientación de la fibra Bidireccional. | 25 |
| Figura 9. Diagrama Momento-Curvatura de viga con y sin refuerzo externo de FRP..... | 27 |
| Figura 10. Modelo de fisura cohesiva: (a) zona proceso de fractura, (b) zona de fractura, (c) relación esfuerzo - deformación fuera de la zona de fractura (punto P) y (d) relación esfuerzo - deformación en interior zona de fractura (punto P)..... | 28 |
| Figura 11. Estudio Comportamiento de contracción del hormigón..... | 29 |
| Figura 13. Esquema del modelo tridimensional..... | 38 |
| Figura 14. Modelo tridimensional en el Software..... | 38 |
| Figura 15. Condiciones de contorno..... | 39 |
| Figura 16. Mallado de geometría. | 40 |
| Figura 17. Resultados numéricos publicados y obtenidos del modelo FE de validación. | 41 |

Figura 18. Comparación de los resultados publicados y obtenidos de la viga de hormigón reforzada con FRP..... 42

Figura 19. Resultados de la simulación de los casos CB y GFRP..... 43

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de varillas corrugadas ASTM A36 de proveedor DIPAC. 16

Tabla 2. Propiedades del acero estructural ASTM A36. 35

Tabla 3. Selección del hormigón..... 36

Tabla 4. Propiedades del hormigón..... 36

Tabla 5. Propiedades de barras de FRP. 37

Tabla 6. Propiedades del FRP. 37

Tabla 8. Resultados obtenidos luego de la simulación..... 42

Tabla 9. Resultados de CB y GFRP. 43

Tabla A 1. Características de resistencia y deformación del hormigón. 52

DETERMINACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO
CUASISTÁTICO DE UNA VIGA DE
HORMIGÓN ARMADO DE SECCIÓN
HOMOLOGADA CON ADHESIÓN DE
FIBRA DE VIDRIO MEDIANTE
SOFTWARE ESPECIALIZADO

AUTOR(ES):

LUIS DANIEL CÓRDOVA NARVÁEZ

JOSÉ MANUEL QUICHIMBO QUICHIMBO

RESUMEN

En este documento, se presenta un caso de estudio acerca del comportamiento cuasi estático de una viga de hormigón armado de sección homologada con la adhesión de fibra de vidrio reforzando resina epóxica (FRP) mediante software especializado, el estudio incluye revisión bibliográfica, planteamiento de modelo numérico y el desarrollo de campaña de la simulación. Para ello se llevó a cabo un análisis estático de elementos finitos (FE) de dos configuraciones de vigas partiendo de un modelo tridimensional, la primera viga corresponde a la de control (**CB**) y consta únicamente de hormigón armado, mientras que la segunda viga (**GFRP**) se estudia el comportamiento con barra de fibra de vidrio reforzando resina epóxica (*Glass fiber reinforced polymer*), GF sujetas a cargas en cuatro puntas para luego ser validado con los datos obtenidos en la bibliografía.

Los resultados obtenidos demuestran que el modelo numérico, es capaz de predecir con precisión el comportamiento de una viga de hormigón armado y reforzada con FRP de GF bajo cargas de flexión.

Palabras claves: FRP; Cuasiestático; Fibra de vidrio; Refuerzo; Concreto reforzado; Simulación.

ABSTRACT

In this document presents a case study on the quasi-static behavior of a reinforced concrete beam with a homologous section, reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) using epoxy resin adhesion, through specialized software. The study includes a literature review, numerical model formulation, and simulation campaign development. To this end, a finite element (FE) static analysis of two beams was carried out, starting with a three-dimensional model configuration. The first beam corresponds to the validation beam (CB) and consists solely of reinforced concrete, while the second beam (GFRP) studies the behavior of a glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bar reinforced with epoxy resin under four-point loads and is subsequently validated with the data obtained from the literature. The results obtained demonstrate that the numerical model is capable of accurately predicting the behavior of a reinforced concrete beam reinforced with GFRP under flexural loads.

Keywords: FRP; Quasistatic; Fiberglass; Booster; Reinforced concrete; Simulation.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el mundo se desarrolla a pasos agigantados, de la mano con las nuevas tecnologías y materiales, evoluciona y mejora las condiciones de vida de las personas que lo habitan. Por ejemplo, en el campo de las edificaciones un área que si bien es cierto ha conservado su metodología y propósito de trabajo, las herramientas y materiales utilizados ha sufrido grandes cambios, este último sobre todo ha explorado innumerables apariciones de nuevos materiales y combinaciones entre estos.

Partiendo de la necesidad de restaurar estructuras antiguas, en algunos países como Estados Unidos; se presentó un caso en donde se reemplazaron entre 250,000 a 578,000 tableros de puentes, se encontraron una gran variedad de productos basados en materiales compuestos de polímero reforzado con fibra (FRP), entre los más relevantes se encuentran el tejido unidireccional CFK y CARBODUR, tendones ARAPREE, las varillas tipo SPIFLEX, los tendones JONC J. T. y el tejido TFC (Landeta, 2019).

De manera local existen proyectos de restauración de algunas infraestructuras arquitectónicas, por ejemplo; el centro histórico de la ciudad de Cuenca, la UNESCO (UNESCO, 2022), reconoció como Patrimonio Cultural de la Humanidad el 1 de diciembre de 1999 y, por lo tanto hacer intervenciones de mantenimiento en estas edificaciones tienen que ser mínimamente invasivas a su vez de garantizar calidad y resistencia de las misma requiriendo, además, que se mantenga armonía de la infraestructura. Los FRP son materiales que representan alternativas de refuerzo para columnas y vigas en estos casos.

Por otro lado, cuando se plantea realizar estos tipos de trabajos de mantenimiento en lugares con ambientes expuestos, contaminantes, corrosivos, etc. Existen propuestas de FRP como material de refuerzo en fibra de vidrio (GF) ya que sus propiedades son compatibles y altamente resistentes para este tipo de entornos.

Uno de los inconvenientes que se pueden presentar en la incorporación de estos nuevos materiales y metodologías, por lo general es la falta de información o datos técnicos que garanticen el desempeño del nuevo material, el campo científico se ve en la obligación de generar estos soportes técnicos mediante revisión bibliográfica, simulación, realización de ensayos y/o lo necesario para asegurar la veracidad de la información.

En base a los comentarios anteriores, en la presente investigación se realizó un análisis del comportamiento de las fibras cerámicas en una viga simplemente apoyada de hormigón armado, sometiendo a cargas de flexión. Para ello, se utilizará un software especializado para simular la situación y se analizarán los resultados obtenidos para llegar a conclusiones significativas, coincidentes con los reportados en la bibliografía.

2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

Los materiales compuestos se empiezan a estudiar después de la segunda guerra mundial, dichos materiales compuestos desempeñan funciones importantes en el campo de la ingeniería por su excelente comportamiento, adicionalmente, se implementan en otros campos como la construcción civil. Japón se enfoca en la prefabricación y refuerzos contra eventos sísmicos; en América del Norte se trabaja en la durabilidad de las construcciones y, en Europa, se encaminan los estudios a la rehabilitación de infraestructuras y de edificaciones patrimoniales (Lawrence C. Bank, 2006).

Los primeros ensayos de estructuras con polímeros reforzados con fibras (Fiber Reinforced Polymer) adheridas exteriormente, se llevaron a cabo en 1984 en centros de investigación como el "*Swiss Federal Laboratories for Material Testing and Research*" en Suiza, "*Federal Institute for Material Testing*" en Estados Unidos y el "*Institute for Building Materials, Concrete Construction and Fire Protection*" en Alemania (Lawrence C. Bank, 2006).

En Europa, el uso del FRP como sistema de refuerzo tuvo su inicio en la década de 1980, específicamente en el puente Kattenbush en Alemania, donde se aplicó entre 1986 y 1987. Posteriormente, a partir de 1991, se reforzaron casi 250 estructuras en Suiza, incluyendo el puente "*Ibach Bridge*". La publicación de los primeros documentos de construcción y recomendaciones de sistemas CFRP en Alemania y Suiza en 1994, generó un aumento en la confianza a nivel de producción, diseño y aplicación, lo que extendió su uso a la rehabilitación de edificios históricos en varios países europeos. (Urs Meier, 1999)

En el caso de Latinoamérica, estos materiales compuestos han sido utilizados para reforzar elementos de concreto en edificaciones, sin embargo, no se ha desarrollado lo suficiente. Una de las razones de este atraso podría estar directamente relacionado a la falta de conocimiento de los ingenieros con respecto a las propiedades y el comportamiento del material, debido a que se desconocen sus ventajas y desventajas, así como también se piensa que el uso de materiales compuestos representa altos costos que les impiden ser competitivos en el mercado. (Rolando Castillo, 2021)

En Ecuador luego del evento sísmico de 7,8 grados, registrado el día 16 de abril del año 2016 en Pedernales se pudo observar que las edificaciones de la ciudad Manta - Provincia de Manabí fueron gravemente afectadas, en muchas de las estructuras se visualizan daños como fisuras, fracturas, fracaso de mampostería ubicadas en múltiples posiciones, además, se constató que ciertos elementos estructurales fallaron. Bajo este antecedente propone una alternativa reconstructiva el uso de fibras reforzadas con polímeros para la recuperación, restauración y fortalecimiento de estructuras (Aguiar et al., 2016).

2.1 Problema General

¿Es posible determinar del comportamiento cuasi estático de una viga de hormigón armado de sección homologada con adhesión de fibra de vidrio mediante software especializado?

2.2 Problemas específicos

- a. ¿Existe información del estado del arte sobre el análisis numérico y experimental cuasi estático de vigas de hormigón armado reforzadas con fibra de vidrio?
- b. ¿Se puede plantear el modelo de simulación conforme las condiciones establecidas en la normativa para el análisis de vigas simplemente apoyada con adhesión de fibra de vidrio?
- c. ¿Es factible desarrollar la campaña de simulación numérica en ensayo cuasi estático bajo diferentes escenarios de disposición del elemento de refuerzo mediante software comercial?

