Universidad Católica de Santa María

Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

Evaluación experimental del mecanismo de delaminación en vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono bajo ensayo de flexión

Tesis presentada por:

Montes Huanco, Mariela Lizbeth

ORCID: 0009-0001-7083-2289

Yupanqui Soncco, Daryann Gabriela

ORCID: 0009-0002-8747-0998

para optar el Título Profesional de Ingeniera Civil

Asesor:

Mg. Bustamante Mora, Boris Andre

ORCID: 0000-0002-7612-315X

Arequipa – Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERÍA CIVIL
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 06 de Septiembre del 2026

Dictamen: 013720-C-EPIC-2026

Visto el borrador del expediente 013720, presentado por:

2017701802 - MONTES HUANCO MARIELA LIZBETH 2016222822 -

YUPANQUI SONCCO DARYANN GABRIELA

Titulado:

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL MECANISMO DE DELAMINACIÓN EN VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORZADAS CON FIBRA DE CARBONO BAJO ENSAYO DE FLEXIÓN

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO CIVIL

29238311 - GUILLEN MALAGA MILAGROS SOCORRO
DICTAMINADOR

42839424 - ROSAS ESPINOZA JORGE
DICTAMINADOR

46309156 - MONTOYA VILLANUEVA FILIBERTO RODY
DICTAMINADOR

Evaluación experimental del mecanismo de delaminación en vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono bajo ensayo de flexión

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%	13%	7%	6%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	1%
2	hebmerma.com Fuente de Internet	1%
3	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1%
4	repositorio.unasam.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	idoc.pub Fuente de Internet	1%
6	fdocuments.ec Fuente de Internet	<1%
7	Submitted to Universidad Ricardo Palma Trabajo del estudiante	<1%
8	Ramos, Maria Milagros Gutierrez. "Comportamiento a Flexión de Vigas de Concreto Armado Reforzadas Con Bandas CFRP Sometidas a Acciones Cíclicas", Pontificia Universidad Catolica del Peru (Peru), 2022 Publicación	<1%
9	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	<1%
10	tesis.pucp.edu.pe:8080 Fuente de Internet	<1%
11	revistas.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1%
12	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	<1%
13	Aguilar Ampuero, José Alejandro. "Comportamiento sismorresistente de tres edificaciones de concreto armado, de pórticos, dual y muros, con vigas reforzadas a flexión con CFRP.", Pontificia Universidad Catolica del Peru (Peru) Publicación	<1%

Dedicatoria

A Dios, por guiar mi camino, iluminar cada uno de mis pasos, brindarme la fortaleza, sabiduría y serenidad necesarias para superar cada desafío y alcanzar la culminación de este proyecto.

A mis amados padres, Luis y Lourdes, por ser mi mayor fuente de inspiración y brindarme su apoyo incondicional. Por sus enseñanzas, valores y por creer siempre en mí. Gracias por ser excelentes padres, gracias a ustedes es que puedo alcanzar esta meta que alguna vez fue un anhelo. Este logro también es de ustedes porque detrás de él está todo su amor, esfuerzo y confianza depositada en mí.

A Diego, por ser el gran amor que me ha acompañado en esta etapa de mi vida con cariño y comprensión, por brindarme tu apoyo durante la elaboración de este proyecto, por regalarme siempre palabras de aliento cuando más lo necesitaba y por compartir conmigo las alegrías y desafíos de este camino. Tu amor ha sido una fuente de fortaleza y motivación para seguir adelante. Con todo mi amor, este logro también te lo dedico a ti.

MARIELA

Dedicatoria

A Dios, por escuchar mis oraciones, darme fortaleza en los momentos difíciles y permitirme seguir adelante hasta alcanzar esta meta.

A mis amados padres, por ser las personas más valiosas de mi vida, mi inspiración y mi mayor fuente de amor y fortaleza. A mi mamá, Gabriela Soncco, por ser una mujer fuerte, resiliente y amorosa, cuyo ejemplo me inspira a nunca rendirme. A mi papá, Marko Yupanqui, por ser mi referente, por sus sabios consejos, sus conocimientos y por apoyarme de tantas maneras desde el primer día. Gracias a ambos por creer siempre en mí, acompañarme en cada etapa y nunca dejarme sola. Todo lo que soy y lo que he logrado lleva una parte de ustedes. Agradezco profundamente a Dios por haberme dado la dicha de tenerlos como padres. Los amo con todo mi corazón y este logro también es de ustedes.

A mi hermano Juan, por ser un ejemplo para mí y motivarme a seguir creciendo profesionalmente. Gracias por tu apoyo y por darme fuerzas cuando más lo necesitaba.

A mí misma, por perseverar, confiar en mí y llegar hasta aquí, cumpliendo uno de mis grandes sueños, convertirme en ingeniera civil.

DARYANN

Agradecimientos

A Dios, por acompañarnos desde el primer paso de este camino y permanecer siempre a nuestro lado. Gracias por permitirnos continuar con fe y perseverancia hasta alcanzar esta meta

A nuestro asesor, Ing. Boris Bustamante, por su orientación y disposición para apoyarnos cuando más lo necesitábamos. Gracias por guiarnos con sus conocimientos y acompañarnos durante el desarrollo de este trabajo hasta su culminación.

Al Ing. Marko Yupanqui, por su invaluable apoyo desde el inicio de este proyecto. Gracias por compartir con nosotras sus conocimientos, experiencia y sabios consejos, y por brindarnos siempre su orientación durante cada etapa de la investigación. Su apoyo y disposición fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de esta tesis. Su aporte profesional y personal será siempre muy valorado y recordado con gratitud.

A todas las personas que formaron parte de este camino y que, de una u otra manera, tuvieron algún gesto que contribuyó a la culminación de este proyecto. Al Ing. Jhon, por su orientación y disposición para ayudarnos; a Bill y Waldini, por acompañarnos durante el desarrollo de este trabajo; a Patrick, por su tiempo y apoyo durante parte de este proceso; y a Jimmy, por estar presente y alentarnos en esta etapa final. A cada uno de ustedes, nuestro más sincero agradecimiento; siempre recordaremos con gratitud lo recibido a lo largo de este camino.

RESUMEN

La presente investigación evalúa experimentalmente el mecanismo de la falla por delaminación de vigas de concreto armado reforzadas externamente con fibra de carbono (CFRP), estas fueron sometidas a ensayos de flexión, las cuales se observaron su comportamiento estructural, capacidad resistente, modos de falla y las influencias de los anclajes de fibra de carbono para mitigar la delaminación. Para ello, se ensayaron doce vigas de concreto armado a escala media, considerando distintas condiciones de reforzamiento y disposición de carga, con la finalidad de evaluar los comportamientos del sistema entre el concreto, adhesivo epóxico y fibra de carbono.

Los especímenes fueron sometidos a ensayos de flexión mediante una y dos cargas puntuales con diferentes resistencias del concreto, tales como 21 MPa y 17,5 MPa permitiendo evaluar la respuesta de dichos elementos frente a diferentes configuraciones. Los ensayos comprendieron vigas con y sin estribos, observándose diferencias en los tipos de falla. Las vigas reforzadas con estribos desarrollaron fallas por flexión, mientras que aquellas sin estribos presentaron fallas predominantes por cortante.

Uno de los aspectos principales de la investigación fue la evaluación del comportamiento de la fibra de carbono y del mecanismo de delaminación. Los resultados experimentales evidenciaron que la incorporación de anclajes tipo U puede modificar el mecanismo de falla y mejorar la transferencia de esfuerzos entre la fibra de carbono y el concreto. En uno de los especímenes provistos con cuatro anclajes tipo U no se produjo delaminación de la fibra de carbono, mientras que, en otro espécimen con sistema de anclaje doble, se observó un desprendimiento parcial asociado al arrancamiento del concreto, sin que aparezca una delaminación total del refuerzo.

Finalmente, los resultados obtenidos experimentalmente fueron comparados con los valores teóricos, evaluando la capacidad resistente, el comportamiento carga–deformación, el tipo mecanismo de falla y la respuesta del sistema de reforzamiento.

En general, los resultados permiten comprender la influencia de la configuración de las vigas, la resistencia del concreto, la disposición de las cargas y, particularmente, el uso de anclajes tipo U sobre el mecanismo de falla y la prevención de la falla por delaminación del CFRP.

Palabras clave: Delaminación, fibra de carbono (CFRP), viga de concreto armado

ABSTRACT

This study experimentally investigates the delamination failure mechanism of reinforced concrete beams externally reinforced with carbon fiber (CFRP). These beams were subjected to flexural tests to examine their structural behavior, load-bearing capacity, failure modes, and the influence of carbon fiber anchors on mitigating delamination. To this end, twelve medium-scale reinforced concrete beams were tested under various reinforcement and load conditions to evaluate the behavior of the system comprising concrete, epoxy adhesive, and carbon fiber.

The specimens were subjected to flexural tests using one and two point loads with different concrete strengths, such as 21 MPa and 17.5 MPa, allowing for an evaluation of the response of these elements under different configurations. The tests included beams with and without stirrups, revealing differences in the types of failure. The beams reinforced with stirrups failed due to bending, while those without stirrups failed predominantly due to shear.

One of the main aspects of the research was the evaluation of the behavior of the carbon fiber and the delamination mechanism. The experimental results showed that the incorporation of U-shaped anchors can modify the failure mechanism and improve the transfer of forces between the carbon fiber and the concrete. In one of the specimens equipped with four U-wraps, no delamination of the carbon fiber occurred, whereas in another specimen with a double-anchor system, partial detachment associated with concrete spalling was observed, without any complete delamination of the reinforcement.

Finally, the experimentally obtained results were compared with theoretical values, evaluating the load-carrying capacity, load–strain behavior, failure mechanism, and response of the reinforcement system.

In general, the results provide insight into the influence of beam configuration, concrete strength, load distribution, and, in particular, the use of U-shaped anchors on the failure mechanism and the prevention of failure due to CFRP delamination.

Keywords: Debonding, carbon fiber (CFRP), reinforced concrete beam.

ÍNDICE

Dedicatoria
Agradecimientos
RESUMEN
ABSTRACT
INTRODUCCIÓN 1
CAPÍTULO I 3
1. Planteamiento del problema 4
1.1 Problemática de la investigación 4
1.2 Problema 4
1.2.1 Problema general 4
1.2.2 Problemas específicos 4
1.3 Justificación de la investigación 5
1.3.1. Justificación ambiental 5
1.3.2. Justificación social 6
1.3.3. Justificación económica 6
1.3.4. Importancia de la investigación 6
1.3.5. Alcances 7
1.3.6. Limitaciones 7
1.4. Hipótesis 8
1.4.1. Hipótesis general 8
1.4.2. Hipótesis específicas 8
1.5. Objetivos de la investigación 9
1.5.1. Objetivo general 9
1.5.2. Objetivos específicos 9
1.6. Variables 10
1.6.1. Independiente 10
1.6.2. Dependiente 10
CAPÍTULO II 11
2. Fundamento teórico 12
2.1 Estado del arte 12

2.1.1. Internacionales 12
2.1.2. Nacionales 15
2.1.3. Locales 19
2.2. Marco legal 26
2.3. Marco teórico 26
2.3.1. Materiales principales 26
2.3.2. Elemento estructural en estudio: viga de concreto armado 33
2.4. Diseño estructural de viga de concreto armado 36
2.4.1. Diseño de refuerzo por flexión 36
2.4.2. Diseño de refuerzo por cortante 40
2.5. Comportamiento de vigas de concreto armado 43
2.6. Evaluación del desempeño estructural 48
2.6.1. Sintomatología en las estructuras de concreto armado 48
2.7. Intervención estructural de estructuras de concreto armado 49
2.7.1. Alternativas de reforzamiento de estructuras de concreto armado 49
2.8. Sistema de reforzamiento estructural con CFRP 51
2.8.1. Fibra de carbono 51
2.8.2. Adhesivo epóxico 60
2.8.3. Reforzamiento de vigas a flexión con CFRP 62
2.9. Reforzamiento a flexión en vigas de concreto reforzado mediante el uso de fibras de carbono según normativa ACI 440.2R-17 65
2.10. Propiedades técnicas del fabricante de la fibra de carbono 67
2.10.1. Propiedades técnicas para el diseño a flexión de la fibra de carbono 67
2.10.2. Cálculo de la deformación en el concreto en el instante de colocar el FRP 68
2.10.3. Determinar el coeficiente dependiente de adherencia del sistema del FRP 69
2.10.4. Estimar la profundidad del eje neutro 70
2.10.5. Determinar el nivel efectivo de deformación de la fibra de carbono 70
2.10.6. Determinar modo de falla 71
2.10.7. Nivel de resistencia en el refuerzo del acero estructural y el sistema FRP 72
2.10.8. Cálculo del equilibrio de fuerzas internas 73
2.10.9. Cálculo de los componentes de la resistencia de diseño a flexión del elemento estructural 75
2.10.10. Cálculo de momento resistencia a flexión reforzada con el sistema FRP 76

2.10.11. Verificación de esfuerzos de servicio en el acero estructural y el sistema FRP .. 77
2.10.12. Verificación del límite de ruptura por fluencia en servicio en sistema FRP 78
2.10.13. Longitud de desarrollo 78
2.11. Modos de fallo según la normativa ACI 440.2R-17 79
2.11.1. Aplastamiento del concreto en compresión antes de la fluencia del acero de refuerzo 79
2.11.2. Fluencia del acero a tensión seguida de rotura del laminado de FRP 80
2.11.3. Fluencia del acero a tensión seguida del aplastamiento del concreto 80
2.11.4. Delaminación por corte/tensión de la cubierta de concreto (delaminación del recubrimiento) 80
2.11.5. Desprendimiento del FRP del sustrato de concreto (desprendimiento de FRP) 81
2.12. Causas y condiciones que provocan la delaminación 81
2.12.1. Deficiente preparación de la superficie 81
2.12.2. Condiciones ambientales 81
2.12.3. Calidad del puente adherente 82
2.13. Mitigación de fallas 82
2.13.1. Métodos para evitar la delaminación 82
CAPÍTULO III 84
3. Metodología 85
3.1 Enfoque de la investigación 85
3.2 Nivel de investigación 85
3.3 Diseño de investigación 85
3.4 Tipo de investigación 86
3.5 Lugar de ensayo, materiales, equipos y procedimientos experimentales 86
3.5.1 Lugar de ensayos 86
3.5.2 Materiales e insumos 88
3.5.3 Equipos e instrumentos 92
3.5.4 Ensayos de caracterización de materiales 95
3.5.5 Procedimiento de fabricación de vigas de concreto armado 96
3.5.6 Curado y control de resistencia del concreto 98
3.5.7 Procedimiento de reforzamiento con CFRP 100
3.6 Población y muestra 101
3.7 Métodos de la investigación 103