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Determinar el comportamiento cuasi estático de una viga de hormigón armado de sección homologada con adhesión de fibra de vidrio mediante software especializado

3.2 Objetivos Específicos

- Revisar el estado del arte del análisis numérico y experimental cuasi estático de vigas de hormigón armado reforzadas con fibra de vidrio.
- Plantear el modelo de simulación conforme las condiciones establecidas en la normativa para el análisis de vigas simplemente apoyada con adhesión de fibra de vidrio.
- Desarrollar la campaña de simulación numérica en ensayo cuasi estático bajo diferentes escenarios de disposición del elemento de refuerzo mediante software comercial.

4. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

4.1 Materiales estructurales en la construcción

En la construcción, los materiales son esenciales para determinar la resistencia, durabilidad y seguridad de las estructuras, entre los materiales más utilizados se encuentran el acero, el hormigón y los materiales compuestos reforzados con fibra. El acero se caracteriza por su gran resistencia y durabilidad, se los utiliza en la construcción de edificios de gran altura y puentes. El hormigón, compuesto de cemento, agua y agregados, es utilizado en la construcción de cimientos, muros y estructuras de soporte. Los materiales compuestos reforzados con fibra (FRP), se los aplica en construcción de puentes, muelles y otros tipos de estructuras que requieren flexibilidad, gracias a su resistencia y durabilidad en relación a su peso y tamaño. Cada material tiene sus propias características y aplicaciones específicas, y es importante seleccionar el material adecuado para cada proyecto de construcción (Mónica Nitoiu Soto, 2018).

4.1.1 Acero

El acero es comúnmente empleado en la edificación por la solidez y larga duración, desde el punto de vista químico, el acero es una mezcla de hierro y carbono, incluye otros componentes como níquel (Ni), cromo (Cr), molibdeno (Mo) y vanadio (V), según la función para la que se empleará. La fórmula química del acero se representa por el hierro y el carbono (Fe-C), y su concentración de carbono puede oscilar entre el 0,2% y el 2,1% en peso. (Jack, 2013)

Debido a su versatilidad, el acero puede ser moldeado en múltiples formas y dimensiones como vigas, columnas, marcos, techos y paredes. Además, puede ser sometido a procesos de galvanizado o recubrimiento con otros elementos para aumentar su capacidad de resistir las corrosiones, (FRANCISCO JAVIER CRISAFULLI, 2018).

Para garantizar la calidad y la seguridad del acero utilizado en la construcción, existen normas y especificaciones técnicas establecidas por organizaciones como la American Society for Testing and Materials (ASTM), especifican los requisitos mínimos que debe cumplir el acero en términos de su composición química, propiedades mecánicas y métodos de prueba. En la norma ASTM para el tipo de acero al carbono de calidad estructural como ASTM A36, establece los requisitos para utilizar en la construcción de edificios y puentes; para el acero ASTM A572, especifica los requisitos para el acero de alta resistencia utilizado en estructuras de carga pesada, como puentes y torres de energía; y la ASTM A615, establece los requisitos para el acero utilizado en la construcción de refuerzo de hormigón. Para el presente caso de estudio se plantea trabajar con acero ASTM A36, de proveedor DIPAC, en la Tabla 1, se muestran propiedades de las varillas corrugadas comerciales utilizadas en el medio nacional.

Tabla 1. Tipos de varillas corrugadas ASTM A36 de proveedor DIPAC.
Fuente: (DIPAC, 2022)

| Denominación | Diámetro | | Peso | | Área |
|--------------|----------|------|-------|-----------------|------|
| | D | kg/m | kg/6m | cm ² | |
| VRL 5,5 | 5.5 | 0.34 | 2.04 | 0.43 | |
| VRL 8 | 8.0 | 0.50 | 2.96 | 0.63 | |
| VRL 10 | 10.0 | 0.62 | 3.70 | 0.79 | |
| VRL 12 | 12.0 | 0.89 | 5.33 | 1.13 | |
| VRL 15 | 15.0 | 1.39 | 8.32 | 1.77 | |
| VRL 18 | 18.0 | 2.00 | 11.98 | 2.55 | |
| VRL 22 | 22.0 | 2.98 | 17.90 | 3.80 | |
| VRL 24,5 | 24.0 | 3.70 | 22.20 | 4.71 | |

4.1.2 Comportamiento del acero en tensión y compresión

Comportamiento a tensión

El acero presenta un comportamiento mecánico lineal-elástico hasta alcanzar el límite elástico, después de este punto, el acero se deforma plásticamente y su comportamiento se vuelve no lineal sin aumento de carga, el comportamiento termina

cuando experimenta fractura. Las Ecuaciones (1), (2) y (3) describen el comportamiento elástico del acero, mientras que la curva de esfuerzo-deformación del acero a tensión se muestra en la (Figura 1), (Elkholy, 2017)

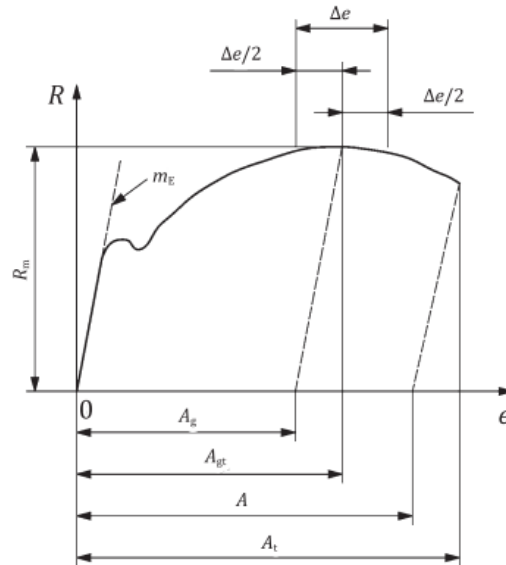


Figura 1. Comportamiento a tensión del acero.
Fuente: (Karka et al., 2023)

Donde:

- A Porcentaje de elongación después de la fractura.
- Ag Porcentaje de extensión plástica de la fuerza máxima
- Agt Porcentaje de extensión total a la fuerza máxima
- At Porcentaje de extensión total en la fractura
- E Extensión porcentual
- Me Pendiente de la parte elástica de la curva de extensión de porcentaje de tensión
- R Estrés
- Rm Resistencia a la tracción
- Δe Extensión de curva máxima.

Ecuación de esfuerzo del acero a tensión σ_t :

$$\sigma_t = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

F Fuerza aplicada
 A_0 Sección inicial

Ecuación de esfuerzo a flexión el acero σ_f :

$$\sigma_f = \frac{M.c}{I} \quad (2)$$

F Momento flector
 A_0 Posición del centroide.
 I Momento de inercia.

Ecuación de deformación del acero ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

ΔL Variación de longitud
 L_0 Longitud inicial

Comportamiento a compresión

En compresión el acero se deforma elásticamente hasta el límite elástico de acuerdo a la ecuación 4, después experimenta deformación plástica y su resistencia a la compresión aumenta lentamente hasta que alcanza su punto de fluencia (Karka et al., 2023). La curva de esfuerzo-deformación describe compresión sin aumento de carga que termina en punto de falla como muestra la (Figura 2).

Ecuación de esfuerzo a compresión del acero σ_c :

$$\sigma_c = \frac{F}{A_0} \quad (4)$$

F Fuerza aplicada
 A_0 Sección inicial

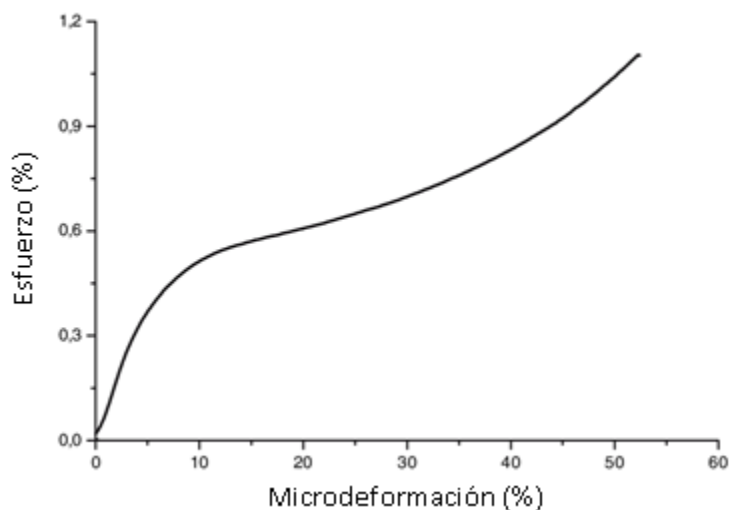


Figura 2. Comportamiento a compresión del acero.
Fuente: (Karka et al., 2023)

4.1.3 Hormigón

Compuesto por cemento, agua, agregados y aditivos se utiliza en la construcción de vigas de hormigón, resistente a compresión y flexión. La calidad del hormigón depende de la proporción y las propiedades de los componentes, así como de la técnica de mezcla y colocación, sin embargo, se refuerza con barras de acero para mejorar la resistencia a la tracción, esta unión se conoce como hormigón armado (Banham, 1989).

En los Estados Unidos, la Asociación Estadounidense de Concreto (ACI) establece normas y guías para el diseño, construcción y prueba del hormigón en la industria de la construcción. Las normas de la ACI, como la ACI 318, incluyen requisitos para el diseño de estructuras de hormigón armado, como vigas y otros elementos estructurales (Randall W. Poston, 2014)

El Eurocódigo es un conjunto de normas utilizado en la construcción y el diseño de estructuras en la Unión Europea. El Eurocódigo 2 se enfoca en el diseño de estructuras de hormigón, incluyendo vigas, y establece requisitos para el diseño y la prueba de elementos estructurales de hormigón, como la resistencia a la tracción y la flexión (Eurocodigo 2, 2013).

4.1.4 Comportamiento del hormigón en tensión y compresión

El comportamiento del hormigón a tensión y compresión puede ser descrito mediante las curvas de esfuerzo-deformación, que muestran la relación entre la carga aplicada y la deformación resultante del material.

Comportamiento del hormigón a tensión.

En tensión, el hormigón tiene una baja capacidad para resistir la tracción y su comportamiento es no lineal y no elástico, la curva de esfuerzo deformación del hormigón en tensión muestra una zona inicial lineal, seguida por una zona de endurecimiento, una zona de rotura y una zona de post rotura. El esfuerzo máximo que el hormigón puede soportar en tensión se conoce como la resistencia a la tracción. El valor típico de la resistencia a la tracción del hormigón es de aproximadamente 10% de su resistencia a la compresión. La (Figura 3), muestra la curva de esfuerzo-deformación del hormigón en tensión, con valores típicos de esfuerzo y deformación (Randall W. Poston, 2014).