3.7.1 Técnicas de recolección de datos 103
3.7.2 Método de análisis de datos 104
3.7.3 Prueba de hipótesis 104
3.8 Esquema del método de investigación 104
CAPÍTULO IV 107
4. Resultados 108
4.1. Resultados del ensayo de flexión 108
4.1.1. Carga máxima alcanzada 108
4.1.2. Deflexión máxima en el centro de luz de las vigas 110
4.1.3. Formación y propagación de grietas 111
4.2. Comportamiento estructural de las vigas reforzadas 113
4.2.1. Comportamiento del laminado longitudinal CFRP 113
4.2.2. Comportamiento de vigas con U-Wrap 116
4.3. Comportamiento del mecanismo de la delaminación 117
4.3.1. Etapas de aparición de la delaminación 117
4.3.2. Relación entre la delaminación y la falla estructural 118
4.4. Comparación experimental y teórica 118
4.4.1. Comparación de cargas de rotura 118
4.4.2. Diferencias entre el comportamiento teórico y experimental 121
CONCLUSIONES 126
RECOMENDACIONES 130
REFERENCIAS 132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Matriz estado del arte 23
Tabla 2 Pesos nominales por metro lineal según el diámetro de barra 30
Tabla 3 Características de vigas según tipo de armado, resistencia del concreto y disposición del refuerzo de acero 38
Tabla 4 Cuantías de acero longitudinal y transversal empleadas en el diseño de las vigas 39
Tabla 5 Espaciamiento máximo para el refuerzo de cortante 43
Tabla 6 Hoja de datos del producto SikaWrap ®-600C - Tejido de fibra de carbono para reforzamiento estructural 52
Tabla 7 Características técnicas de diferentes productos de CFRP utilizados para el reforzamiento de estructuras de concreto armado 54
Tabla 8 Propiedades técnicas del fabricante de la fibra de carbono utilizadas en el diseño del sistema FRP 67
Tabla 9 Factor de reducción ambiental para varios sistemas FRP y condiciones de exposición .. 68
Tabla 10 Propiedades técnicas para el diseño a flexión de la fibra de carbono utilizadas en el diseño del sistema FRP 68
Tabla 11 Modos de falla según ACI 440.2R 71
Tabla 12 Valores de β_1 para la distribución rectangular equivalente de esfuerzos en el concreto 74
Tabla 13 Materiales 88
Tabla 14 Insumos 90
Tabla 15 Equipos e instrumentos utilizados para la fabricación, reforzamiento y medición deformaciones de las vigas experimentales 92
Tabla 16 Ensayos de caracterización física de los agregados utilizados en la elaboración del concreto 95
Tabla 17 Procedimiento de fabricación de vigas experimentales de concreto armado 96
Tabla 18 Procedimiento de curado y evaluación de la resistencia del concreto 98
Tabla 19 Procedimiento de instalación del sistema de reforzamiento con fibra de carbono (CFRP) 100
Tabla 20 Características y especificaciones de las vigas de estudio 102
Tabla 21 Resultados experimentales de carga máxima de vigas sometidas a 01 carga puntual . 108

Tabla 22 Resultados experimentales de carga máxima de vigas sometidas a 02 cargas puntuales 109
Tabla 23 Resultados experimentales de deflexión máxima en el centro de luz de las vigas ensayadas 110
Tabla 24 Etapas del comportamiento de la viga donde se muestra la falla por delaminación.....118
Tabla 25 Comparación de las cargas de rotura experimentales y teóricas de las vigas ensayadas sometidas a una y dos cargas puntuales.....119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Curva esfuerzo-deformación y módulo de elasticidad del acero 31
Figura 2 Curva idealizada esfuerzo-deformación y módulo de elasticidad del acero según el ACI 318-25 32
Figura 3 Curva esfuerzo-deformación del acero 32
Figura 4 Vista isométrica de la viga de concreto armado empleada en los ensayos experimentales 37
Figura 5 Sección transversal de viga (a) Armado Tipo I y II 38
Figura 6 Sección transversal de viga (a) Armado Tipo III 38
Figura 7 Esquemas de carga de vigas y ecuaciones utilizadas para el cálculo del momento flector máximo 40
Figura 8 Viga simplemente apoyada sometida a cargas concentradas 44
Figura 9 Diagrama de momento resistente-curvatura de una sección de la viga sometida a carga uniformemente distribuida 45
Figura 10 Fuerzas que resisten el corte en vigas sin refuerzo en el alma de una viga 46
Figura 11 Patrón de fisuras para vigas de concreto con diferentes esbelteces 47
Figura 12 Fuerzas que resisten el corte en vigas con refuerzo en el alma de una viga 47
Figura 13 Resistencia al corte aportado por el concreto y por el acero longitudinal y transversal 48
Figura 14 Encamisado de concreto armado en viga y columna 50
Figura 15 Encamisado de concreto armado y armaduras dentro del encofrado 50
Figura 16 Refuerzo de estructuras de hormigón con polímeros reforzados con fibras 51
Figura 17 Comparación del Comportamiento de la Fibra de Carbono con otros Tipos de Refuerzo 52
Figura 18 Comportamiento de diferentes fibras de refuerzo (esfuerzo-deformación) 53
Figura 19 Clasificación de los sistemas de reforzamiento con fibra de carbono utilizados en ingeniería estructural 53
Figura 20 Laminado de las fibras de carbono (Flexión) 55
Figura 21 Laminado del refuerzo por cortante 55
Figura 22 Colocación de las fibras de carbono en torre 56
Figura 23 Reforzamiento de losas en dos direcciones 56

Figura 24 Reforzamiento con FRP de 3 a 4 capas según proyecto 57
Figura 25 Refuerzo de vigas, losas y encamisado de columnas 57
Figura 26 Refuerzo del Puente El Mirador 58
Figura 27 Reforzamiento FRP con fibra de carbono de columnas del Tren Eléctrico de Lima, Perú 58
Figura 28 Reforzamiento de viguetas de losas aligeradas del Complejo Cerro Verde 59
Figura 29 Reforzamiento estructural Sede Sunat – Arequipa 60
Figura 30 Sikadur®-301, resina Epóxica de impregnación para sistemas de reforzamiento con fibra de carbono 62
Figura 31 Diferentes tipos de daños en estructuras de concreto 62
Figura 32 Proceso de modernización de columnas utilizando materiales compuestos de fibra de carbono 64
Figura 33 Distribución de esfuerzos internos 72
Figura 34 Representación gráfica de las directrices para los puntos de terminación permitidos de un laminado de fibra de carbono – 03 capas 79
Figura 35 Despegue y delaminación de sistemas FRP adheridos externamente 80
Figura 36 Ensayos de caracterización de agregados en el Laboratorio de Suelos y Concreto de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Santa María de Arequipa87
Figura 37 Limpieza y acondicionamiento de la zona de trabajo brindada por la Universidad Nacional de San Agustín 87
Figura 38 Vista externa e interna del Marco de Reacción para los ensayos de flexión en las vigas a escala media dentro de la Universidad Nacional de San Agustín 88
Figura 39 Obtención de agregados de arena gruesa y piedra chancada HUSO 7 para la elaboración del concreto de la cantera "La Poderosa" adquiridas a través de Supermix..... 88
Figura 40 Cemento Portland Tipo HS Yura Max 89
Figura 41 Agua almacenada en cilindros para la elaboración de vigas 89
Figura 42 Armaduras de acero de refuerzo fabricadas para las vigas, conformadas por barras longitudinales de 3/8"y 8 mm y de 6 mm diámetro para los estribos 89
Figura 43 Fibra de carbono SikaWrap®-600C utilizada como sistema de reforzamiento externo en las vigas de concreto armado 89

Figura 44 Resina epóxica correspondiente al componente A del adhesivo Sikadur®-301, empleada para la instalación del sistema CFRP 90
Figura 45 Endurecedor correspondiente al componente B del adhesivo Sikadur®-301, utilizado para la preparación de la mezcla adhesiva del CFRP 90
Figura 46 Moldes fenólicos de fabricación propia utilizados para la elaboración de vigas de concreto armado de 10 × 20 × 210 cm..... 90
Figura 47 Moldes cilíndricos empleados para la fabricación de probetas de concreto destinadas a los ensayos de resistencia..... 90
Figura 48 Rodillo quitaburbujas utilizado para garantizar la correcta impregnación y adherencia de la fibra de carbono sobre la superficie del concreto..... 91
Figura 49 Desmoldante empleado para facilitar el retiro de los moldes fenólicos después del fraguado del concreto..... 91
Figura 50 Aplicación del adhesivo epóxico mediante rodillo manual durante el proceso de reforzamiento con fibra de carbono 91
Figura 51 Cono de Abrams utilizado para el control del asentamiento (slump) del concreto fresco 91
Figura 52 Compactación manual del concreto mediante varilla metálica durante el vaciado de las vigas experimentales..... 91
Figura 53 Vibrado manual externo del encofrado mediante martillo de goma para reducir vacíos en el concreto 91
Figura 54 Herramientas auxiliares empleadas durante las etapas de mezclado, vaciado y acabado superficial del concreto 92
Figura 55 Elementos utilizados para el transporte y manipulación de agregados, concreto fresco y materiales auxiliares..... 92
Figura 56 Sistema de referencia conformado por reglas metálicas y perfiles de aluminio utilizado para el registro de deformaciones durante los ensayos de flexión..... 92
Figura 57 Mezcladora utilizada durante la preparación y mezclado del concreto para la fabricación de las vigas experimentales..... 93
Figura 58 Equipo empleado para la evaluación no destructiva de la resistencia del concreto mediante propagación de ondas ultrasónicas..... 93

Figura 59 Gata hidráulica utilizada para la aplicación controlada de carga durante los ensayos de flexión 93
Figura 60 Marco de reacción utilizado para la transmisión de cargas durante los ensayos experimentales de flexión 93
Figura 61 Cabezales metálicos empleados para la aplicación de una y dos cargas puntuales sobre las vigas ensayadas 93
Figura 62 Sistema metálico de ensayo fabricado para la presente investigación, compuesto por dos apoyos metálicos con rodillos y una estructura longitudinal destinada a la instalación de diales digitales electrónicos para el registro de deformaciones y desplazamientos durante los ensayos de flexión 94
Figura 63 Instrumentos utilizados para el registro de deformaciones y desplazamientos durante los ensayos de flexión 94
Figura 64 Sistema digital Arduino, conectado a diales electrónicos para el registro y almacenamiento de datos durante los ensayos 94
Figura 65 Equipos empleados para el registro visual del comportamiento estructural, formación de fisuras y procesos de delaminación 94
Figura 66 Preparación superficial de las vigas mediante lijado previo a la aplicación del adhesivo epóxico y la instalación del CFRP 94
Figura 67 Proceso de cuarteo realizado para obtener muestras representativas de agregado fino y agregado grueso destinadas a los ensayos de caracterización 95
Figura 68 Tamizado mecánico empleado para determinar la distribución granulométrica de los agregados utilizados en la elaboración del concreto 95
Figura 69 Determinación experimental del contenido de humedad de los agregados mediante secado en horno 95
Figura 70 Procedimiento experimental para determinar el peso específico y la absorción del agregado fino y grueso 95
Figura 71 Enrasado del recipiente durante el ensayo de peso unitario suelto del agregado grueso 96
Figura 72 Compactación del agregado grueso en capas durante el ensayo de peso unitario compactado 96

Figura 73 Moldes fenólicos preparados y acondicionados para el vaciado de las vigas experimentales de concreto armado 96
Figura 74 Doblado y armado de estribos para elaborar armaduras de acero para las vigas y colocación de la armadura de acero de refuerzo dentro del encofrado de las vigas 96
Figura 75 Dosificación y mezclado de los materiales empleados para la preparación del concreto 96
Figura 76 Determinación del asentamiento del concreto fresco mediante el ensayo de cono de Abrams para verificar su trabajabilidad. 97
Figura 77 Colocación, compactación manual y acabado superficial del concreto en los moldes de las vigas 97
Figura 78 Moldeo, compactación y acabado de probetas cilíndricas destinadas al control de resistencia del concreto 98
Figura 79 Retiro de moldes y extracción de vigas y probetas después del fraguado inicial del concreto 98
Figura 80 Proceso de curado de vigas y probetas de concreto para garantizar el adecuado desarrollo de resistencia 98
Figura 81 Medición no destructiva de la calidad y resistencia del concreto mediante equipo de ultrasonido 98
Figura 82 Evaluación de la resistencia a compresión de probetas cilíndricas de concreto en laboratorio 99
Figura 83 Montaje experimental y aplicación de carga en vigas de concreto armado durante los ensayos de flexión 99
Figura 84 Lijado y limpieza de la superficie de las vigas previo a la instalación del sistema CFRP. 100
Figura 85 Trazado de las áreas destinadas a la colocación del refuerzo de fibra de carbono 100
Figura 86 Corte y acondicionamiento de las láminas de fibra de carbono según las dimensiones de diseño 100
Figura 87 Dosificación y mezclado de los componentes A y B del adhesivo Sikadur®-301 100
Figura 88 Aplicación del adhesivo epóxico y colocación de la fibra de carbono sobre la superficie de las vigas 100

Figura 89 Compactación de la fibra de carbono mediante rodillo quitaburbujas para asegurar su correcta adherencia. 100
Figura 90 Secado y curado del sistema de reforzamiento con fibra de carbono previo a los ensayos estructurales..... 101
Figura 91 Marcado superficial de las vigas para el registro y seguimiento de la propagación de fisuras durante los ensayos de flexión 101
Figura 92 Diagramas de flujo: Vigas de Concreto Armado Patrón y Vigas de Concreto Armado Reforzadas con Fibra de Carbono..... 106
Figura 93 Carga vs deflexión de vigas que fallaron por flexión.....112
Figura 94 Carga vs deflexión de vigas que fallaron por cortante 113
Figura 95 Comportamiento estructural y formación de fisuras en la viga V3 sometida a carga puntual.....114
Figura 96 Manifestación del modo de falla por delaminación de la fibra de carbono en la zona de tracción de la viga V3 114
Figura 97 Comportamiento estructural y formación de fisuras en la viga V7 sometida a dos cargas puntuales 115
Figura 98 Comportamiento estructural y formación de fisuras en la viga V8 sometida a dos cargas puntuales 115
Figura 99 Comportamiento estructural y formación de fisuras en la viga V10 sometida a dos cargas puntuales 115
Figura 100 Fallas estructurales de vigas V7, V8 y V10.....116
Figura 101 Falla estructural de viga V1.....117

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A Matriz de Consistencia 136
Anexo B Matriz de Operacionalización de Variables 139
Anexo C Análisis Granulométrico de Agregado Grueso y Fino 140
Anexo D Resultados de Ensayos de Laboratorio y Diseño de Mezclas 142
Anexo E Diseño de Flexión de Vigas 143
Anexo F Detalle Aceros Viga-Tipo I 147
Anexo G Detalle Aceros Viga-Tipo II 148
Anexo H Detalle Aceros Viga-Tipo III 149
Anexo I Resultados obtenidos mediante el Equipo de Ultrasonido 150
Anexo J Resultados de Ensayos de Compresión de Probetas 151
Anexo K Procedimiento para el reforzamiento a flexión de una viga de concreto armado con CFRP 153
Anexo L Registro de Deformaciones y Carga de Rotura 160

INTRODUCCIÓN

El concreto armado es el material predominante más utilizado en el campo de la ingeniería civil, debido a sus excelentes propiedades mecánicas, durabilidad y de fácil ejecución. A pesar de ello, no es inmune al deterioro o a los cambios a lo largo del tiempo, por lo que existe la necesidad de reforzar estas estructuras, ello ocurre debido al incremento de las cargas de servicio, cambios de uso, deficiencias de diseño o el envejecimiento de los materiales, los cuales pueden reducir su seguridad estructural haciendo necesaria la aplicación de técnicas de reforzamiento que permitan mejorar su comportamiento y prolongar su vida útil sin incrementar significativamente su peso propio ni alterar sus características geométricas. El empleo de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP), es una alternativa de reforzamiento disponible en el mercado, este ha adquirido relevancia debido a su elevada capacidad resistente a la tracción, corrosión, durabilidad frente a la corrosión, bajo peso y una alta celeridad en el proceso constructivo. Diversas investigaciones han demostrado que la aplicación de la fibra de carbono como reforzamiento en vigas de concreto armado permite incrementar su capacidad resistente del elemento y mejora su comportamiento frente a cargas de flexión. En contraste, la eficiencia de dicho sistema de reforzamiento se puede ver limitada por diferentes modos de falla. Entre ellos, la delaminación de la fibra de carbono que constituye uno de los mecanismos más críticos, ya que implica el despegue o desprendimiento parcial o total del CFRP antes de que este llegue a su capacidad máxima resistente. Por lo tanto, se reduce el aprovechamiento del reforzamiento y se modifica el comportamiento esperado del elemento estructural.

La manifestación de la delaminación está asociada a diversos factores, tales como la calidad de adherencia entre el sustrato del concreto y el CFRP, la aparición de fisuras, la disposición del refuerzo interno del acero, las condiciones de carga y el uso de un sistema de anclaje.

Adicionalmente, estos factores pueden influir en el modo de falla de las vigas, generando respuestas estructurales que varían desde los comportamientos predominantes dúctiles hasta fallas frágiles asociadas a esfuerzos de cortante o despegue prematuro del refuerzo. Dada la naturaleza de dichos comportamientos, resulta necesario desarrollar investigaciones experimentales que permitan comprender en detalle los fenómenos involucrados en la aparición de la delaminación en elementos reforzados con fibra de carbono. Por lo que, su evaluación contribuye a optimizar las técnicas de reforzamiento y a mejorar los criterios de diseño y aplicación de este material en estructuras de concreto armado a reforzar.

En ese contexto, la presente investigación evalúa experimentalmente el mecanismo de delaminación en vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono sometidas a ensayos de flexión. Para ello, se analizaron doce especímenes con distintas resistencias a la compresión del concreto, configuraciones de refuerzo interno, presencia o ausencia de estribos, condiciones de carga y sistemas de anclaje, con el propósito de identificar la influencia de estas variables sobre el comportamiento estructural, los modos de falla y la evolución del proceso de delaminación.

CAPÍTULO I

1. Planteamiento del problema

1.1 Problemática de la investigación

El empleo de la fibra de carbono como material de refuerzo estructural en vigas de concreto armado ha sido aplicado para mejorar la capacidad resistente y comportamiento estructural de dichos elementos estructurales. Sin embargo, uno de los principales problemas asociados a este tipo de refuerzo es la falla por delaminación, la cual consiste en el desprendimiento de la fibra de carbono respecto a la superficie del concreto, lo que limita su eficiencia estructural.

La delaminación de fibra de carbono en vigas de concreto armado bajo esfuerzos de flexión, puede provocar fallos prematuros antes de alcanzar su resistencia esperada por diseño y comprometer la seguridad estructural. Dado que los cálculos teóricos son insuficientes para predecir cómo afectan las grietas de corte a la adherencia de la fibra de carbono, es necesario investigar experimentalmente estos elementos. Mediante la observación directa en el laboratorio es posible que entendamos cómo los distintos escenarios de las vigas influyen en el mecanismo de falla final.

1.2 Problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo se desarrolla el mecanismo de delaminación en vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono bajo ensayo de flexión?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo influye la disposición del refuerzo estructural en la aparición de la falla por delaminación en vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono?

- ¿En qué etapa del ensayo de flexión se presenta la falla por delaminación en las vigas de concreto armado?
- ¿Cuál es el comportamiento estructural predominante de las vigas reforzadas con fibra de carbono durante el ensayo de flexión?
- ¿Qué efecto tiene el refuerzo con fibra de carbono como laminado longitudinal en el comportamiento de las vigas?
- ¿Cómo influye el uso de refuerzo tipo U-Wrap en el control o reducción de la delaminación?
- ¿Qué tipos de falla estructural se presentan en las vigas ensayadas y cómo se relacionan con la falla por delaminación?
- ¿Qué diferencias existen entre el comportamiento experimental y el comportamiento teórico de las vigas?
- ¿Qué factores influyen en la falla por delaminación en vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono?

1.3 Justificación de la investigación

1.3.1. Justificación ambiental

La aplicación de la fibra de carbono como alternativa de reforzamiento estructural presenta importantes ventajas estructurales, pero no solo eso, sino contribuye a la reducción del impacto ambiental, ya que, al utilizar este tipo de reforzamientos, disminuye la necesidad de realizar trabajos de demolición, lo que reduce la generación de residuos y escombros de construcción. Es decir que es una opción sostenible que favorece al desarrollo de prácticas de reforzamiento estructural dentro del sector de la construcción.

1.3.2. Justificación social

Investigar el uso de las fibras de carbono en vigas de concreto armado como reforzamiento estructural es crucial no solo desde el punto de vista técnico, sino social. A medida que la población crece y se construyen nuevas infraestructuras, la integridad de estas nuevas construcciones se vuelven críticas. Incrementar la seguridad de las estructuras contribuye a salvaguardar la vida y el bienestar de las personas que hacen uso de estas estructuras.

1.3.3. Justificación económica

Esta alternativa de reforzamiento estructural presenta un costo elevado en comparación con otros materiales de reforzamiento. Sin embargo, no existe la necesidad de realizar demoliciones o reconstrucciones. Ello reduce costos de mano de obra, maquinaria y eliminación de escombros. Además, se requiere menor tiempo en su aplicación y disminuye futuros gastos de mantenimiento debido a que tiene una alta durabilidad. Por lo que representa una alternativa rentable a largo plazo para el reforzamiento estructural.

1.3.4. Importancia de la investigación

La presente investigación experimental contribuye al entendimiento del comportamiento estructural de vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono (CFRP) sometidas a ensayos de flexión, enfocándose en el mecanismo de la falla por delaminación de la fibra de carbono, uno de los modos de falla más comunes y críticos en este tipo de refuerzo; además el estudio considera vigas bajo diferentes escenarios de cargas aplicadas, así como variaciones en los refuerzos de acero estructural y valores de resistencia a la compresión del concreto ($f'c$), con lo cual se busca observar de manera más integral el comportamiento estructural de las vigas;

asimismo, aporta información experimental relevante que pueda servir como base para el desarrollo de futuras normativas de reforzamiento.

1.3.5. Alcances

El estudio contempla ensayos experimentales de vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono bajo diferentes condiciones sometidos a flexión, con el objetivo de evaluar el mecanismo de la falla por delaminación del reforzamiento externo.

Los ensayos se desarrollan en condiciones de laboratorio, elaborando vigas a escala media, por lo que los resultados que se obtuvieron representan un comportamiento experimental controlado y no incluyen efectos ambientales complejos, lo que permite comparar los comportamientos estructurales entre los distintos especímenes evaluados.

1.3.6. Limitaciones

La investigación enfrentó ciertas limitaciones, entre las cuales se destacan las siguientes:

Condiciones específicas del material: Las condiciones estarán limitadas a los materiales específicos empleados en la investigación, tales como tipo de fibra de carbono, puente adherente y las condiciones del concreto.

Ambiente de laboratorio controlado: Los ensayos experimentales se llevararon a cabo en condiciones de laboratorio, lo que puede diferir de las condiciones reales en obra, donde factores ambientales y externos pueden afectar al rendimiento de las vigas reforzadas.

Variabilidad en la aplicación de la fibra de carbono: La efectividad del sistema CFRP para controlar la falla por delaminación está condicionada a la calidad del proceso de aplicación. En el entorno de laboratorio pueden existir factores que pueden alterar el desempeño esperado del

refuerzo, tales como una inadecuada preparación superficial del concreto, aparición de burbujas de aire durante el laminado manual y el respeto al tiempo de trabajabilidad del adhesivo epóxico.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

El mecanismo de la falla por delaminación en vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono bajo ensayo de flexión está influenciado por la disposición del refuerzo interno y externo estructural, de modo que en ciertos escenarios y configuraciones se incrementará la probabilidad de falla por delaminación, mientras que en otras permitirá retrasarla o reducirla.

1.4.2. Hipótesis específicas

- La disposición del refuerzo estructural influye significativamente en la aparición de la falla por delaminación.
- La delaminación se presenta en distintas etapas del ensayo, dependiendo del comportamiento de la viga.
- Las vigas presentan dos comportamientos predominantes: flexión y cortante.
- El refuerzo con fibra de carbono como laminado longitudinal, mejora el comportamiento estructural, pero su efectividad depende del tipo de falla.
- El uso de refuerzos tipo U-Wrap retrasa la aparición de la delaminación.
- La falla por delaminación está asociada al tipo de falla estructural que presenta la viga.
- Existen diferencias entre el comportamiento experimental y teórico, debido a condiciones reales de ejecución en laboratorio.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo general

Evaluar experimentalmente el mecanismo de delaminación en vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono bajo ensayo de flexión, con el fin de comprender su comportamiento en función de la disposición del refuerzo y su influencia en la falla estructural.

1.5.2. Objetivos específicos

- Evaluar la influencia de la disposición del refuerzo en la aparición de la falla por delaminación de la fibra de carbono.
- Identificar en qué etapa del ensayo se presenta la falla por delaminación de la fibra de carbono.
- Analizar el comportamiento estructural de las vigas durante el ensayo de flexión
- Evaluar el desempeño del refuerzo longitudinal de fibra de carbono en cada viga.
- Analizar el efecto del uso de refuerzos tipo U (U-Wraps) en el control de la falla por delaminación.
- Identificar los tipos de comportamiento estructural predominantes en las vigas.
- Comparar el comportamiento experimental con el comportamiento teórico esperado.
- Identificar los principales factores que influyen en la falla por delaminación de las fibras de carbono en vigas de concreto armado bajo esfuerzos de flexión.

1.6. Variables

1.6.1. Independiente

- **Disposición del refuerzo estructural**

Se define como la configuración de los elementos de reforzamiento tanto internos como externos, aplicados a las vigas de concreto armado. Dicha variable representa la condición durante el ensayo para evaluar su impacto en la capacidad resistente de la viga.

1.6.2. Dependiente

- **Falla por delaminación**

Este tipo de variable está directamente influenciado por el modo de falla de la viga al momento del ensayo, ya sea que predomine la flexión o el cortante. Su evaluación experimental comprende tanto el momento de aparición de las fisuras durante el ensayo, como la ubicación y extensión del despegue de la fibra de carbono a lo largo del elemento, permitiendo caracterizar la eficiencia de la adherencia según las distintas condiciones y escenarios de las vigas evaluadas.

CAPÍTULO II

2. Fundamento teórico

2.1 Estado del arte

2.1.1. Internacionales

Fahed H, Hayder A, y Huthaifa I (2024), en el artículo científico titulado: "Explicando los mecanismos de fallo por delaminación del recubrimiento de concreto en vigas de hormigón armado reforzadas con CFRP para proponer un enfoque de diseño basado en la mecánica", investigaron el fenómeno de la falla por delaminación de la cubierta del concreto en vigas de concreto armado reforzadas con CFRP, señalando que la presencia de los modos de falla prematuros representa una limitación para su diseño. Es por ello que dicho estudio tuvo como propósito explicar detalladamente este mecanismo mediante investigaciones analíticas previas y ensayos experimentales, considerando 04 vigas para la demostración de la formulación analítica. Los resultados mostraron que la falla en estudio puede presentarse antes que el despegue de la fibra de carbono, por lo que debe considerarse como un estado límite independiente dentro del diseño. Asimismo, determinaron que la longitud y el espesor del laminado CFRP influyen en la forma de la superficie donde aparece la falla, siendo las láminas cortas más propensas a generar concentraciones de esfuerzos que favorecen este modo de falla. También demostraron que existe una relación directa entre la deformación de la viga y la deformación en el extremo de la lámina de fibra de carbono. Finalmente, concluyeron que el comportamiento real suele ubicarse entre dos superficies de falla analizadas, por lo que recomiendan emplear una superficie promedio para fines de diseño.