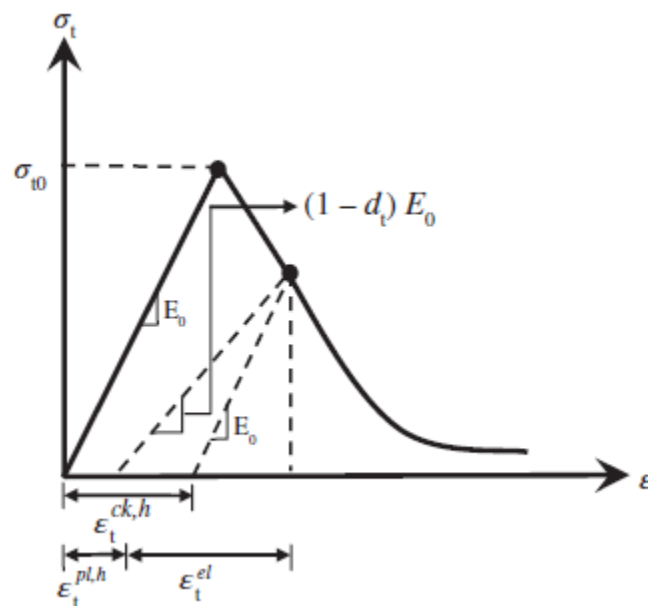


Figura 3. Curva de esfuerzo-deformación del hormigón en tensión.
Fuente: (Randall W. Poston, 2014, p. 318)

La ecuación 5, describe el comportamiento de tensión trazado en la figura anterior, donde, relaciona la variable de resistencia a compresión y la tensión de tracción media.

$$\sigma_{ct} = 3 - \frac{12.5}{f_{cm}^{0.5}} + 1.76 \cdot e^{-\varepsilon m} \quad (5)$$

Donde:

- σ_{ct} Esfuerzo a tensión
 f_{cm} Es la resistencia media a la compresión
 εm Es la tensión de tracción media

Comportamiento del hormigón a compresión.

El comportamiento es lineal y elástico hasta el punto de fluencia, seguido por una zona de endurecimiento y una zona de rotura. El esfuerzo máximo que el hormigón puede soportar en compresión se conoce como la resistencia a la compresión. El valor típico de la resistencia a la compresión del hormigón es de aproximadamente 10 veces su resistencia a la tracción. La figura 4, muestra la curva de esfuerzo-deformación del hormigón en compresión y se describen mediante la ecuación 6, (Randall W. Poston, 2014).

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \quad (6)$$

Donde:

- σ_c Esfuerzo a compresión
 ε_c Es la deformación a compresión
 E_{cm} Es el módulo de elasticidad del concreto
 f_{cm} Valor medio de la resistencia a la compresión del cilindro de hormigón.
 $\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$
 ε_{c1} Deformación en la tensión máxima según la Tabla A1, del ANEXO 1:
 $k = 1.05 E_{cm} \times |\varepsilon_{c1}| / f_{cm}$

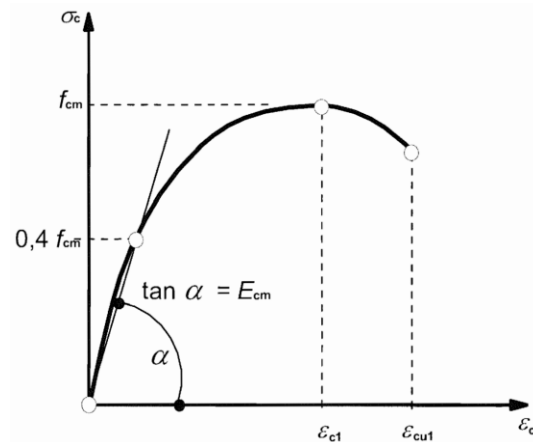


Figura 4. Curva de esfuerzo-deformación del hormigón en compresión.
Fuente: (Randall W. Poston, 2014, p. 318)

4.1.5 FRP

Los materiales compuestos reforzados con fibra (FRP), son utilizados en la construcción y la ingeniería civil para reforzar o reparar estructuras de hormigón, acero y mampostería. Consisten en una matriz polimérica que se refuerza con fibras de vidrio, carbono, aramida u otros materiales (ACI PRC-440.3-12, 2022).

Las propiedades mecánicas del compuesto FRP depende de la relación de composición de sus componentes, la matriz transmite la carga a las fibras que presentan mejores prestaciones de términos de resistencia y rigidez. En la Figura 5 se observa el comportamiento de cada componte (ACI PRC-440.1-15, 2022).

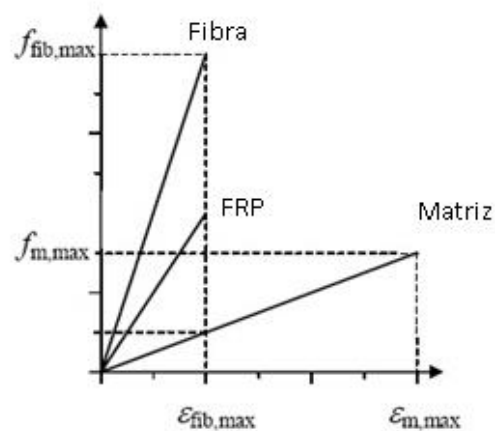


Figura 5. Relación tensión-deformación cuando fibra de vidrio tiene deformación de rotura inferior a matriz.
Fuente: (ACI PRC-440.3-12, 2022, p. 44)

Existen varios tipos de FRP, con propiedades y características de rendimiento independientes (Hernández, 2020). Los tipos más comunes son los siguientes:

- FRP de fibras de vidrio: son los más utilizados en la construcción, debido a su bajo costo, alta resistencia a la corrosión y la facilidad de instalación.
- FRP de fibras de carbono: tienen una alta resistencia a la tracción y la fatiga, y son más livianos y delgados que los FRP de fibras de vidrio.
- FRP de fibras de Aramida: también conocidos como Kevlar, son muy resistentes y tienen una alta resistencia a la penetración y al impacto.

La utilización de los FRP en la construcción ha llevado a la elaboración de normas y estándares para su diseño y aplicación. Las normas más utilizadas son las siguientes:

- ACI 440.2R-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (Guía para el diseño y la construcción de sistemas FRP adheridos externamente para reforzar estructuras de hormigón).
- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 9th Edition: esta norma se enfoca en el diseño de puentes con materiales compuestos, incluyendo FRP.
- ASTM D7205-19: Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars (Método de prueba estándar para propiedades a tracción de barras compuestas con matriz polimérica reforzada con fibra).

4.1.6 Disposición de refuerzo FRP en la viga de hormigón armado.

La disposición de refuerzo de FRP en vigas de hormigón se utiliza para mejorar capacidad de carga y resistencia a flexión, dependerá del tipo de proyecto, es importante seguir las normas y recomendaciones establecidas para una correcta instalación y funcionamiento. Las configuraciones de refuerzo con FRP pueden ser en forma de láminas o de barras. Las láminas de FRP se colocan en la parte inferior de la viga y se extienden a lo

largo de toda su longitud. En cambio, las barras de FRP se colocan en la parte inferior de la viga y se fijan en las caras de la viga (Figura 6). Ambas configuraciones tienen la ventaja de tener una alta resistencia a la tracción y una buena capacidad de adhesión con el hormigón (ACI PRC-440.1-15, 2022, p. 44).

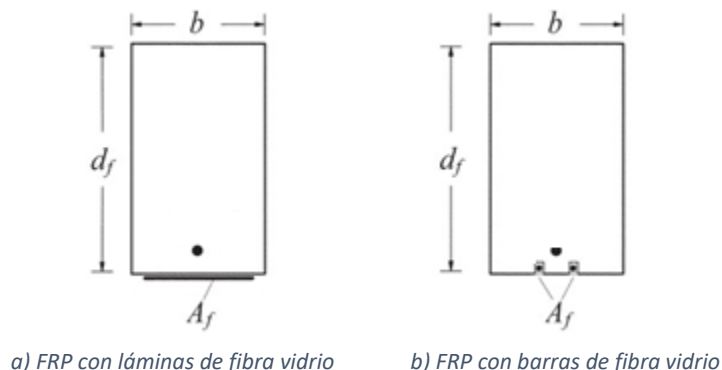


Figura 6. Disposición de FRP sobre viga de hormigón armado.
Fuente: (ACI PRC-440.1-15, 2022, p. 44)

La disposición de las láminas de FRP puede ser en forma de "U" o de "L" o de envoltura completa. En el caso de las vigas en forma de "U" o "L", se puede utilizar una disposición de láminas en la parte superior e inferior de la viga para reforzar la resistencia a la flexión y la cortante (Figura 7a). En cuanto a la envoltura completa, se trata de una disposición en la que se aplican láminas de FRP alrededor de toda la sección transversal de la viga para proporcionar un refuerzo integral (Figura 7b). Esta disposición se utiliza comúnmente en vigas de sección circular o en arcos (ACI PRC-440.1-15, 2022).

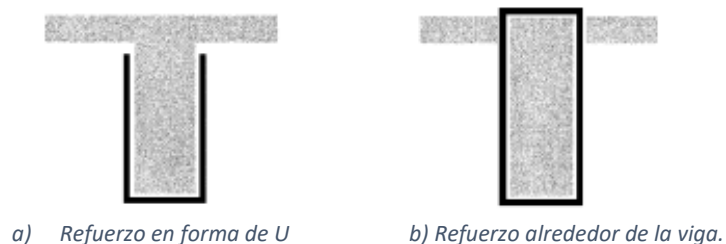


Figura 7. Disposición de las láminas de FRP sobre vigas de hormigón armado.
Fuente: (ACI PRC-440.1-15, 2022, p. 44)

La orientación de las fibras en los materiales compuestos FRP es un factor clave en su comportamiento mecánico y se refiere a la dirección en la que están dispuestas. Existen dos tipos principales de orientación: unidireccional y bidireccional como muestra la (Figura 8). La orientación unidireccional implica que todas las fibras se alinean en la misma dirección, permite al material soportar cargas en esa dirección. Por otro lado, en la orientación bidireccional la disposición de fibras es en dos direcciones ortogonales, confiere mayor resistencia en ambas direcciones (Fernández Gómez & Villanueva Llauradó, 2015).

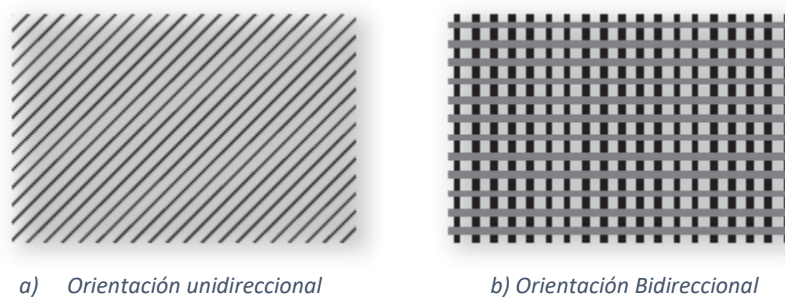


Figura 8. Orientación de la fibra Bidireccional.
Fuente: (BASF, 2019)

4.2 Flexión en vigas de hormigón armado con FRP

Para el diseño de refuerzo con FRP a flexión de vigas de hormigón armado, se sigue las metodologías propuestas en las normas ACI 440 1R-15 y ACI 440 2R-08, en el caso del hormigón la norma ACI 318-14. Como la geometría transversal de la viga es rectangular, el análisis de refuerzo por flexión será el caso de flexión uniaxial, el eje de momento coincide con el eje principal de inercia de la sección transversal.

La flexión en vigas de hormigón armado con refuerzo FRP se analiza por la teoría de elasticidad y el método de diseño de rotura. El diseño de sección transversal de la viga, se basa en la resistencia a la flexión del hormigón, la resistencia a la tracción del refuerzo de FRP y la resistencia al corte del hormigón (Bazan & Fernández-Dávila, 2019).

$$R = 0.85f'c \cdot \left(\frac{b \cdot d^2}{fy}\right) \quad (7)$$

Donde:

- R Resistencia a la flexión del hormigón
 $f'c$ Resistencia a la compresión del hormigón
 b Ancho de la sección transversal de la viga
 d Altura de la sección transversal de la viga
 fy Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo

$$ft = Af \cdot \sigma f \quad (8)$$

Donde:

- ft Resistencia a la tracción del refuerzo de FRP (psi o MPa)
 Af Área transversal del refuerzo de FRP (in² o mm²)
 σf Tensión de rotura del refuerzo de FRP (psi o MPa)

$$Vc = 0.17fc^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot d \quad (9)$$

Donde:

- Vc Capacidad de carga de corte del hormigón (lb o N)
 fc Resistencia a la compresión del hormigón (psi o MPa)
 b Ancho efectivo de la sección transversal de la viga (in o mm)
 d Altura efectiva de la sección transversal de la viga (in o mm)

Comportamiento de la viga de hormigón armado con refuerzo FRP.

La resistencia a la flexión del hormigón en combinación con resistencia a la tracción del refuerzo de FRP presenta una curva de capacidad de carga versus deformación. La zona elástica, la curva es lineal y sigue la ley de Hooke, mientras que, en la zona plástica, la curva es no lineal y se puede representar mediante una curva de tipo bilineal, como se observa en la Figura 9.

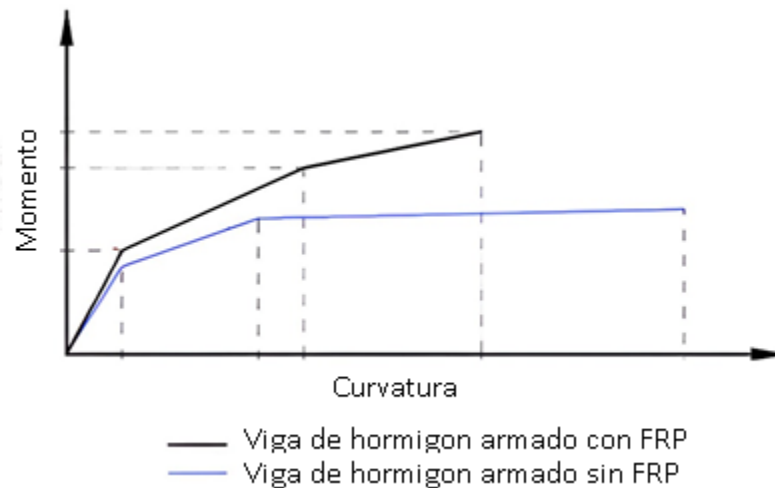


Figura 9. Diagrama Momento-Curvatura de viga con y sin refuerzo externo de FRP
Fuente: (Jorge Bazán Serrano, 2022)

En la orientación unidireccional, las láminas de FRP se colocan en la dirección de la carga principal. En la orientación bidireccional, se colocan láminas de FRP en ambas direcciones de la carga principal. La orientación bidireccional puede mejorar la resistencia y la deformación en ambas direcciones de la carga principal, mientras que la orientación unidireccional puede ser más efectiva para resistir la carga principal.

4.3 Ley cohesiva

La ley cohesiva es un modelo de la mecánica de fractura no lineal, es ideal para explicar el comportamiento de fractura de materiales por lo general cuasi-frágiles (hormigón), uno de los modelos presentes en la bibliografía es el modelo desarrollado por Barcnblatt (1959).

1962), Dugdale (1960) y Rashid (1968), (Kumar & Barni 2011). El modelo que surgió de investigaciones realizadas en las décadas de 1960 y 1970 para describir el proceso de falla de materiales cuasi-frágiles por mecánica de fractura elástica lineal (LEFM), no reporto buenos resultados, los resultados son positivos debido a que el tamaño de este tipo de la zona de falla está en el mismo orden que el tamaño de la muestra. Esto hace que la tenacidad del material dependa del tamaño de la muestra (Graffe & Linero, 2020).

Para observar el proceso de fractura de un material de concreto, es necesario la ayuda de un modelo de fisura cohesiva la cual determina que cuando la resistencia a tracción del concreto es superada por un esfuerzo principal, por otra parte, se considera que coincide la dirección del esfuerzo principal con la normal de la superficie de la fisura, estas consideraciones también suponen la zona externa del material de fractura experimenta comportamiento lineal, elástico e isotrópico, (Figura 10).(Morel et al., 2013).

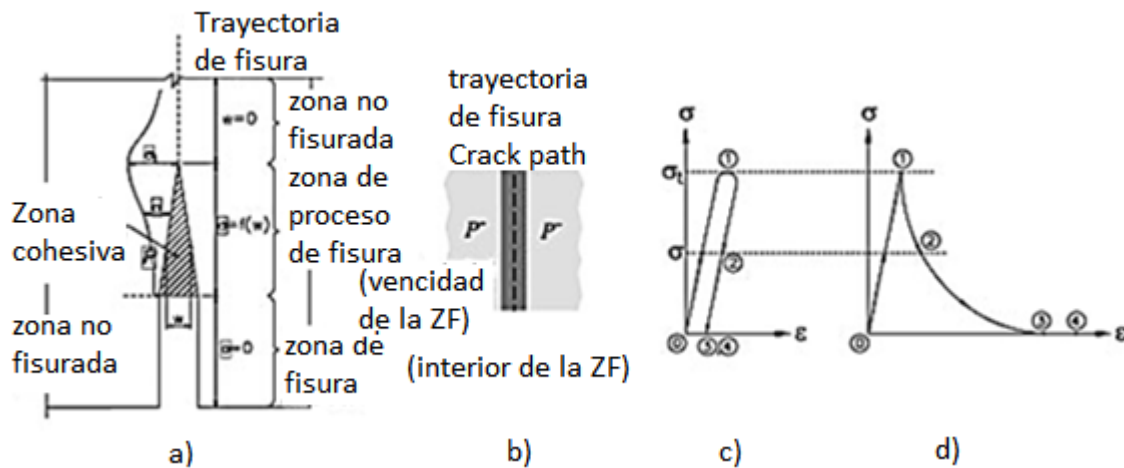


Figura 10. Modelo de fisura cohesiva: (a) zona proceso de fractura, (b) zona de fractura, (c) relación esfuerzo - deformación fuera de la zona de fractura (punto P) y (d) relación esfuerzo - deformación en interior zona de fractura (punto P).

Fuente: Tomado de (Graffe & Linero, 2020)

4.4 Contracción del hormigón

La contracción es un fenómeno que ocurre en el hormigón cuando pierde humedad durante su proceso de curado. Esta pérdida de humedad provoca que el hormigón se encoja, lo que puede generar fisuras y grietas en la estructura. En el caso de las vigas de

hormigón armado, la contracción puede tener efectos negativos en la durabilidad y la resistencia de la estructura (ACI PRC-223-21, 2010, p. 22).

Para evitar la contracción en vigas de hormigón armado, se utilizan técnicas de curado adecuadas, como el curado húmedo y el uso de aditivos que reducen la contracción. También, se pueden utilizar refuerzos de acero o fibras de vidrio para controlar la apertura de las fisuras y mejorar la capacidad de carga de la viga (Gracia et al., 2013).

La Figura 11, muestra el comportamiento típico de la contracción del hormigón a lo largo del tiempo, donde se puede observar que la contracción disminuye a medida que el tiempo transcurre.

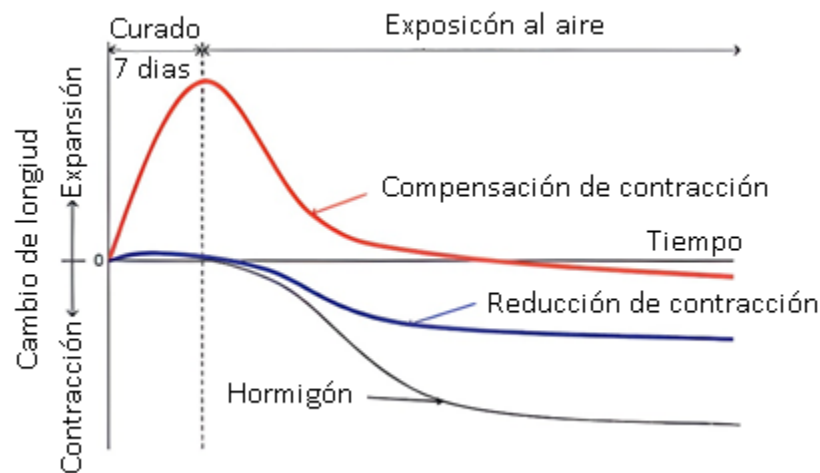


Figura 11. Estudio Comportamiento de contracción del hormigón.
Fuente: (ACI PRC-223-21, 2010)

4.5 Simulación mediante elementos finitos de vigas sometidas a flexión con FRP.

El análisis de elementos finitos es una herramienta útil para el análisis y diseño de vigas de hormigón reforzadas con FRP. La técnica de elementos finitos permite la modelización detallada del comportamiento mecánico de la estructura y el refuerzo, incluyendo la respuesta no lineal del hormigón y el FRP (Jahani et al., 2021).