Muhammad, Ravi, Kent A, y Jovan (2024), en el artículo científico titulado: "Uso complementario de envolturas en U de FRP como refuerzo de corte suplementario y anclaje en vigas de concreto armado reforzadas con láminas de FRP externas adheridas para flexión",

tuvieron como objetivo mejorar la comprensión de la interacción entre el comportamiento de las vigas reforzadas con los anclajes envolventes en U y como estos contribuyen a su desempeño estructural en vigas reforzadas en flexión. Su investigación fue de carácter experimental y se evaluó 12 vigas. Los resultados mostraron un incremento significativo de la resistencia a corte, lograron el incremento de hasta 76% en vigas que tenían deficiencias a falla por cortante. Estos envolventes en U, mejoraron el desempeño de la fibra de carbono al resistir esfuerzos por flexión, permitieron que la lámina aproveche una deformación mayor antes de que falle, alcanzando 118% más a los límites de desprendimiento establecidos por la normativa vigente. Su estudio aporta a la investigación debido a que emplearon anclajes tipo U-Wrap para la mejora de la adherencia entre los dos materiales y el control de los modos de falla relacionados al desprendimiento. De manera similar, en la presente investigación se emplearon anclajes en forma de U dispuestos en los extremos de algunos especímenes, con el propósito de evaluar experimentalmente el comportamiento estructural de las vigas y analizar el mecanismo de falla por delaminación del CFRP.

Muhammad Usman, Soo-Yeon, Hai Van y Khol (2023), en el artículo científico titulado: "Monitoreo y caracterización del despegue en vigas de concreto armado reforzadas con CFRP utilizando tecnología de emisión acústica" tuvieron como propósito monitorear de manera continua elementos estructurales rehabilitados. Lo novedoso de este estudio fue la utilización de la tecnología de emisión acústica como método de monitoreo, debido a que constituye una técnica no invasiva es decir, sin alterar el elemento estructural. El estudio se desarrolló bajo un enfoque experimental, consideraron 03 vigas T de concreto armado sometidas a flexión y las monitorearon usando este tipo de tecnología, mediante emisiones acústicas, centrándose en la detección de fisuras ocultas y el mecanismo de la delaminación en vigas de concreto armado reforzadas con

CFRP por medio de sensores. En los resultados determinaron que aunque la fibra de carbono incrementa la resistencia de las vigas, la falla suele producirse por delaminación prematura del laminado de fibra de carbono impidiendo que trabaje en su totalidad. Observaron que la presencia de defectos en la interfaz entre el concreto y el CFRP, influye de manera directa en el mecanismo de la falla en estudio. Además, analizaron los sonidos mediante fórmulas que los autores utilizaron para poder identificar dos tipos de daños antes de que las vigas T se rompan: Modo-I (Desgarramiento normal) y Modo-II (Desgarramiento por corte). En conclusión, demostraron que la emisión acústica es una gran herramienta para monitorear el crecimiento de fisuras y detectar estos modos de falla en vigas reforzadas con fibra de carbono.

Thamrin, Zaidir, y Desharma (2021), en el artículo científico titulado: "Análisis de falla por desprendimiento de vigas de concreto armado reforzadas con placas de CFRP", desarrollaron una investigación experimental sobre vigas de concreto armado reforzadas con placas de fibra de carbono adheridas externamente, con el objetivo de analizar la influencia de la relación de refuerzo en el comportamiento a flexión y en la falla por delaminación. Ensayaron 06 vigas simplemente apoyadas sometidas a flexión en cuatro puntos, observándose que la relación de refuerzo longitudinal influye directamente en el comportamiento estructural y en el momento de desprendimiento del CFRP. Los resultados permitieron concluir que variables como la cuantía de acero, el módulo de elasticidad del concreto y el espesor de la placa de CFRP afectan significativamente el mecanismo de delaminación. El uso de las placas de fibra de carbono aumentó la capacidad a flexión entre 10 % a 50 % en comparación con vigas patrón. Finalmente, los autores desarrollaron un modelo matemático que predice de manera conservadora la carga de desprendimiento. Este es un antecedente que guarda relación con la presente investigación porque

demuestra que las características del reforzamiento estructural de las vigas, influyen directamente en la aparición de este modo de falla, aspecto importante para la evaluación de esta tesis.

Iskaner, Melad, Yasser, Rahim, y Mosa (2020), en el artículo científico titulado: "Efecto de la ubicación del pegado de tiras de CFRP en la capacidad flexural y ductilidad de vigas de concreto reforzado", tuvieron como finalidad evaluar el impacto de cambiar la ubicación de las láminas de fibra de carbono respecto a la sección transversal de las vigas. Para ello, consideraron, 10 vigas de concreto armado sometidos a flexión bajo tres puntos de carga. Los resultados determinaron que las tiras de fibra de carbono adheridas a los lados de las vigas fueron tan efectivas como aquellas que fueron adheridas solo en la parte inferior de las vigas. Sin embargo, observaron que la ductilidad de las vigas reforzadas externamente fue menor en comparación con la del elemento estructural original, por lo que recomendaron considerar este aspecto durante el diseño. Además, concluyeron que al colocar anclajes en las puntas de los extremos puede aumentar la capacidad resistente de las vigas ya que así retrasa la delaminación prematura en dichas zonas.

2.1.2. Nacionales

Silva Diaz y Mendoza Rugel (2023), en el trabajo de suficiencia profesional titulado: Propuesta de reforzamiento de estructuras con fibra de carbono en viviendas, por cambio de uso o ampliación de área construida – Lima", presentaron un trabajo que se desarrolló con el fin de proponer un sistema de reforzamiento limpio y no invasivo para edificaciones que contemplen cambios de uso en la ciudad de Lima, ya que así mejorará su resistencia frente a sobrecargas que no estaban previstas en su diseño. De acuerdo a su recopilación de datos de investigaciones previas, validaron que el uso de la fibra de carbono es buena alternativa para reforzar una vivienda multifamiliar que será sometida a cambio de uso. Además, propusieron la modificación de vigas y losas de una vivienda multifamiliar ubicada en la Urb. Residencial Vipol de Naranjal Mz. C, lote

33, en el distrito de San Martín de Porres en la ciudad de Lima, mediante la aplicación de fibra de carbono para adecuar a la estructura al cambio de uso de vivienda multifamiliar a almacén. Los resultados demostraron que no todos los elementos estructurales necesitan este tipo de refuerzo, ya que previamente realizaron un análisis de que elementos requerían fibra de carbono. También mostraron que si se aplica dos capas de CFRP, se obtiene un aumento significativo en la resistencia al momento máximo. No es necesario reforzar con este material todo el elemento estructural , solo es importante aplicarla en zonas donde actúen los momentos flectores máximos. Asimismo, señalan que cualquier estructura analizada debe ser reforzada en un valor menor al 40% según la normativa ACI 440.2R-17. En este estudio se concluye que para fortalecer una estructura de concreto armado , es conveniente utilizar la fibra de carbono como reforzamiento ya que mejora ciertas características y el comportamiento estructural de edificaciones sometidas a cambios de uso o ampliaciones.

Alfaro Valencia y Hernández Nongrados (2023), en la tesis titulada: “Reforzamiento estructural de vigas mediante el uso de fibras de carbono (CFRP) en una vivienda de 4 pisos ubicada en el distrito de Carabayllo, Lima”, buscaron reforzar elementos estructurales horizontales (vigas) con fibra de carbono para que tenga como fin, la mejora de las condiciones estructurales de una vivienda de 04 pisos en el distrito de Carabayllo. El estudio previo fue identificar daños estructurales, hacer un análisis estructural lineal de la edificación y efectuar una comparación económica con otras alternativas de reforzamiento disponibles en el mercado. Por ello, concluyen que no es una solución universal para todos los componentes de una estructura, ya que al tener un elemento muy agrietado con exposición del acero, recomendó optar por el encamisado en lugar de usar fibra de carbono. El análisis estructural fue importante ya que así detectó las zonas críticas de la vivienda y decidió dónde era necesario la colocación del CFRP. También determinaron que al

menos 02 capas de fibra de carbono mejoraban la resistencia de una viga con poco acero de refuerzo, sin embargo reduce su ductilidad. Por otro lado, concluye que la elección de este método de reforzamiento es costoso a comparación del reforzamiento convencional, sin embargo; hay que considerar que con el CFRP presentó ventajas como la menor generación de trabajos de limpieza , la ausencia de necesidad de escanear el acero estructural y una menor afectación a la arquitectura de la edificación.

Aquino Cusquisibán (2019), en la tesis titulada: “Variación de la resistencia a la flexión de vigas de concreto armado reforzadas con láminas de fibra de carbono (CFRP)”, tuvo como finalidad determinar la variación de la resistencia a la flexión de vigas de concreto armado que fueron reforzadas con CFRP, tal como dice el título de dicha investigación. Para ello, fabricó 20 vigas de concreto armado a escala media (1.2 m x 0.15 m x 0.20 m), las cuales un grupo de 10 vigas fueron reforzadas con lámina de fibra de carbono (Sika Carbodur S512) , considerando diferentes resistencias del concreto (210 y 280 kgf/cm2); mientras que el otro grupo fueron vigas patrón sin reforzamiento CFRP. Cada viga fue sometida a ensayo de flexión. La variación de la resistencia que obtuvo con respecto a las vigas de control fue de 63.6% y 59.8%, es decir que las vigas reforzadas con CFRP, soportaron una carga de flexión mucho mayor, por lo que los autores concluyen que la fibra de carbono (Sika Carbodur S512) es eficiente e incrementa la ductilidad ya que no observaron deflexiones considerables. Por otro lado, menciona que la adhesión entre el CFRP y el sustrato del concreto tendría que ser de calidad ya que una deficiente adherencia provocaría el despegue prematuro del CFRP antes de que alcance su resistencia para la cual fue diseñada. Este estudio aporta directamente a la presente tesis como un antecedente metodológico y comparativo ya que permite contrastar los resultados de las variaciones de resistencia frente a la

propuesta de anclajes que fueron orientados para mitigar la falla por delaminación de la lámina de fibra de carbono puesto en la zona de tracción del elemento estructural.

Depaz Hidalgo (2019), en la tesis titulada: “Aplicación de fibra de carbono CFRP en el reforzamiento a flexión de vigas experimentales de concreto armado en la ciudad de Huaraz en el año 2018”, tuvo como objetivo general , comparar la resistencia teórica de la cantidad de fibra de carbono como reforzamiento en vigas de concreto armado con la resistencia experimental de laboratorio. Es por eso que el autor realizó el vaciado de 03 vigas patrón (sin CFRP) y 12 vigas (con CFRP) con distintas áreas de refuerzo de fibra de carbono diseñados para que las vigas soportaran 03 tipos de cargas adicionales respecto a las iniciales. Todos los especímenes fueron ensayados en una máquina universal con una carga monotónica, para obtener datos de las mediciones, utilizó instrumentos como deformímetros que midieron las deformaciones en la parte superior e inferior y un vernier digital que midió la deflexión, las vigas fueron sometidas a 01 carga puntual en el medio. Los resultados de los ensayos experimentales dieron a conocer que la resistencia experimental a flexión de las vigas de concreto armado no llegaron a la resistencia teórica , lo que indicó la necesidad de ajustar modelos de cálculos para que se aproximen a un comportamiento real. Comprobó que la capacidad resistente a flexión de las vigas mejoró en función de la cantidad de fibra de carbono aplicada como refuerzo. Además, concluyeron que en diseño de este tipo de refuerzo , es conveniente usar un factor conservador como 0.55 ya que así se aproxima el diseño en teoría a la realidad.

Alegre Gago (2017), en la tesis titulada: “Estudio de la influencia en la resistencia y ductilidad de las fibras de carbono utilizadas como reforzamiento de vigas de concreto armado”, determinó el comportamiento elástico e inelástico de 12 vigas de concreto armado con tres cuantías distintas de acero, reforzados con fibra de carbono, que elaboró para que estas sean sometidas a

ensayos a flexión. Observó que cuando la viga tenía poco refuerzo de acero, la fibra de carbono ayudó mucho más, aumentando hasta 58.9% de resistencia y si en caso contrario la viga tuvo menos refuerzo de acero, el aumento fue menor , llegando a 18.4%. También concluyó que la fibra de carbono no se deforma mucho antes de fallar y cuando pasa eso, lo hace de forma frágil y rápida. Determinó que las vigas con CFRP resistieron más evidentemente, sin embargo se deformaron menos antes de fallar, y las vigas con poco acero, se redujo bastante su ductilidad al igual que las vigas que se les colocaba más fibra de carbono. En el diseño, tomó en cuenta la posibilidad de que suceda el modo de falla de la delaminación, por eso es que en el ensayo experimental se consideró el comportamiento de la viga hasta que ocurre esta falla. El autor recomendó que este tipo de reforzamiento sea aplicado en zonas donde la demanda sísmica no sea muy alta porque reduce la ductilidad de la estructura. Tal como el autor Depaz Hidalgo (2019), también indicó que se debe colocar el CFRP en zonas de momento positivo máximos donde se trabaja mejor a flexión. Realizó una comparación de costos, en el que concluye que el reforzamiento con CFRP es más costoso que el "encamisetado" de concreto, sin embargo al considerar el menor tiempo de trabajo, menos mano de obra y además que no afecta significativamente la estructura durante su instalación, termina siendo una alternativa eficiente y conveniente para el reforzamiento estructural.

2.1.3. Locales

Ugarte Tassara y Valdez Gamarra (2024), en la tesis titulada: "Determinación de la técnica de refuerzo más económica para el diseño de vigas entre el refuerzo con láminas de fibra de carbono y el diseño de vigas doblemente reforzadas con acero", buscaron evaluar el aporte de la resistencia a la flexión de vigas de concreto armado reforzadas con CFRP y vigas doblemente reforzadas con acero estructural, donde tomaron en cuenta la longitud de las vigas; así determinar cuál de ellas es más conveniente en tema de economía. Determinaron que la aplicación de la fibra

de carbono es cara, en especial en vigas de menor longitud , ya que no se aprovechan tanto las ventajas técnicas del CFRP. Encontraron que el costo de este tipo de reforzamiento depende de la sección de las vigas y que existe un "punto de equilibrio" donde ambos métodos cuestan casi lo mismo, el impacto del costo es notorio es cuando se refuerza vigas cortas. La longitud y la sección de las vigas influyen directamente en el costo del reforzamiento. Aunque la fibra de carbono resulta ser costosa, ofrece ventajas a largo plazo como menos necesidad de reparaciones futuras y un buen comportamiento a lo largo del tiempo.