La simulación incluye un modelo de viga en un software de elementos finitos, donde se consideran las propiedades del material de la viga, el refuerzo de FRP y las condiciones de carga. Se pueden evaluar diferentes configuraciones de refuerzo de FRP, como la cantidad, la orientación y la disposición de las láminas o barras. La simulación también permite la evaluación de diferentes casos de carga, como cargas puntuales o distribuidas, y la evaluación de la resistencia y rigidez de la viga reforzada (Pava Castillo, 2019).

Existen numerosos estudios sobre la simulación de vigas reforzadas con FRP mediante elementos finitos. Un ejemplo es el estudio de Teng et al. (2002), donde se simuló el comportamiento a flexión de vigas reforzadas con diferentes configuraciones de FRP utilizando el software ABAQUS. Otro ejemplo es el estudio de Almusallam y Abbas (2009), donde se simuló la respuesta a flexión de vigas reforzadas con láminas de FRP utilizando el software ANSYS.

4.3.1 Variable de daño de tensión y compresión

En el modelado de una viga de hormigón reforzada con FRP, se utilizan variables de daño para evaluar el comportamiento a largo plazo de la estructura. Dos de las variables más importantes son el daño a tensión y el daño a compresión.

Variable de daño a compresión

El daño a compresión se refiere a la deformación excesiva en la zona comprimida de la viga (ecuación 10). Esta deformación puede causar una falla en el hormigón o en la interfaz entre el hormigón y el FRP. El daño a compresión se puede evaluar mediante la relación entre la deformación axial en la fibra superior y la deformación última del hormigón. A medida que la relación aumenta, la capacidad de la viga para resistir la carga de compresión disminuye (Hafezolghorani Esfahani et al., 2017), y se calcula mediante las ecuaciones (11), (12) y (13):

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}} \quad (10)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl,h}) \quad (11)$$

$$\varepsilon_c^{pl,h} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (12)$$

$$\varepsilon_c^{in,h} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \left(\frac{1}{1-d_c} \right) \quad (13)$$

$$\varepsilon_c^{pl,h} = \varepsilon_c^{in,h} - \frac{\sigma_c}{E_0} \left(\frac{d_c}{1-d_c} \right) \quad (14)$$

Donde:

d_c Variables escalares de daño, 0 (sin daño) a 1 (totalmente dañado)

$\varepsilon_c^{in,h}$ Deformación por compresión inelástica

ε_c^{el} Deformación elástica a compresión

$\varepsilon_c^{pl,h}$ Deformación plástica a compresión

ε_c Deformación por compresión equivalente a: $\varepsilon_c = \varepsilon_c^{pl,h} + \varepsilon_c^{el}$

Variable de daño a tensión.

El daño a tensión se refiere a la aparición de fisuras en el hormigón debido a la tracción en la zona de la fibra inferior de la viga. El daño se puede evaluar mediante la relación entre la deformación axial en la fibra inferior y la deformación de tracción última del hormigón. A medida que la relación aumenta, la resistencia a la tracción del hormigón disminuye, lo que aumenta la probabilidad de aparición de fisuras (Hafezolghorani Esfahani et al., 2017), y se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_{t0}} \quad (15)$$

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl,h}) \quad (16)$$

$$\varepsilon_c^{ck,h} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (17)$$

$$\varepsilon_t^{pl,h} = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_0} \left(\frac{1}{1-d_t} \right) \quad (18)$$

$$\varepsilon_t^{pl,h} = \varepsilon_t^{ck,h} - \frac{\sigma_t}{E_0} \left(\frac{d_t}{1-d_t} \right) \quad (19)$$

Donde:

d_t Variables escalares de daño, 0 (sin daño) a 1 (totalmente dañado)

$\varepsilon_t^{ck,h}$ Deformación en punto de fisura en tensión

ε_t^{el} Deformación elástica a tensión

$\varepsilon_t^{pl,h}$ Deformación plástica a tensión

ε_t Deformación por tensión equivalente a: $\varepsilon_t = \varepsilon_t^{pl,h} + \varepsilon_t^{el}$

5. MATERIALES Y METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Considerando lo que se menciona (Hernández Sampieri et al., 2014), los enfoques de investigación como son: el cuantitativo, cualitativo y mixto. Para tratar problemas de investigación igualmente valiosos. Se plantea el siguiente esquema de investigación.

5.1 Tipo, diseño y nivel de investigación

La presente investigación es de tipo:

- ENFOQUE: CUANTITATIVO. - Validación y estimación de la incertidumbre de los modelos de simulación para los distintos escenarios.

- DE TIPO: APLICADA. - Generación de modelo matemático y escenarios de los procedimientos de ejecución de cada método. Con ALCANCE CORRELACIONAL. - Manipulación intencional de variables para observar su influencia en el resultado de los modelos y escenarios.

5.2 Método de investigación

La metodología de investigación del presente documento se detalla a continuación:

- Levantamiento de los requisitos establecidos en la normativa americana (American Concrete Institute, ACI) y por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) para el ensayo de viga simplemente apoyada a flexión.
- Analizar y establecer el modelo de simulación según normativa americana (American Concrete Institute, ACI) y ecuatoriana.
- Redactar el modelo de simulación seleccionado basado en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) y ajustarlo de acuerdo a la realidad de campo en el mercado local.
- Establecer el procedimiento para la validación del modelo, así como el número de repeticiones necesarias para este fin.

5.3 Determinación de la muestra

La unidad de estudio será el grado de rigidez de la viga; se analizará las vigas de hormigón armado con adhesión de fibra de vidrio como refuerzo y se seleccionará un modelo numérico y de fallo representativo para la simulación. Los criterios para establecer el modelo numérico son: geometría de la viga, condiciones de contorno, adhesión de fibra, propiedades de la fibra y cuantía de la sección.

5.4 Diseño de la investigación.

Para el correcto desarrollo del proyecto se establecen tres fases:

Fase I.

Revisar el estado del arte de la rigidez de vigas de hormigón que utilizan fibra de vidrio como refuerzo. Esta fase inicia con una exploración de información, búsqueda bibliográfica de normativa y códigos constructivos utilizados para el modelamiento.

Fase II.

Plantear el modelo de simulación conforme las condiciones establecidas en la normativa para el análisis de una viga simplemente apoyada con adhesión de fibra de vidrio. En esta fase se establece el modelo necesario para ejecución del estudio.

Fase III.

Desarrollar la campaña de simulación y validar el modelo bajo diferentes escenarios de disposición del elemento de refuerzo mediante software comercial de elementos finitos. Esta fase culmina con la validación del modelo planteado. Plantear el modelo de simulación conforme las condiciones establecidas en la normativa. En esta fase se establece el modelo numérico necesario para ejecución del estudio, conjuntamente con la variable de daño oportuno.

5.5 Propiedades de los materiales

5.5.1 Acero

Las propiedades elásticas del acero estructural ASTM A36, corresponden a lo reportado en el artículo científico (Jahani et al., 2021), la caracterización mecánica fue desarrollada conforme la normativa UNE-EN ISO 15630-1 la (Tabla 2) contiene el compendio de las prestaciones mecánicas del material.

*Tabla 2. Propiedades del acero estructural ASTM A36.
Fuente: (Jahani et al., 2021)*

| Propiedades del acero estructural ASTM 36 | |
|--|--------------|
| Propiedades mecánicas | Valor |
| Densidad (Kg/m ³) | 7880 |
| Resistencia última a tensión (MPa) | 400 |
| Esfuerzo de Fluencia (MPa) | 250 |
| Módulo de elasticidad (GPa) | 250 |
| Módulo de rigidez (GPa) | 77.2 |
| Coefficiente de expansión térmica | 11.7 |
| Ductilidad (%) | 21 |

5.5.2 Hormigón

Las propiedades del hormigón corresponden a lo reportado en el artículo (Jahani et al., 2021) la caracterización del material fue desarrollada conforme a la normativa *UNE-EN 12390-3:2003*, *UNE-EN 12390-6:2010*, y *ASTM C469-87*, respectivamente, con un hormigón clase C1 según la *NEC-SE-HM*

Tabla 3. Selección del hormigón.
Fuente: (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014)

| Categorías | Severidad | Clase | Condición |
|---|--------------|-------|--|
| C Protección del refuerzo contra la corrosión | No aplicable | C0 | Hormigón seco o protegido contra la humedad. |
| | Moderada | C1 | Hormigón expuesto a la humedad, pero no a una fuente externa de cloruros. |
| | Severa | C2 | Hormigón expuesto a la humedad y a una fuente externa de cloruros provenientes de productos químicos para descongelar: Sal, agua salobre, agua de mar. |

Tabla 4. Propiedades del hormigón.
Fuente: (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014)

| Clase de exposición | Relación a/c Max | Fc [Mpa] | Requisitos mínimos adicionales | | |
|---------------------|------------------|----------|--------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| | | | Contenido de aire | | Límites en los cementantes |
| | | | Hormigón reforzado | Hormigón preesforzado | |
| C0 | N/A | 17 | 1 | 0.06 | Ninguno |
| C1 | N/A | 17 | 0.3 | 0.06 | |
| C2 | N/A | 35 | 0.15 | 0.06 | |

5.5.3 Polímero reforzado con fibra de vidrio GFRP

El GFRP, se aplica a una viga de hormigón armado previamente mecanizada con disco de corte, generando ranuras en donde se aloja el material de refuerzo. En dicha cavidad se vierte la resina epóxica para garantizar la transferencia de carga entre la viga de hormigón armado y el reforzante ligero. Así, en la (Tabla 5) se presenta el compendio de valores elásticos típicos de la fibra de vidrio.