Medina Deza (2020) en la tesis titulada: "Evaluación estructural de sistemas de reforzamiento en vigas de concreto armado con fibras de carbono y planchas de acero sometidas de flexión", analizó el comportamiento de los dos sistemas de reforzamiento, sacando conclusiones de los ensayos experimentales que realizó en vigas de concreto armado a escala real sometidas a flexión. Ello se realizó utilizando 06 vigas de concreto armado, las cuales fueron reparadas y reforzadas. A la mitad de ellas se les aplicó refuerzo con planchas de acero y a las otras se les aplicó refuerzo con fibra de carbono, con el fin de evaluar y comparar sus comportamientos estructurales. Durante los ensayos experimentales, observaron que las vigas reforzadas con CFRP aumentó su resistencia a la flexión , pero tuvieron un comportamiento frágil, fallaron sin tener mucha deformación,en ciertas vigas el aumento de resistencia fue menor cuando hubo fallas por grietas (18%) y mayor (44%) cuando hubo la falla por delaminación. El caso de las vigas reforzadas con planchas de acero, mostraron mayor incremento de resistencia y tuvieron un comportamiento más dúctil , lo que confirma que este tipo de reforzamiento permitió deformaciones más seguras antes de un colapso. El estudio permitió comparar dos sistemas de reforzamiento para elementos estructurales (vigas) y entender como se comportan bajo condiciones de laboratorio. Aunque aborda otro tipo de sistema de reforzamiento, se encuentra

directamente relacionada con el uso del CFRP, que constituye el eje principal de la presente investigación, su revisión permitió orientar y comprender el comportamiento de vigas a escala real, así como su desempeño estructural.

Aguilar Chama y Cari Montoya (2019), en la tesis titulada: “Verificación de la efectividad del uso de la fibra de carbono en el reforzamiento de vigas de concreto armado sometidas a esfuerzo de flexión y corte”. Llevaron a cabo mediante la fabricación de 42 vigas de concreto armado a escala (0.15 m x 0.15 m x 0.70 m) y fueron sometidos a ensayo de flexión y corte en el laboratorio expuestos a cargas puntuales, se definieron 03 diseños de mezclas (210,175 y 140 kgf/cm2) , donde vieron el tipo de fisuración y el ángulo de corte. Concluyen que este tipo de reforzamiento es realmente efectivo tanto para flexión como para corte. Además, determinaron que la efectividad del refuerzo depende de la manera en que se coloca la fibra de carbono, siendo la más eficiente la disposición inclinada a 45°, compararon que la resistencia experimental alcanzaron una mayor resistencia a la que calcularon teóricamente. , superándola entre un (20% - 25%). Finalmente, comprobaron que este tipo de reforzamiento funciona de manera adecuada, incluso en vigas que ya presentaron fisuras antes de colocar el adhesivo epóxico. Recomendaron utilizar refuerzos combinados (flexión y corte) , ya que el refuerzo únicamente a flexión puede inducir a fallas por cortante antes de que la fibra trabaje completamente su capacidad resistente.

Calla Deza y Torres Almirón (2015), en la tesis titulada: “Reforzamiento por flexión de vigas de concreto armado con fibra de carbono”, realizaron mediante la elaboración de 39 especímenes de 0.15 m x 0.15 m x 0.6 m , con diferentes diseños de mezclas (140 , 210 y 280 kgf/cm2) , refuerzo de acero (8 mm, ¼” y 3/8”) y área de refuerzo de fibra de carbono (ancha o delgada). Durante los ensayos, demostraron que es efectivo el reforzamiento aplicado para someterlas a flexión, ya que llegaron a un momento resistente mayor (entre 30% y 40% más),

además influye un 10% la calidad del concreto por lo que es posible que se refuerce elementos estructurales con baja calidad de concreto. Esta tesis se relaciona con esta investigación debido a que se apreció fallas por cortante a pesar de que las vigas fueron diseñadas por flexión, superando momentos máximos calculados teóricamente, además el CFRP controla y evita deformaciones mayores en un 50%, debido a la rigidez de las vigas reforzadas. Asimismo, este estudio evidencia que las vigas sin reforzamiento de acero, presenta fallas frágiles y abruptas, es así que de manera similar , se evaluó el comportamiento de las vigas ensayadas, observándose que la disposición del acero y la presencia de estribos influyen en el tipo de falla.

Matriz estado del arte

Tabla 1 Matriz estado del arte

ÁMBITO	N°	TIPO DE DOCUMENTO	AUTOR(ES)	TIPO DE INVESTIGACIÓN	APORTE A LA INVESTIGACIÓN
INTERNACIONALES	1	Artículo Científico	Fahed H, Hayder A, y Huthaifa I	Experimental con componente analítico	Analiza el mecanismo de delaminación del recubrimiento de concreto en vigas reforzadas con CFRP y demuestra que puede presentarse como un modo de falla prematuro. Aporta criterios para comprender su mecanismo, superficie de falla y relación con la deformación del CFRP.
	2	Artículo Científico	Muhammad , Ravi, Kent A, y Jovan	Experimental	Evalúa el efecto de los anclajes tipo U-Wrap en vigas reforzadas con FRP. Aporta evidencia experimental sobre su capacidad para mejorar la transferencia de esfuerzos, incrementar la resistencia a cortante y retrasar el desprendimiento del CFRP.
	3	Artículo Científico	Muhammad Usman, Soo-Yeon, Hai Van, y Khol	Experimental	Estudia mediante emisión acústica el crecimiento de fisuras y la delaminación en vigas reforzadas con CFRP. Aporta información sobre la relación entre los defectos de interfaz concreto–CFRP y la aparición de la falla por delaminación.
	4	Artículo Científico	Thamrin, Zaidir, y Desharma	Experimental	Analiza la influencia de la cuantía de refuerzo y otras propiedades del sistema sobre la capacidad a flexión y la delaminación de vigas reforzadas con CFRP. Aporta evidencia de que la configuración estructural influye directamente en el mecanismo de desprendimiento.
	5	Artículo Científico	Iskaner, Melad, Yasser, Rahim, y Mosa	Experimental	Evalúa diferentes ubicaciones de las tiras de CFRP en vigas sometidas a flexión. Aporta información sobre la influencia de la disposición del CFRP, la ductilidad y el uso de anclajes para retrasar la delaminación.

ÁMBITO	N°	TIPO DE DOCUMENTO	AUTOR(ES)	TIPO DE INVESTIGACIÓN	APORTE A LA INVESTIGACIÓN
NACIONALES	6	Tesis	Silva Diaz y Mendoza Rugel	Aplicada – propositiva, no experimental	Propone el uso de CFRP para reforzar elementos de una vivienda sometida a cambio de uso. Aporta criterios para determinar dónde resulta conveniente colocar CFRP y evidencia la importancia de reforzar las zonas sometidas a mayores demandas de flexión.
	7	Tesis	Alfaro Valencia y Hernández Nongrados	Aplicada – estudio de caso, no experimental	Evalúa estructuralmente una vivienda y propone el reforzamiento de sus vigas mediante CFRP. Aporta criterios para la selección del sistema de reforzamiento y evidencia que su aplicación puede mejorar la resistencia, aunque con posibles reducciones de ductilidad.
	8	Tesis	Aquino Cusquisibán	Experimental	Evalúa la variación de la resistencia a flexión de vigas reforzadas con CFRP y compara diferentes resistencias del concreto. Aporta evidencia sobre el incremento de capacidad resistente y resalta la importancia de una adecuada adherencia concreto–CFRP para evitar desprendimientos prematuros.
	9	Tesis	Depaz Hidalgo	Experimental	Compara la resistencia teórica y experimental de vigas reforzadas con diferentes cantidades de CFRP mediante ensayos de flexión. Aporta criterios para comparar el comportamiento experimental con el teórico y para analizar la influencia de la cantidad de fibra en la capacidad resistente.

ÁMBITO	N°	TIPO DE DOCUMENTO	AUTOR(ES)	TIPO DE INVESTIGACIÓN	APORTE A LA INVESTIGACIÓN
LOCALES	10	Tesis	Alegre Gago	Experimental	Analiza la influencia de diferentes cuantías de acero en el comportamiento de vigas reforzadas con CFRP. Aporta evidencia sobre la relación entre la cantidad de acero, la resistencia, la ductilidad y la aparición de mecanismos de falla asociados al CFRP.
	11	Tesis	Ugarte Tassara y Valdez Gamarra	Aplicada – comparativa	Compara el reforzamiento con láminas de CFRP y el reforzamiento con acero, considerando la longitud y sección de las vigas. Aporta criterios para evaluar la conveniencia del CFRP y la influencia de las características geométricas en su aplicación.
	12	Tesis	Medina Deza	Experimental – comparativa	Compara el comportamiento de vigas reforzadas con CFRP y planchas de acero mediante ensayos de flexión. Aporta evidencia sobre el incremento de resistencia, el comportamiento frágil y la aparición de fallas asociadas a grietas y delaminación en vigas reforzadas con CFRP.
	13	Tesis	Aguilar Chama y Cari Montoya	Experimental	Evalúa vigas reforzadas con CFRP sometidas a flexión y corte, analizando diferentes resistencias del concreto y disposiciones del refuerzo. Aporta directamente al análisis de la relación entre disposición del CFRP, fisuración y modo de falla, señalando que un refuerzo únicamente a flexión puede favorecer fallas por cortante antes de aprovechar completamente el CFRP.
	14	Tesis	Calla Deza y Torres Almirón	Experimental	Analiza vigas reforzadas con CFRP considerando diferentes resistencias del concreto, cuantías de acero y áreas de fibra. Aporta evidencia sobre el incremento de resistencia, la reducción de deformaciones y la influencia de la disposición del acero y los estribos en el tipo de falla.

Nota. Elaboración propia

2.2. Marco legal

- Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (Guía para el diseño y construcción de sistemas FRP adheridos externamente para fortalecer estructuras de concreto), reportado por el Comité ACI 440.2R-17. Dicho documento proporciona información que orienta el proceso de diseño y la adecuada ejecución de sistemas de refuerzo con FRP en estructuras de concreto.
- Norma E.060: Concreto armado.

2.3. Marco teórico

2.3.1. Materiales principales

- **Concreto armado**

  Es una combinación de refuerzo adecuado (generalmente barras de acero con ganchos elevados llamados deformaciones) y concreto diseñado para trabajar juntos y resistir las cargas aplicadas. Un refuerzo adecuadamente colocado en el concreto, mejora su resistencia a la compresión y a la tracción. (Boletín de Educación ACI E2-00, 2006)

- **Concreto simple**

  El concreto simple tiene resistencia a la compresión—la capacidad de resistir cargas de aplastamiento; sin embargo, su resistencia a la tracción es solo alrededor del 10% de su resistencia a la compresión. Su resistencia a la tracción es tan baja que casi se ignora en el diseño de la mayoría de las estructuras de concreto. (Boletín de Educación ACI E2-00, 2006).

Según el libro Design and Control of Concrete Mixtures (Kosmatka & Wilson, 2011), el control de calidad posee requisitos principales bien definidos y aceptados. Para el concreto recién mezclado, esos requisitos incluyen una buena consistencia, estabilidad, uniformidad, trabajabilidad, acabado; además de resistencia, durabilidad, apariencia y economía.

Las propiedades del concreto fresco son las siguientes:

- Trabajabilidad: Se refiere a la facilidad con la que se puede manejar el concreto fresco, compactarlo para eliminar vacíos y darle un buen acabado, sin que se presente segregación. Esta propiedad depende de la consistencia y la estabilidad de la mezcla de concreto.

- Exudación y asentamiento: Una vez colocado el concreto en los moldes, se puede observar la aparición de una capa fina de agua en la superficie, esto ocurre debido al asentamiento de los materiales, como los agregados y el cemento, ya que estos tienden a asentarse hacia el fondo.

- Aire contenido: La incorporación de aire ayuda mejorar la manejabilidad y resistencia al congelamiento y deshielo del concreto, aunque un exceso puede disminuir la resistencia a la compresión y provocar defectos superficiales, por lo que es importante controlar su cantidad.

- Uniformidad: Garantiza que todas las porciones de la mezcla de concreto tengan la misma proporción de materiales, es decir que este sea homogéneo. En campo se realizan diferentes ensayos siguiendo normas como la ASTM C94. Si los resultados son correctos, se puede concluir que la mezcla es uniforme.

- Hidratación, fraguado y endurecimiento: Cuando el cemento y el agua entran en contacto, se activa una reacción química llamada hidratación. Esto permite que el concreto adquiera resistencia y se endurezca. El proceso de fraguado es el paso en el que el concreto pasa de un estado fluido hasta alcanzar un estado sólido. Este proceso varía según el tipo de cemento portland o aditivos que se utilicen. Posteriormente, comienza con el endurecimiento, donde el concreto empieza a ganar resistencia.

Las propiedades de concreto endurecido son las siguientes:

- Curado: Es esencial que el concreto tenga humedad continuamente durante los primeros días, ya que son críticos para su desarrollo. Un curado adecuado garantiza favorece a la hidratación del cemento y así aumenta la resistencia y durabilidad del concreto.

- Tasa del secado del concreto: Cuando el concreto va perdiendo agua, este tiende a encogerse. Si este secado ocurre muy rápido, pueden aparecer y visibilizar grietas superficiales, llamadas como fisuras de retracción. Es importante controlar la tasa de secado para que este ayude a prevenir problemas y mejorar el comportamiento del concreto.

- Endurecimiento: La resistencia a la compresión se define como la capacidad máxima para resistir cargas antes de que esta falle. Ello se mide comúnmente a los 28 días de curado, aunque también se evalúa a edades menores, según normativas o necesidades del proyecto.

- Densidad: Es variable ya que depende de la cantidad y densidad del agregado, sin embargo, el concreto convencional, tiene una densidad (peso unitario) que oscila

entre 2200 kg/m3 a 2400 kg/m3). Este valor es importante para cálculos en el ámbito de la ingeniería.