Tabla 5. Propiedades de barras de FRP.
Fuente: (Fernández Gómez & Villanueva Llauro, 2015)

| | Acero | GFRP | CFRP |
|---------------------------------|--------------|-------------|-------------|
| Esfuerzo de fluencia (MPa) | 276 - 517 | NA | NA |
| Resistencia a la tracción (MPa) | 70 - 100 | 483 - 690 | 600 3690 |
| Modulo Elástico (GPa) | 200 | 35 - 51 | 120 580 |
| Tensión de ruptura (MPa) | 6 - 12 | 1.2 - 3.1 | 0.5 1.7 |

El contenido volumétrico de fibras es superior al 68%, considerando la presencia de la matriz de resina epóxica y la fibra continua de vidrio (Jahani et al., 2021). Las propiedades de la fibra de carbono se obtuvieron de (Jahani et al., 2021) y las propiedades del compuesto resina epóxica y fibra de vidrio se obtuvieron de (Sharaky et al., 2014) y presenta el siguiente comportamiento mecánico: resistencia a la tracción máxima de 1350 MPa, una resistencia máxima tensión de tracción de 0,0167 y módulo de elasticidad de 170 GPa. Estos datos se resumen en la (Tabla 6).

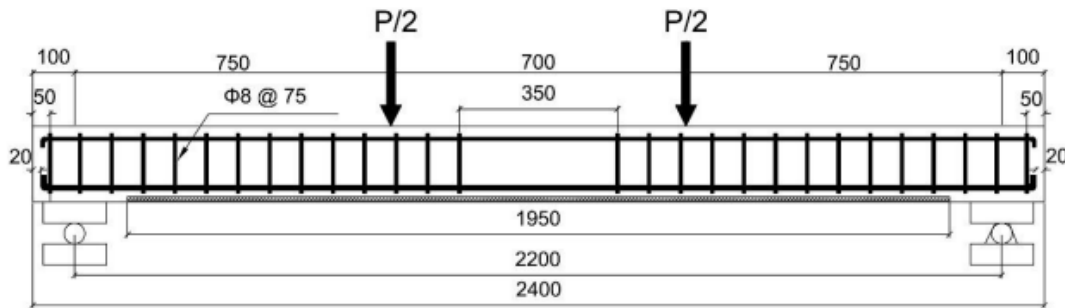
Tabla 6. Propiedades del FRP.
Fuente: (Sharaky et al., 2014)

| FRP ID | Db (mm) | Ffu (Mpa) | Ffu (Mpa) | Ef (Gpa) | Efu |
|---------------|--------------------|----------------------|----------------------|-----------------|------------|
| Carbón | 8 | 2500 | 2350 | 170 | 0.0152 |
| Vidrio | 8, 12 | 1000 | 1350 | 64 | 0.0167 |

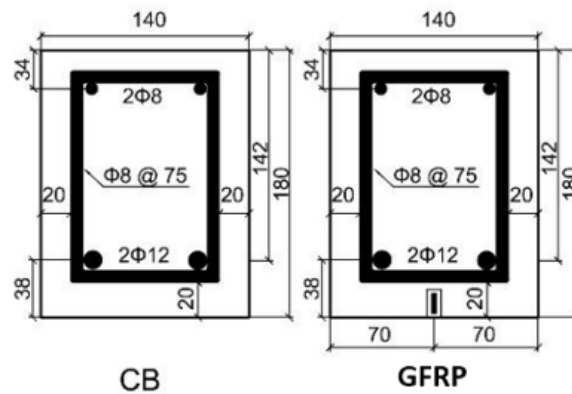
5.6 Configuración del modelo numérico

Se llevó a cabo un análisis estático de elementos finitos (FE) de dos vigas, partiendo de un modelo tridimensional desarrollado en software comercial (Figura 12, Figura 13). La primera viga corresponde a la de control y validación del resultado numérico (**CB**) y consta únicamente de hormigón armado. La segunda viga (**GFRP**), se agrega un refuerzo de fibra de vidrio. Los dos modelos están sometidos a cuatro puntos de flexión en el plano (4PB). Considerando las condiciones de contorno indicadas en la, se configuro la simetría en dos

planos perpendiculares, y con el objetivo de reducir consto computacional, solo se modeló una cuarta parte de la viga. La cuantía de la viga CB y GFRP, así como las condiciones de contorno se indican en la (Figura 14)



a) Vista lateral de la geometría de la viga.



b) Vista frontal de la geometría de la viga.

Figura 12. Esquema del modelo tridimensional.
Fuente: (Jahani et al., 2021)

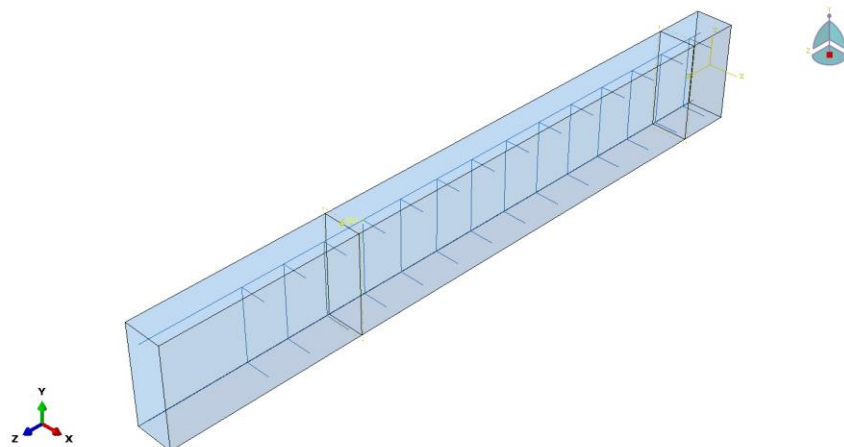


Figura 13. Modelo tridimensional en el Software.
Fuente: Autores

El modelo FE incluyen hormigón, refuerzos de acero (longitudinales y estribos), barras de fibra de vidrio y resina epóxica. El compuesto se modela mediante un elemento sólido hexaédrico lineal de ocho nodos con integración reducida (C3D8R), los refuerzos de acero se modelan mediante un elemento de armadura 3D lineal de dos nodos (T3D2) y las barras de FRP se modelan mediante una viga lineal de dos nodos (B31). Se realizó un análisis de convergencia de malla para seleccionar los tamaños de malla óptimos para las diferentes partes involucradas en el modelo FE. En este estudio, se observó que el refinamiento de la malla no fue sensible después de tener un tamaño de malla máximo de 25 mm para todos los elementos excepto el epóxico que tiene un tamaño de malla de 10 mm. La malla de elementos finitos optimizada junto con las condiciones de contorno se muestra en la (Figura 15).

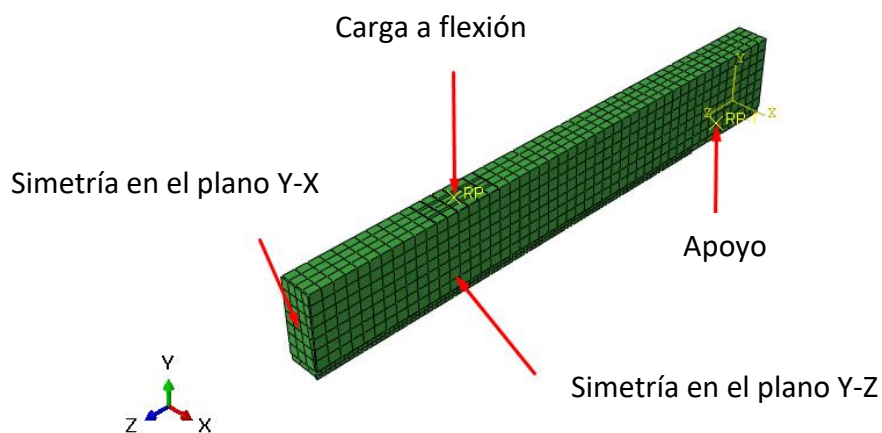


Figura 14. Condiciones de contorno.
Fuente: Autores

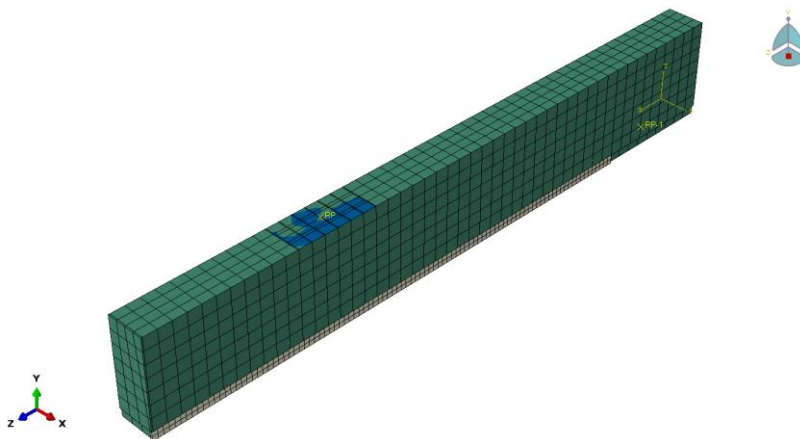


Figura 15. Mallado de geometría.
Fuente: Autores

Teniendo en cuenta la unión perfecta, los refuerzos de acero y las barras de fibra de vidrio se alojan dentro del hormigón y el epóxico, respectivamente. Para abordar esta condición, se utiliza la función de región incrustada (*embedded*) del software comercial. Además, configuración (*TIE*) simula la interacción en la interfaz entre el epóxico y el hormigón (Jahani et al., 2021).

El efecto de la contracción volumétrica durante el proceso exotérmico de fraguado también fue considerado en la simulación, se aplica una flecha adicional inicial debido a la contracción a la mitad de la viga en el primer paso de simulación (*STEP 1*). Posteriormente, la carga de flexión principal se aplica en un modo de control de desplazamiento a través de una placa rígida (condición de contorno simplemente apoyada (Figura 14) para evitar cualquier deformación adicional a lo largo de la carga en el segundo paso de la simulación (*STEP 2*).

5.7 Validación del modelo numérico y exploración del comportamiento con barras de fibra de vidrio.

Para validar el modelo (FE) desarrollado en este estudio, se llevaron a cabo dos conjuntos de pruebas: i) En la primera prueba se simula el caso de la viga de hormigón

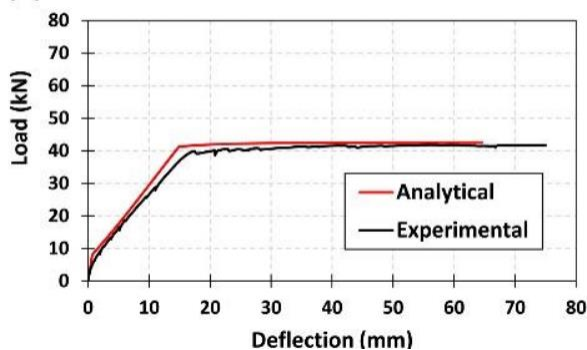
armado sometida a 4PB. ii) En la segunda prueba se estudia el comportamiento del mismo ensayo, pero con una viga reforzada con fibra de carbono. Los resultados obtenidos son comparados con los reportados por (Jahani et al., 2021). Las propiedades de los materiales utilizados para la validación corresponden a los de la Tabla 6.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

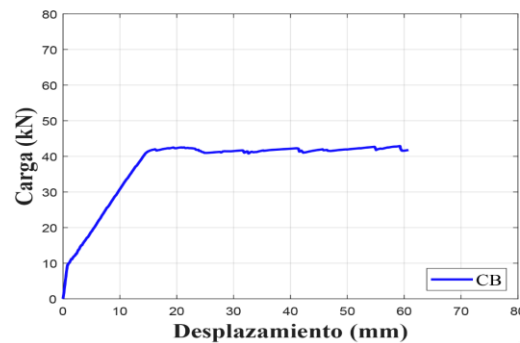
6.1 Resultados del modelo numérico de validación (CB)

Los resultados de la primera prueba de la validación del modelo se observan en la (Figura 18 a), en la que se simuló la viga sin refuerzo de fibra de carbono en donde se puede observar que los resultados del modelo numérico tienen un alto nivel de precisión mostrando una tendencia clara a lo largo de todo el ensayo. Obteniendo un error del 2% y 4.5% (Tabla 7.), en cuanto a la deformación límite y la carga límite respectivamente como se observa en la (Figura 18 b).

(a) CB-1-R



a) Datos publicados Fuente: (Jahani et al., 2021).

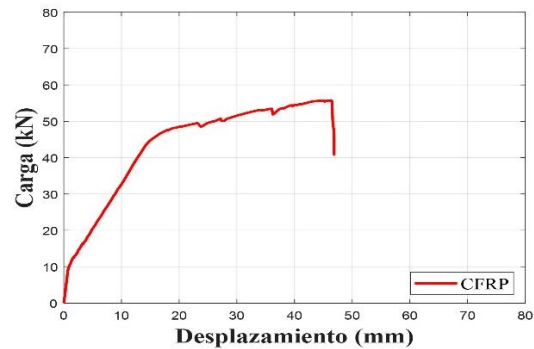
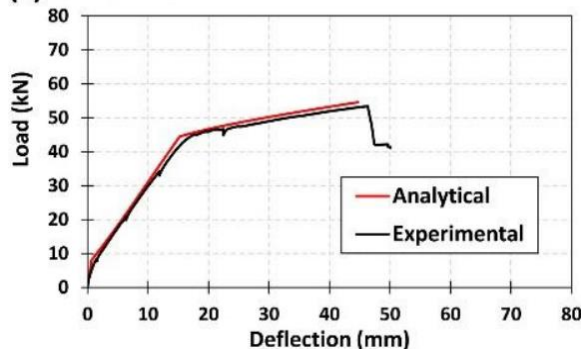


b) Resultado del modelo CB. Fuente: Autores

Figura 16. Resultados numéricos publicados y obtenidos del modelo FE de validación.

En la segunda prueba, se simuló la viga con refuerzo de fibra de carbono y se logra apreciar una elevada precisión obteniendo error del 2% en la deformación límite, entre las dos fuentes para la carga límite (Tabla 7)(Figura 17). Estos resultados demuestran que el modelo es capaz de predecir con precisión el comportamiento de una viga de hormigón armado bajo flexión a cuatro puntos en el plano.

(c) SB1S-1-R



a) Resultados publicados. Fuente: (Jahani et al., 2021).

b) Resultados de validación del modelo CB. Fuente: Autores

Figura 17. Comparación de los resultados publicados y obtenidos de la viga de hormigón reforzada con FRP.

Tabla 7. Resultados obtenidos luego de la simulación.
Fuente: Autores

| CASO | Carga (kN) | Deformación límite Bajo Carga (mm) | | | Carga ímite (kN) | | |
|------|------------|------------------------------------|----------------------|----------------|------------------|----------------------|----------------|
| | | Datos Publicados | Resultados obtenidos | Diferencia (%) | Datos Publicados | Resultados obtenidos | Diferencia (%) |
| CB | 20 | 15.9 | 15.56 | 2.1 | 39.9 | 41.7 | 4.5 |
| CFRP | 20 | 14.8 | 15.1 | 2.0 | 44.9 | 45.8 | 2.0 |

6.2 Resultados de la simulación del caso GFRP.

Los resultados de la simulación numérica del modelo del modelo de hormigón armado reforzado con fibra de vidrio y resina epóxica se presenta en la Figura 18. Se puede observar una gran mejora en el comportamiento de la viga de hormigón armado con refuerzo (GFRP) en comparación con la viga sin refuerzo (CB). En particular, se puede notar

que la deformación última y la carga límite de la viga con refuerzo GFRP son significativamente mayores en comparación con la viga sin refuerzo. La deformación límite de la viga sin refuerzo es de 15.56 mm, mientras que para la viga con refuerzo GFRP es de 16.3mm, lo que representa un aumento del 4.5% en la capacidad de deformación. Estos resultados se resumen en la Tabla 8.

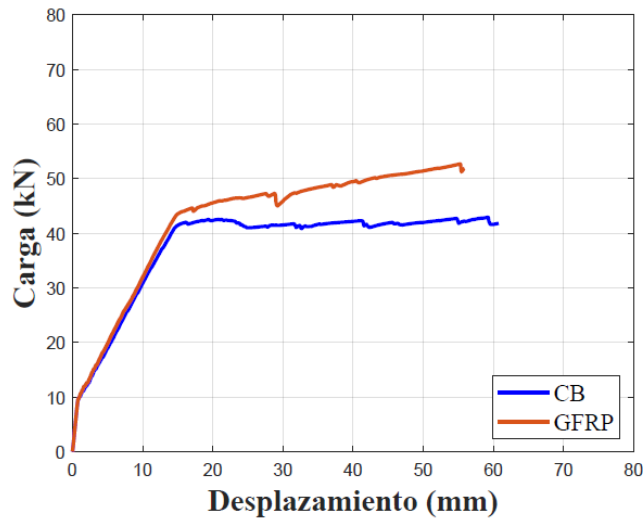


Figura 18. Resultados de la simulación de los dos casos de estudio CB y GFRP.
Fuente: Autores

En relación a la carga límite, se puede observar que la viga en el caso **(CB)** alcanzó una carga límite de 41.7 kN mientras que la viga reforzada GFRP alcanzó una carga máxima de 44.8 kN lo que representa un aumento del 7% confirmando la eficacia del refuerzo FRP en mejorar el comportamiento a flexión de la viga en este caso. Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de CB y GFRP.
Fuente: Autores

| Caso | Carga (kN) | Deformación límite bajo carga (mm) | Diferencia (%) | Carga límite (kN) | Diferencia (%) |
|------|------------|------------------------------------|----------------|-------------------|----------------|
| CB | 20 | 15.56 | 4.5 | 41.7 | 7 |
| GFRP | 20 | 16.3 | | 44.8 | |

7. CONCLUSIONES

En este estudio se presentó un modelo de elementos finitos (FE) que analiza la adición de refuerzo de fibra de vidrio en el comportamiento a la flexión de las vigas de hormigón reforzado considerando los principales descubrimientos, se puede resumir lo siguiente:

- Durante este estudio, se llevó a cabo una revisión exhaustiva del estado del arte en cuanto al análisis numérico y experimental cuasi estático de vigas de hormigón armado reforzadas con fibra de vidrio. A partir de ello, se lograron determinar las propiedades del hormigón armado, así como del material de refuerzo, lo que permitió comprender en mayor profundidad su comportamiento ante las cargas de larga aplicación en el régimen estático. Además, se pudo definir el comportamiento elastoplástico de las vigas con FRP, lo que ha sido un gran éxito en cuanto al logro del objetivo de esta investigación.
- Se ha configurado exitosamente un modelo de simulación numérica mediante elementos finitos en el software comercial de vigas simplemente apoyadas con adhesión de fibra de vidrio empleando como adherente la resina epóxica, siguiendo las condiciones estipuladas por la norma ACI 440. Este modelo ha permitido la evaluación de diferentes parámetros y su efecto en el comportamiento estructural de la viga, así como la validación experimental del mismo. De esta manera, se dispone de una herramienta útil para el análisis y diseño de elementos estructurales reforzados con FRP, lo que representa una contribución significativa al avance del conocimiento de la ingeniería mecánica en el campo de diseño estructural.
- Se ha desarrollado exitosamente la campaña de simulación para las vigas de hormigón armado reforzadas con fibra de vidrio. Se obtuvieron dos escenarios correspondientes al caso base (CB de validación), y al reforzamiento con fibra de

vidrio y resina epóxica (GFRP). En los resultados se demostró una mejora significativa en la deformación y rigidez de la viga reforzada en comparación con la viga sin refuerzo. La aplicación de FRP mejoró el comportamiento estructural de la viga, obteniendo una mejora del 4.5% en la deformación óptima del 7% en la carga límite. Estos resultados demuestran que el uso de FRP es una técnica efectiva para mejorar la capacidad de carga y rigidez de las vigas de hormigón armado, lo que puede tener importantes implicaciones de la ingeniería mecánica en el campo de diseño estructural.