- Permeabilidad e impermeabilidad: Ambas propiedades están relacionadas, la impermeabilidad es la capacidad de impedir la entrada del agua ya que esta puede transportar sustancias dañinas al acero de refuerzo, y en el caso de la permeabilidad indica cuánto puede ingresar el agua en la estructura de concreto cuando este esté bajo presión.
- Estabilidad de volumen y control de grietas: El concreto puede expandirse o contraerse con el paso del tiempo, lo cual es normal. Sin embargo, al no tener un control de dichos movimientos, pueden aparecer grietas, para mitigar su aparición, se usa acero de refuerzo.
- Durabilidad: Se define como la capacidad del concreto para resistir la acción del clima, acciones de productos químicos y abrasión, sin perder sus propiedades. Cuando se tiene un concreto durable es que este mantiene su integridad estructural.

- **Acero de refuerzo**

  Según (Morales Morales, 2006), el acero de refuerzo en concreto armado son varillas de sección redonda, las cuales tienen corrugaciones cuyo fin es restringir el movimiento longitudinal de las varillas relativo al concreto que los rodea.

  Según (Aceros Arequipa, 2022), proporciona información con los pesos por metro lineal para los diferentes diámetros que se venden en el mercado, estos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2 Pesos nominales por metro lineal según el diámetro de barra

DIÁMETRO DE BARRA		SECCIÓN	PERÍMETRO	PESO NOMINAL
Pulg.	mm	(mm^2)	(mm)	(kg/m)
-	8	50.27	25.1	0.395
3/8	-	71	29.9	0.560
-	12	113	37.7	0.888
1/2	-	129	39.9	0.994
5/8	-	199	49.9	1.552
3/4	-	284	59.8	2.235
7/8	-	387	69.8	3.042
1	-	510	79.8	3.973
1.3/8	-	1006	112.5	7.907

Nota. (Aceros Arequipa, 2022)

- Módulo de elasticidad del acero de refuerzo: "El módulo de elasticidad del acero está dado por la pendiente de la porción elástica lineal de la curva esfuerzo-deformación, el valor del módulo de elasticidad de los distintos tipos de acero cambia muy poco y generalmente se toma igual a 2 x 10^6 Kg/cm2" (Morales Morales, 2006, pág. 8).

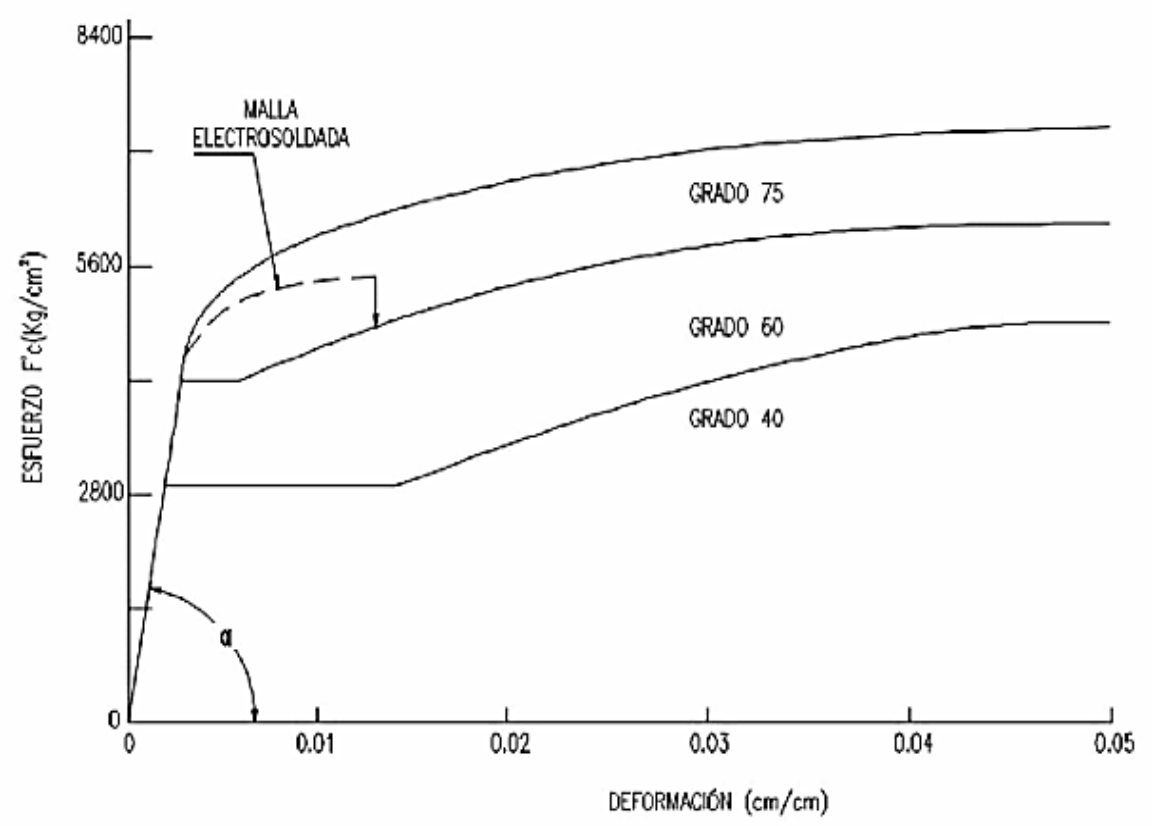
- Calidad del acero de refuerzo: (Ottazi Pasino, 2011) resaltó que en Perú, solo Aceros Arequipa S.A. y SiderPerú, producen acero corrugado, y estos solo fabrican acero de refuerzo Grado 60, la cual se ajusta a la norma ASTM A615. Aceros Arequipa fabrica acero A706 en diámetros de 3/8" a 1 3/8". Por esta razón, se optó por utilizar acero corrugado de Aceros Arequipa para la fabricación de las canastillas de las vigas a ensayar, ya que es más accesible en el mercado.

  En cuanto a las propiedades mecánicas de las barras de acero de refuerzo, estas se destacan en tres propiedades del acero de refuerzo. Primero, la relación esfuerzo-deformación, que describe el comportamiento del acero de refuerzo. Segundo, el coeficiente de dilatación térmica, que su valor es similar al del concreto y esto asegura que el acero y el concreto se expandan y

contraigan de manera similar. Por último, la maleabilidad, permite que el acero sea moldeado y doblado en frío. (Harmsen, 2017).

- Relación esfuerzo-deformación del acero: En la Figura 1. Se observa que, durante la fase elástica, distintos aceros muestran un comportamiento igual. El módulo de elasticidad es un parámetro constante igual a $E = 2\,039\,000\ kg/cm^2$. En cambio, en el comportamiento inicial, la amplitud de escalón de fluencia varía de acuerdo a la calidad del acero.

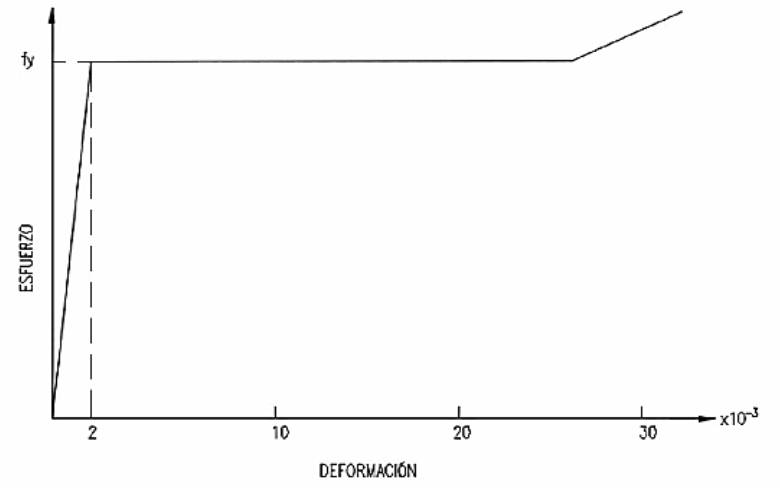
Figura 1 Curva esfuerzo-deformación y módulo de elasticidad del acero



Nota. (Harmsen, 2017)

El código del ACI asume que el acero tiene un comportamiento elastoplástico para pequeñas deformaciones. (Figura 2).

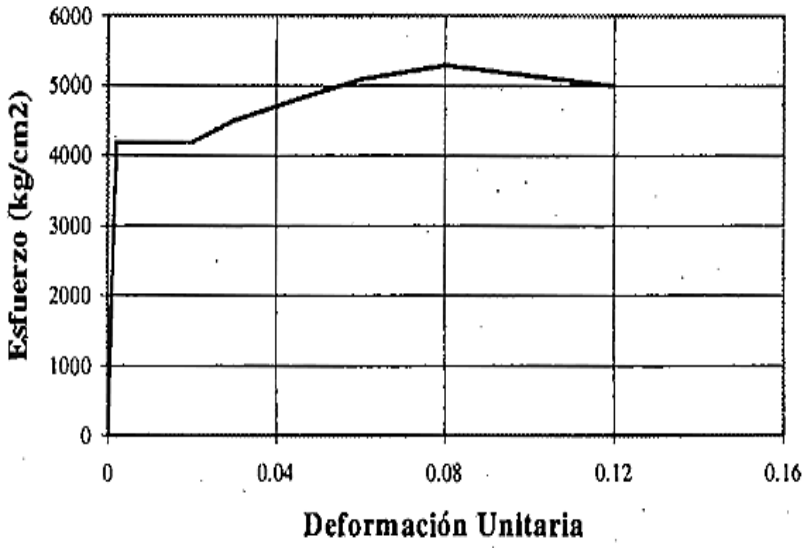
Figura 2 Curva idealizada esfuerzo-deformación y módulo de elasticidad del acero según el ACI 318-25



Nota. (Instituto Americano del Concreto, 2025)

La curva de esfuerzo-deformación presentan inicialmente un tramo elástico lineal, seguido por una zona de fluencia. Posteriormente, llega a una fase de endurecimiento por deformación hasta una caída del esfuerzo donde ocurre la fractura del material. (Morales Morales, 2006).

Figura 3 Curva esfuerzo-deformación del acero



Nota. (Morales Morales, 2006)

- Coeficiente de dilatación térmica: Una de las tantas razones por la que el concreto y el acero funcionan tan bien juntos, es la compatibilidad térmica que existe entre ellos, ya que ambos tienen coeficientes de dilatación térmica muy similares, lo que permite que se expandan y contraigan a la par ante cambios de temperatura. (Harmsen, 2017).
- Maleabilidad: Para poder verificar la maleabilidad o ductilidad del acero de refuerzo, se hace mediante doblado en frío. En general, el doblez debe ser de 180° o 90° según normativa y diámetros de las barras (Harmsen, 2017).

En términos de sus características mecánicas, según (Ottazi Pasino, 2011), este material presenta un esfuerzo de fluencia mínimo de 4200 kg/cm^2 y una resistencia a la tracción de al menos 6300 kg/cm^2. Su módulo de elasticidad es una constante con un valor de aproximadamente de 2 x 10^6 kg/cm^2, así se puede calcular la deformación inicial de la fluencia cercana a 0.0021. La deformación de rotura puede ser de 30 a 40 veces mayor, con elongaciones que varían entre el 7% y 9%. Además, el coeficiente de dilatación térmica es de 11 x 10^{-6} 1/°C , un valor muy cercano al del concreto, lo que favorece su compatibilidad.

2.3.2. Elemento estructural en estudio: viga de concreto armado

Las vigas, de acuerdo con (Blanco Blasco, 1994), son elementos estructurales que se encargan de recibir cargas provenientes de losas y transmitirlas a otros elementos como columnas o muros. Esta función define a las vigas en componentes fundamentales e importantes de una estructura, ya que generalmente conforman los ejes sobre los cuales se apoya el sistema estructural, y en cuyos puntos de intersección se ubican las columnas. El conjunto de columnas, muros y vigas, son elementos resistentes ante acciones generadas por sismos, absorbiendo esfuerzos cortantes, momentos y fuerzas axiales, lo que proporciona rigidez lateral al sistema estructural.

La investigación se centra en el comportamiento de las vigas sometidas a flexión, ya que las pruebas de laboratorio están limitadas a la aplicación de una carga puntual en el centro de la viga y dos cargas puntuales a los tercios del elemento , sin considerar fuerzas laterales o dinámicas.

- **Predimensionamiento de vigas**

Para el diseño de elemento estructurales sometidos a flexión, es importante garantizar la estabilidad lateral para evitar el pandeo o torsión lateral, especialmente en elementos de gran longitud. La Norma Técnica Peruana E.060 "Concreto Armado" establece que la distancia máxima entre apoyos laterales de una viga no debe superar las 50 veces el menor ancho del ala o de la cara en compresión del elemento (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2009)

$$Luz\ máxima\ entre\ apoyos\ (L_{máx}) \leq 50 * b$$

Según (Blanco Blasco, 1994), adopta un peralte del orden de $\frac{l}{10}\ a\ \frac{l}{12}$ de la luz libre de la viga a diseñar, incluyendo el espesor de la losa del techo o piso. En este contexto, el ancho es menos importante frente al peralte, y puede establecerse entre 0.3 a 0.5 de la altura de la sección de la viga, lo que garantiza una proporción adecuada sin sobredimensionar el elemento estructural.

$$Peralte\ de\ la\ viga = \frac{l}{10}\ @\ \frac{l}{12}$$

$$Ancho\ de\ la\ viga =\ 0.3\ @\ 0.5\ \ del\ peralte\ de\ la\ viga$$

Donde:

$$l = luz\ libre\ de\ la\ viga$$

- **Resistencia**

La resistencia de una estructura no solo se basa en valores teóricos de los materiales, sino en cómo es su comportamiento y la forma en la que se lleva a cabo en campo. Es imposible conocer con exactitud cuánto es que realmente resistirán, ya que existe cierto margen de variación. Dicha

variación aumenta cuando entran ciertos factores propios del campo, como la exactitud de las dimensiones de los elementos estructurales, la ubicación correcta del acero de refuerzo o la calidad del concreto, estos son detalles que influyen directamente a la resistencia y seguridad de la estructura.

(Nilson, 2001) explica que esta variabilidad afecta directamente a los elementos estructurales individuales y a su comportamiento. La resistencia de una estructura puede representarse mediante una función de densidad probabilística, esta forma no es conocida, sin embargo, puede estimarse con base en datos experimentales y registros estadísticos sobre materiales y procesos constructivos.