- Se ha llevado a cabo un proceso de validación exitoso, en el cual se han obtenido errores mínimos en los resultados. Esto indica que el modelo de simulación propuesto es capaz de predecir con precisión el comportamiento de una viga de hormigón armado con refuerzo de fibra de vidrio. Los resultados de la validación demuestran que el modelo es capaz de reproducir el comportamiento real de la estructura con un alto grado de fiabilidad, lo que es fundamental para la aplicación práctica del mismo en el diseño y análisis de vigas reforzadas con FRP.
- Los resultados de la campaña experimental, se obtuvieron mediante la aplicación de los modelos del entorno de simulación cuasi estática, lo cual permite reducir la incertidumbre de error numérico en las predicciones de la simulación. Consecuentemente, la configuración integral de las propiedades mecánicas del sistema estructural y la variable de daño implementada, en el modelo funcionaron oportunamente.

Trabajos Futuros.

A partir de los resultados y conclusiones obtenidas en este estudio pueden surgir los siguientes trabajos futuros:

1. Investigar el comportamiento de vigas con diferentes tipos de refuerzos FRP, como fibra de carbono o aramida, y compararlos con el refuerzo de fibra de vidrio utilizado en este estudio.
2. Realizar estudios sobre la durabilidad del refuerzo FRP a largo plazo, ya que es importante garantizar que el refuerzo no pierda su efectividad con el tiempo debido a las cargas de fatiga.
3. Ampliar la investigación a otro tipo de elementos estructurales, como columnas o losas (uni y bidireccionales), para evaluar la eficacia del refuerzo FRP en diferentes aplicaciones.
4. Realizar ensayos experimentales para validar el procedimiento experimental mediante campañas desarrolladas en las instalaciones de la universidad o universidades aliadas.

8. REFERENCIAS

ACI PRC-223-21. (2010). *ACI PRC-223-21: Shrinkage-Compensating Concrete—Guide*.

https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=22321&Format=PROTECTED_PDF&Language=English&Units=US_AND_METRIC

ACI PRC-440.1-15. (2022). *ACI PRC-440.1-15 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars*.

https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=4401U15&Format=PROTECTED_PDF&Language=English&Units=US_AND_METRIC

ACI PRC-440.3-12. (2022). *ACI PRC-440.3-12 Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*.

https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=440312&Language=English&Units=US_AND_METRIC

Aguiar, R., Zevallos, M., Palacios, J., García, L., & Menéndez, E. (2016). *Reforzamiento de estructuras con disipadores de energía, el terremoto de Ecuador del 16 de abril de 2016*.

Banham, R. (1989). *La Atlántida de hormigón*. Editorial NEREA.

BASF. (2019). *Refuerzo estructural a base de materiales compuestos de fibra de carbono* (Vol. 1). MASTER BUILDERS.

Bazan, J., & Fernández-Dávila, V. (2019). *EVALUATION OF BENDING OVER-STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH FRP*.

DIPAC. (2022). *Catálogo actualizado Aceros DIPAC*. 40.

- Elkholy, R. M. (2017). Structural System to Resist Seismic Loads on High Rise Reinforced Concrete Structures. *Open Journal of Civil Engineering*, 07(02), 297-302. <https://doi.org/10.4236/ojce.2017.72019>
- Eurocodigo 2. (2013). *UNE-EN 1992-2:2013 Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de ho...* <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0051039>
- Fernández Gómez, J. A., & Villanueva Llauradó, P. (2015). Refuerzo de elementos a flexión y cortante con materiales compuestos (FRP) anclados. *Actas do CONPAT2015 / CONPAT 2015 | 8-10 septiembre 2015 | Lisboa*, 1-8. <http://www.conpat2015.com/>
- FRANCISCO JAVIER CRISAFULLI. (2018). *DISEÑO_SISMORESISTENTE_DE_CONSTRUCCIONES_EN_ACERO_5ED-F._CRISAFULLI20190605-89148-i0xmej-libre.pdf* (5.ª ed., Vol. 2).
- Gracia, Ó., Quesada, G., Gómez, A., Santacruz, A., & Arias, L. (2013). Estudio de la tecnología de concretos de contracción compensada aplicada a la construcción de pisos industriales. *Obras y proyectos*, 13, 46-56. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132013000100005>
- Graffe, R., & Linero, D. (2020). Simulación numérica del proceso de fractura en modo I de vigas de concreto con trayectoria de fisuración conocida mediante un modelo discreto de fisura cohesiva. *Revista ingeniería de construcción*, 25(3), 399-418. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732010000300005>
- Hafezolghorani Esfahani, M., Hejazi, F., Vaghei, R., Jaafar, M., & Karimzadeh, K. (2017). Simplified Damage Plasticity Model for Concrete. *Structural Engineering International*, 27, 68-78. <https://doi.org/10.2749/1016866616X1081>

- Hernández, J. Á. D. (2020). *REFORZAMIENTO DE ESTRUCTURAS CON FRP (FIBER REINFORCED POLYMERS), APLICACIÓN AL CASO DE REFUERZO*. 114.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Pilar Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta edición). McGraw-Hill.
- Jack, M. (2013). *Diseño de estructuras de acero—5a ed.* Alfaomega Grupo Editor.
- Jahani, Y., Baena, M., Gómez, J., Barris, C., & Torres, L. (2021). Experimental Study of the Effect of High Service Temperature on the Flexural Performance of Near-Surface Mounted (NSM) Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP)-Strengthened Concrete Beams. *Polymers*, 13(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/polym13060920>
- Jorge Bazán Serrano. (2022). *Respuestas experimentales por flexión de Vigas de Concreto Armado Reforzadas con Fibra de Carbono*.
<https://www.topconsult.com.pe/index.php/2016-01-14-21-57-36/330-respuestas-experimentales-por-flexion-de-vigas-de-concreto-armado-reforzadas-con-fibra-de-carbono>
- Karka, B. R., Bruno, B., Ngarmaim, N., & Rimbarngaye, A. (2023). The Effects of Degradation Phenomena of the Steel-Concrete Interface in Reinforced Concrete Structures. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 11(03), 1-21.
<https://doi.org/10.4236/msce.2023.113001>
- Landeta, L. F. R. (2019). *SANGOLQUÍ, AGOSTO DEL 2013*. 225.
- Lawrence C. Bank. (2006). *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*. John Wiley & Sons.

- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2014). *NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN Hormigon Armado*. https://cicp-ec.com/documentos/NEC_2015/NEC_SE_HM_Hormigon_Armado.pdf
- Mónica Nitou Soto. (2018). *EMPLEO DE FRP EN ESTRUCTURAS* [Mg, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID]. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/215093/1/empleFRPestruc.pdf>
- Morel, C. A., Coceres, H. D., & D'Ambra, R. J. B. (2013). *LEY COHESIVA PARA MODELAR EL PROCESO DE DESPEGADO EN MODO COMBINADO APLICANDO EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS DISCRETOS*. 9.
- Pava Castillo, J. A. (2019). *Análisis y modelación numérica, utilizando la teoría de mezclas serie / paralelo en vigas de concreto, reforzadas externamente a cortante, con fibras de carbono y fibras de vidrio*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77187>
- Randall W. Poston. (2014). *ACI 318S-14 Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*. https://civilshare.files.wordpress.com/2016/07/aci_318s_14_en_espanol.pdf
- Rolando Castillo. (2021). *Uso de polímeros reforzados con fibras (FRP) como refuerzo externo de elementos de concreto de puentes en Costa Rica*. 3(15), 5.
- Sharaky, I. A., Torres, L., Comas, J., & Barris, C. (2014). Flexural response of reinforced concrete (RC) beams strengthened with near surface mounted (NSM) fibre reinforced polymer (FRP) bars. *Composite Structures*, 109, 8-22. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.10.051>

UNESCO. (2022). *Historic Centre of Santa Ana de los Ríos de Cuenca*. UNESCO World

Heritage Centre. <http://whc.unesco.org/en/list/863/>

Urs Meier. (1999). *Composite Materials in Bridge Repair*. 20.

9. ANEXOS

9.1 Anexo 1.

A continuación, se presenta la tabla característica de la resistencia y deformación del hormigón según el Euro código con las cuales se ha obtenido las propiedades del concreto para el cálculo del coeficiente de daño (Eurocodigo 2, 2013).

Tabla A 1. Características de resistencia y deformación del hormigón.

Fuente: (Eurocodigo 2, 2013)

| Strength classes for concrete | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|------|-----|------|-----|-----|
| f_{ck} (MPa) | 12 | 16 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| $f_{ck,cube}$ (MPa) | 15 | 20 | 25 | 30 | 37 | 45 | 50 | 55 | 60 | 67 | 75 | 85 | 95 | 105 |
| f_{cm} (MPa) | 20 | 24 | 28 | 33 | 38 | 43 | 48 | 53 | 58 | 63 | 68 | 78 | 88 | 98 |
| f_{ctm} (MPa) | 1,6 | 1,9 | 2,2 | 2,6 | 2,9 | 3,2 | 3,5 | 3,8 | 4,1 | 4,2 | 4,4 | 4,6 | 4,8 | 5,0 |
| $f_{ctk,0,05}$ (MPa) | 1,1 | 1,3 | 1,5 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,5 | 2,7 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,4 | 3,5 |
| $f_{ctk,0,95}$ (MPa) | 2,0 | 2,5 | 2,9 | 3,3 | 3,8 | 4,2 | 4,6 | 4,9 | 5,3 | 5,5 | 5,7 | 6,0 | 6,3 | 6,6 |
| E_{cm} (GPa) | 27 | 29 | 30 | 31 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 41 | 42 | 44 |
| ϵ_{c1} (‰) | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,25 | 2,3 | 2,4 | 2,45 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,8 |
| ϵ_{cu1} (‰) | 3,5 | | | | | | | | | 3,2 | 3,0 | 2,8 | 2,8 | 2,8 |
| ϵ_{c2} (‰) | 2,0 | | | | | | | | | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 |
| ϵ_{cu2} (‰) | 3,5 | | | | | | | | | 3,1 | 2,9 | 2,7 | 2,6 | 2,6 |
| n | 2,0 | | | | | | | | | 1,75 | 1,6 | 1,45 | 1,4 | 1,4 |
| ϵ_{c3} (‰) | 1,75 | | | | | | | | | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,2 | 2,3 |
| ϵ_{cu3} (‰) | 3,5 | | | | | | | | | 3,1 | 2,9 | 2,7 | 2,6 | 2,6 |