- Resistencia requerida: Según la Norma Técnica Peruana E.060 "Concreto Armado", es la resistencia mínima que se necesita para que un elemento soporte o resista las cargas amplificadas, momentos y las fuerzas internas que corresponden. La combinación de carga considerada en la norma está compuesta por las cargas muertas (CM) y cargas vivas (CV), incluyendo los factores establecidos y así obtener la carga última de diseño:

$$U = 1{,}4\ CM + 1{,}7\ CV$$

- Resistencia nominal: Es la resistencia calculada de acuerdo al diseño estructural del elemento que debería ser capaz de aguantar en condiciones normales, sin considerar ningún margen de seguridad. (Norma Técnica Peruana E.060 "Concreto Armado").
- Resistencia de diseño: Es el valor de la resistencia nominal reducida o multiplicada por el factor de reducción de resistencia (ϕ) los cuales las encontraremos en la normativa vigente, considerando diversas condiciones tales como flexión, carga axial, cortante y torsión.

La norma contempla diferentes factores de reducción; sin embargo, los factores de reducción que destacan en la investigación realizada son 0.90 para flexión sin carga axial y 0.85 para cortante y torsión.

- **Requisitos de resistencia y servicio**

De acuerdo con la normativa peruana vigente, establece que los elementos estructurales deben diseñarse de manera que su resistencia de diseño (ϕR_n) sea mayor o igual a la resistencia requerida (R_u). Ello se realiza considerando cargas y fuerzas amplificadas mediante factores correspondientes a la norma.

$$\phi R_n \geq R_u$$

2.4. Diseño estructural de viga de concreto armado

Es importante el diseño estructural de cualquier tipo de elemento estructural. En el contexto de la presente tesis, el diseño de una viga adquiere relevancia ya que este elemento es el encargado de soportar y transmitir cargas hacia las columnas o apoyos. En este estudio se analizan vigas bajo diferentes condiciones, considerando la influencia de las propiedades de los materiales tales como el acero y la resistencia del concreto.

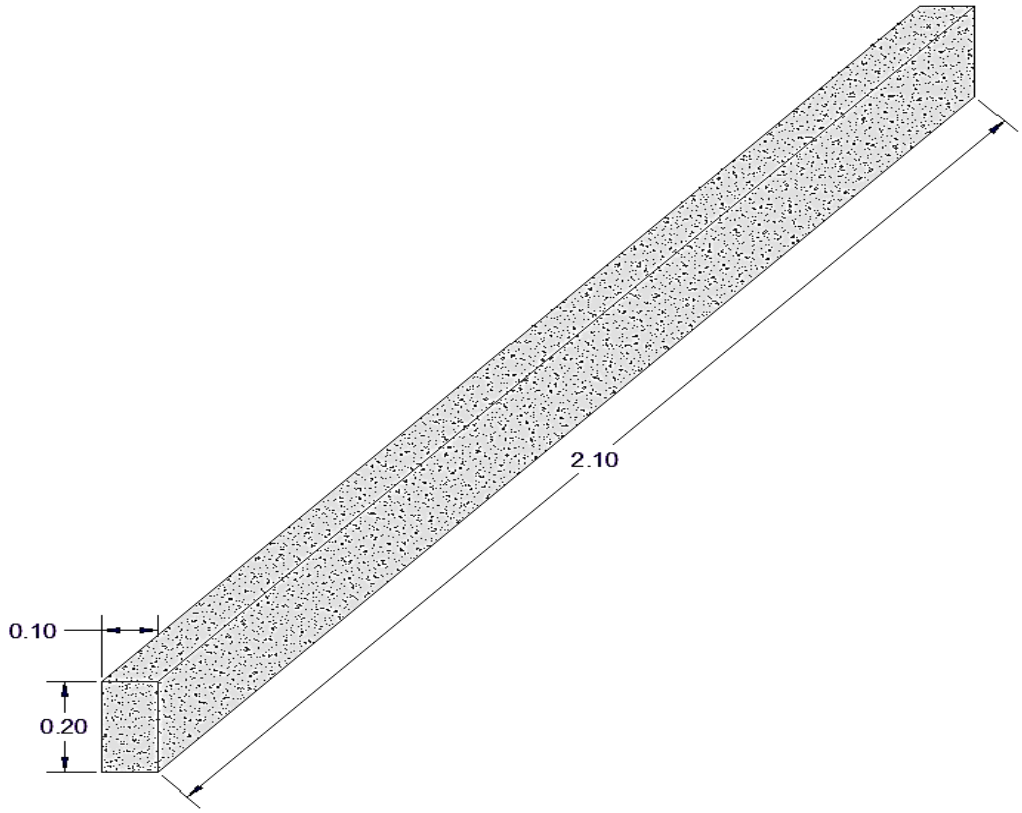
2.4.1. Diseño de refuerzo por flexión

Para la presente investigación, se desarrolló el diseño de refuerzo por flexión siguiendo los lineamientos de la Norma Técnica Peruana E.060 “Concreto Armado”.

Se definió la geometría de la viga considerando que represente una escala media de una viga real, de manera que se evalúe el comportamiento estructural y que este sea analizado y comparable con las condiciones que presenta una viga a escala natural.

Se seleccionó una longitud de 2.10 m y una luz libre entre apoyos de 2.0 m. De acuerdo con la norma, la altura la estimamos como L/12 y el ancho no menor a la mitad de su altura, adoptándose una altura de aproximada de 20 cm, un ancho de 10 cm y un recubrimiento de 2 cm.

Figura 4 Vista isométrica de la viga de concreto armado empleada en los ensayos experimentales



Nota. Elaboración propia

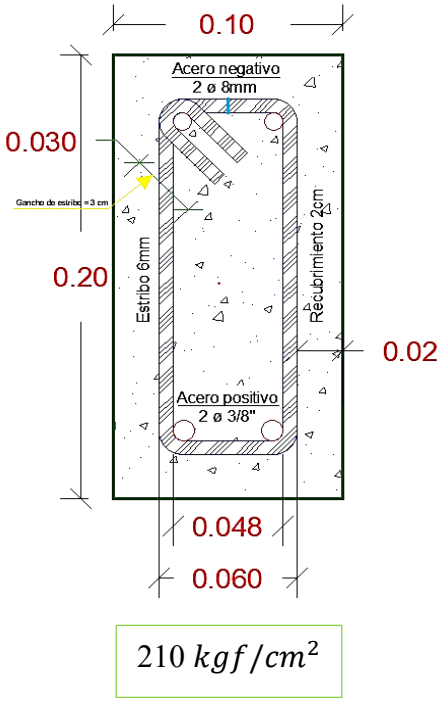
Se consideraron tres tipos de armados de vigas; en los especímenes Tipo I y II, se empleó un concreto con resistencia a la compresión de 210 kgf/cm^2 y un refuerzo longitudinal positivo de dos varillas de 3/8" y refuerzo longitudinal negativo de 8 mm, variando su refuerzo transversal con 10 y 8 estribos, respectivamente. Por otro lado, el Tipo III representa la condición más crítica ya que se utilizó un concreto menor con resistencia a la compresión de 175 kgf/cm^2 y un refuerzo positivo de 8 mm, prescindiendo totalmente de estribos.

Tabla 3 Características de vigas según tipo de armado, resistencia del concreto y disposición del refuerzo de acero

ARMADO	VIGAS	RESISTENCIA DEL CONCRETO	DISEÑO DE ARMADURA DE ACERO	DETALLE ESTRIBOS	N° ESTRIBOS
TIPO I	V1	210 kg/cm²	Acero positivo: 2 Φ 3/8" & Acero negativo :2 Φ 8 mm	6mm: 1 @ 0.05; 8 @ 0.20 m	10
TIPO II	V2, V3 y V4	210 kg/cm²	Acero positivo: 2 Φ 3/8" & Acero negativo :2 Φ 8 mm	6mm: 1 @ 0.05; 6 @ 0.25 m	8
TIPO III	V5 a V12	175 kg/cm²	Acero positivo :2 Φ 8 mm	—	

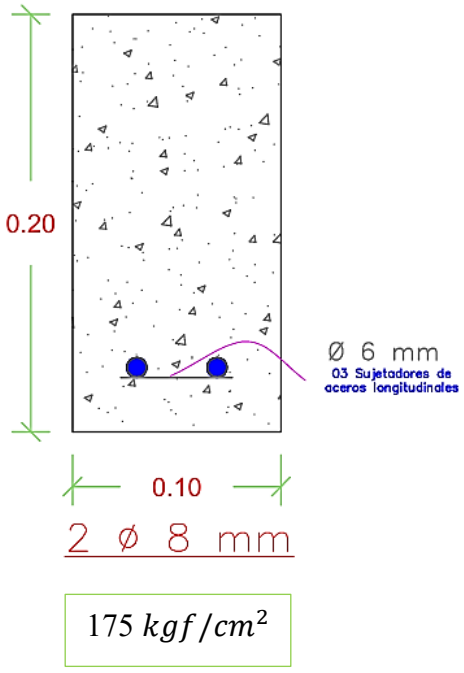
Nota. Elaboración propia

Figura 5 Sección transversal de viga (a) Armado Tipo I y II



Nota. Elaboración propia

Figura 6 Sección transversal de viga (a) Armado Tipo III



Nota. Elaboración propia

Posteriormente, se verificó que la cuantía de acero calculada se encuentre dentro de los límites establecidos, el cual cumple con el $\boldsymbol{\rho}$ permitido y así garantiza la seguridad del elemento estructural.

Tabla 4 Cuantías de acero longitudinal y transversal empleadas en el diseño de las vigas

Cuantía Mínima (ρ mín)	**Cuantía (ρ)**	**Cuantía Balanceada (ρb)**
$\rho_{mín} = 0.7\left(\frac{\sqrt{f'c}}{f_y}\right)$	$\rho = \frac{A_s}{b * d}$	$\rho_b = \beta_1 * 0.85 * \frac{f'c}{f_y}\left(\frac{6000}{6000 + f_y}\right)$

Cuantía Máxima (ρ máx)
$\rho_{máx} = 0.75 * \rho_b$ *(no trabajan en condición sísmica)*

Nota. Elaboración propia

Calculamos el momento resistente de diseño, determinando la altura del bloque de compresión y el momento nominal, aplicando el factor de reducción por flexión (ϕ = 0.90).

Area del acero (A_s)

$$A_s = \rho * b * d$$

Altura del bloque rectangular equivalente de compresión (a)

$$a = \frac{\rho * f_y}{0.85 * f'c} * d$$

Momento Resistente de diseño (ΦMn)

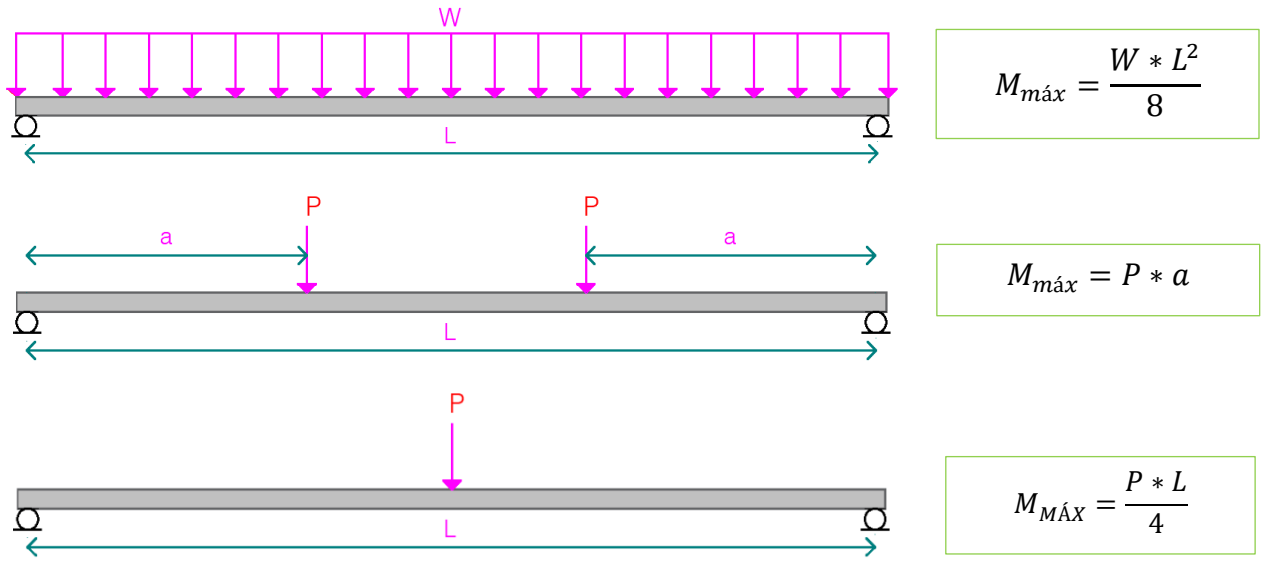
$$\Phi Mn = \Phi A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

A partir de ello, se determinó la carga última de rotura, considerando el peso propio de la viga, la longitud de la luz de la viga y la distancia de las cargas puntuales. De esta manera, obteniéndose una capacidad de carga de rotura que representa la carga máxima que la viga puede soportar antes de que falle por flexión.

$$M_{MÁX} = P_{MÁX} * a + \frac{wL^2}{8} \ldots (02\ cargas\ puntuales)$$

$$M_{MÁX} = \frac{P_{MÁX} * L}{4} + \frac{wL^2}{8} \ldots (01\ carga\ puntual)$$

Figura 7 Esquemas de carga de vigas y ecuaciones utilizadas para el cálculo del momento flector máximo



Nota. Elaboración propia

2.4.2. Diseño de refuerzo por cortante

En el primer bloque de vigas se consideraron estribos, garantizando que los elementos posean la capacidad suficiente para resistir los esfuerzos cortantes. Se tomó en cuenta la resistencia del concreto y la resistencia aportada por el acero de refuerzo transversal.

Mediante la siguiente expresión se calcula la fuerza cortante que puede resistir el concreto:

$$\boldsymbol{Resistencia\ del\ concreto\ (V_C)}$$

$$V_{C=} = 0.53 * \sqrt{f'c} * b * d$$

$f'c = Resistencia\ del\ concreto$

$b = Ancho\ de\ la\ viga$

$d = \ Peralte\ efectivo$

$\emptyset = \ Factor\ de\ reducción\ de\ resistencia$

Para determinar el requerimiento de estribos, se realizó una comparación entre la capacidad resistente al esfuerzo cortante del concreto y la fuerza cortante última de diseño.

$Si\colon\ \emptyset V_C \geq V_{ud} \ldots\ No\ es\ necesario\ el\ estribaje,$

$pero\ se\ requiere\ colocar\ los\ estribos\ mínimo\ según\ norma.$

$\emptyset V_C \leq V_{ud} \ldots Se\ requiere\ la\ colocación\ de\ refuerzo\ transversal\ (estribaje)$

En caso sea necesario colocar estribos, quiere decir que el concreto por sí solo no es suficiente para resistir el esfuerzo cortante, es por ello que se dispone en colocar refuerzo transversal mediante estribos de refuerzo, para incrementar la resistencia al corte y tener un adecuado comportamiento de las vigas a estudiar.

$\boldsymbol{Resistencia\ nominal\ al\ cortante\ de\ la\ sección\ (V_n)}$

$$V_{n=} = V_S + V_C$$

Se calcula la contribución del acero transversal utilizando la siguiente expresión:

$\boldsymbol{Resistencia\ del\ acero\ (V_S)}$

$$V_{s=} = \frac{V_u}{\emptyset} - V_c$$

Además de ello, se verifica que el valor cortante máximo permitido ($V_{s\,máx.}$) no sea superado, comprobando antes que las dimensiones y el concreto resulten adecuados

Sí: $V_s \geq V_{s-calidad}$ … *Indica que debemos volver a diseñar la sección de viga*

$V_s \leq V_{s-calidad}$ … *Indica que el concreto y las dimensiones de la viga son adecuados*

Cortante máximo del acero ($V_{S\,máx.}$)

$$V_{s\,máx.=} = 2.1 * \sqrt{f'c} * b * d$$

Es así que el diseño por cortante satisface la norma y que la disposición de los estribos asegure su comportamiento adecuado bajo cargas transversales.

Se procedió a determinar el espaciamiento mediante la siguiente expresión:

Espaciamiento límite (S)

$$S = \frac{A_v * fy * d}{V_s}$$

Donde

$A_v = Área\ de\ acero\ de\ los\ estribos$

$f_y = \ Esfuerzo\ de\ fluencia\ del\ acero\ de\ refuerzo$

$d = \ Peralte\ efectivo\ de\ la\ viga$

$V_s = Resistencia\ del\ acero$

Según (Harmsen, 2017), para definir el espaciamiento máximo del refuerzo transversal es necesario considerar que cada fisura diagonal potencial debe ser atravesada por lo menos por una varilla de acero. Si $V_n \geq V_c$, tenemos las siguientes condiciones según el código ACI 318-14

Tabla 5 Espaciamiento máximo para el refuerzo de cortante

(Vs.)		S máximo (cm)	
		Vigas no presforzadas	**Vigas presforzadas**
$\leq \mathbf{1.1} * \sqrt{\boldsymbol{f'c}} * \boldsymbol{b} * \boldsymbol{d}$	El menor de:	d/2	3h/4
		60	
$\geq \mathbf{1.1} * \sqrt{\boldsymbol{f'c}} * \boldsymbol{b} * \boldsymbol{d}$	El menor de:	d/4	3d/8
		30	

Nota. (ACI 318-14, 2014)

Es decir, de acuerdo a la tabla indicada, se presentan las siguientes condiciones:

$$* Si\ V_s \leq 1.1 * \sqrt{f'c} * b * d\ , entonces\ s\ \leq \frac{d}{2}\ \ v\ \ s\ \leq\ 60\ cm$$

$$* Si\ V_s \geq 1.1 * \sqrt{f'c} * b * d\ \ \hat{}\ \ V_s \leq 2.1 * \sqrt{f'c} * b * d$$

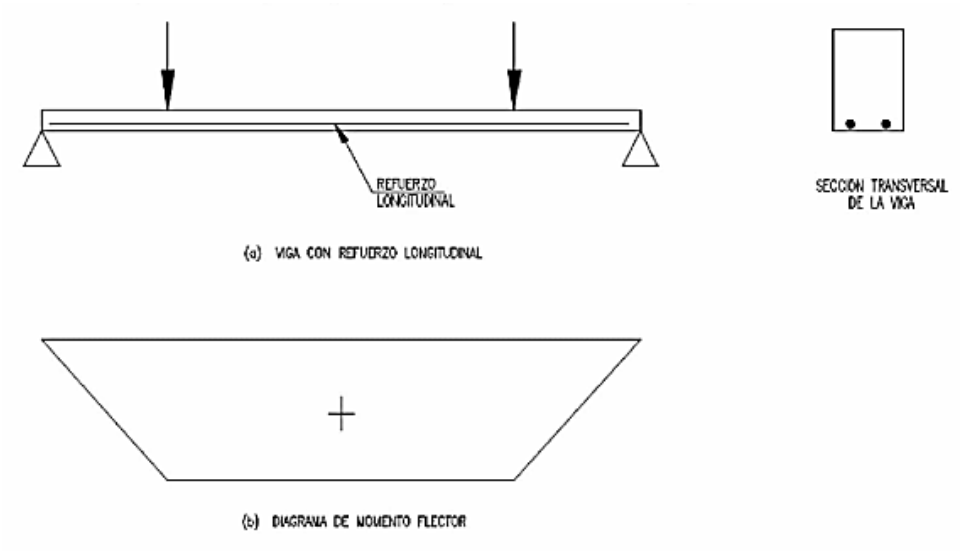
También existe otro valor de espaciamiento máximo, el cual se determina mediante la siguiente fórmula:

$$S_{MÁX} = \frac{A_v * fy}{3.5 * b}$$

2.5. Comportamiento de vigas de concreto armado

Cuando una viga está simplemente apoyada, con sección rectangular y con presencia de refuerzo de acero estructural en la zona de tracción y es sometida a cargas concentradas iguales, estas generan el siguiente diagrama de momento flector presentada en la Figura 8.

Figura 8 Viga simplemente apoyada sometida a cargas concentradas



Nota. (Harmsen, 2017)

Según (Harmsen, 2017), el comportamiento de una viga de concreto armado bajo ensayo de flexión, puede dividirse en cuatro etapas. Etapa I: En esta primera etapa no se presentan fisuras, el elemento estructural se comporta elásticamente y el concreto resiste los esfuerzos de compresión y tracción debido a que la carga aplicada es pequeña. Etapa II: Mientras la carga se va incrementando gradualmente, la tensión en el concreto está a punto de alcanzar su resistencia a tracción, en esta etapa todavía no se observa fisuras, debido a que toda la sección de concreto participa en la resistencia de la viga. El concreto y el acero se deforman en conjunto ya que están adheridos, por lo que sus esfuerzos están relacionados mediante la relación modular (n), representando la relación entre sus módulos de elasticidad.

$$f_s = n * f_t$$

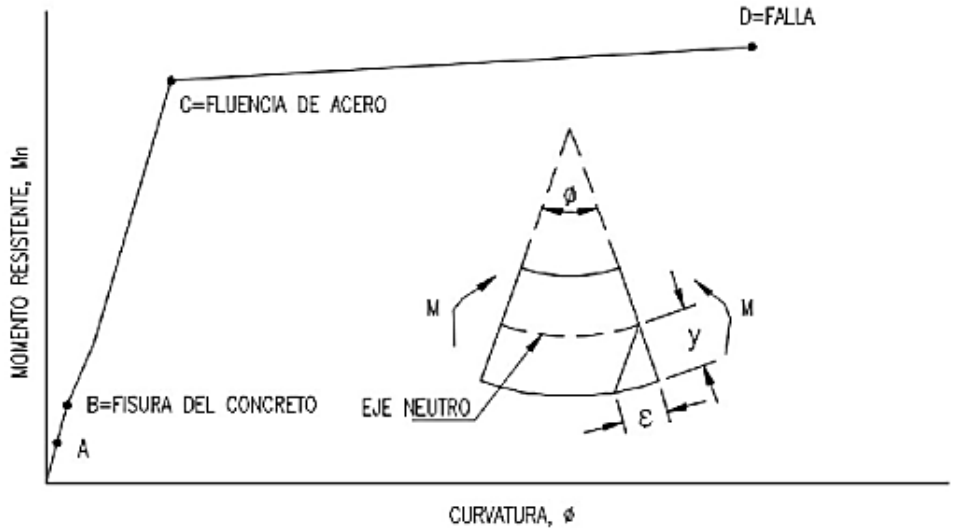
Donde:

$f_s =$ Esfuerzo en el acero

$f_t =$ Esfuerzo en el concreto

Etapa III: Comienza cuando la viga se agrieta ya que se alcanza el momento de agrietamiento, las grietas se forman en la parte inferior y central de la viga (tracción es mayor). El eje neutro va ascendiendo hacia la zona de compresión, conforme se siga cargando la viga, los aceros estructurales absorben las fuerzas de tracción porque el concreto ya no puede resistir ello. Las deflexiones aumentan ya que su momento de inercia disminuye, las fisuras se agrandan dirigiéndose al eje neutro y si se quita la carga, estas fisuras o grietas pueden cerrarse visualmente. Es una etapa donde las cargas presentes suelen ser las que la estructura soporta durante su uso. Etapa IV: El acero de refuerzo alcanza su fluencia, aunque el concreto todavía no falle, ya que este puede seguir resistiendo a compresión. La distribución de esfuerzos de compresión en el concreto adquiere una forma parabólica, las fisuras o grietas aumentan su apertura y la deflexión de la viga se incrementa considerablemente. Por último, el concreto en la zona de compresión alcanza su límite de resistencia y falla por aplastamiento, donde se produce el colapso de la viga.

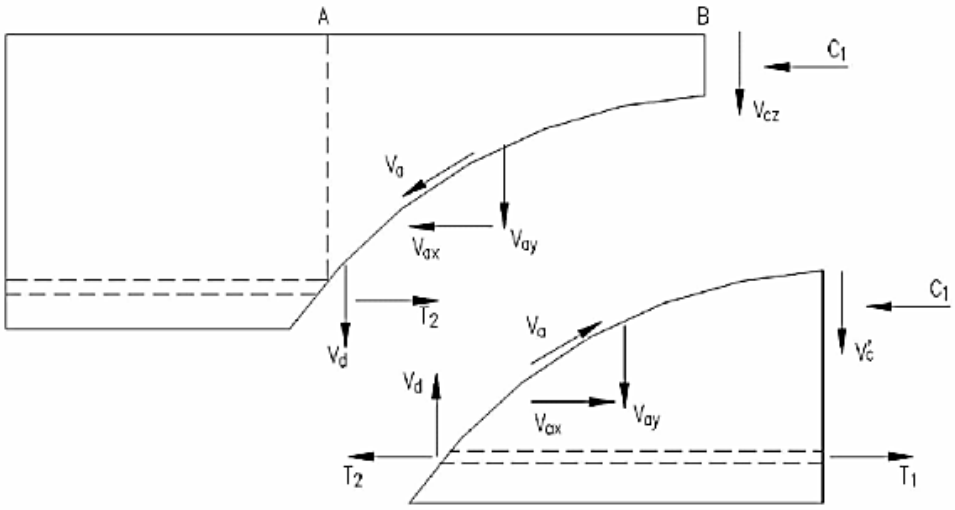
Figura 9 Diagrama de momento resistente-curvatura de una sección de la viga sometida a carga uniformemente distribuida



Nota. (Harmsen, 2017)

En el caso de vigas sin refuerzo en el alma, su resistencia será tomada solo por el concreto:

Figura 10 Fuerzas que resisten el corte en vigas sin refuerzo en el alma de una viga



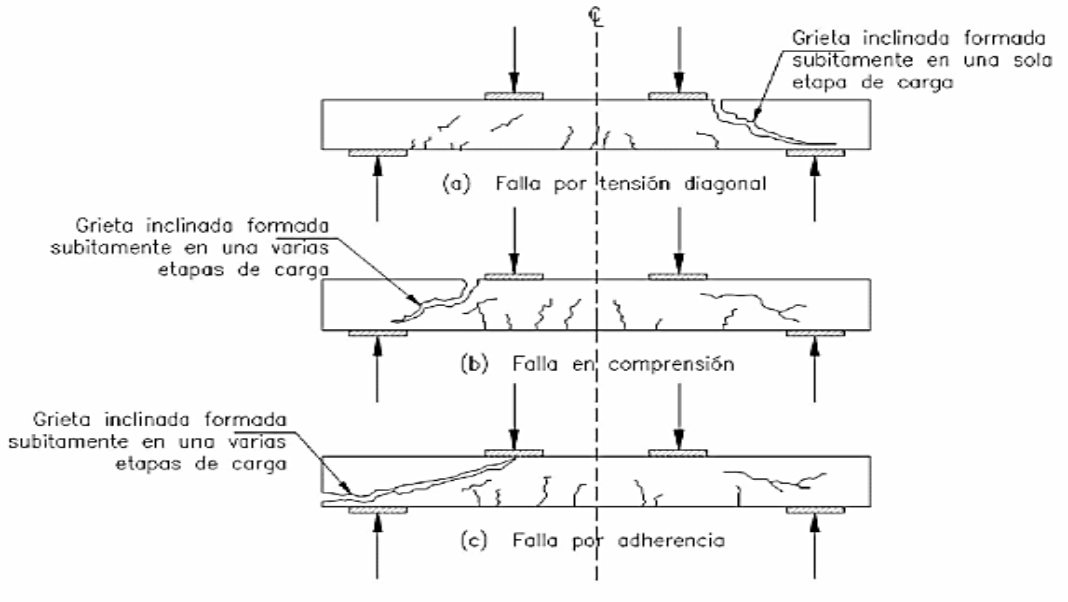
Nota. (Harmsen, 2017)

(Harmsen, 2017) indica que colapso se inicia con el agrietamiento vertical en el centro de la luz de viga, debido a los esfuerzos por tracción. Al incrementarse la carga, se pierde la adherencia entre acero y el concreto. Luego, la viga presenta grietas diagonales que se van extendiendo hacia la zona de compresión. En esta fase, las fisuras se estabilizan hasta que la sección de concreto en compresión es incapaz de resistir el efecto combinado de la fuerza cortante y los esfuerzos de compresión inducidos por el momento flector, se desencadena una falla frágil y repentina, el colapso ocurre con deformaciones y deflexiones mínimas.

Si la grieta diagonal sube y se encuentra con el concreto que ya estaba aplastado en la zona de compresión, en ese instante el elemento pierde su soporte y falla repentinamente (falla frágil). Existe la falla por adherencia que ocurre debido al anclaje insuficiente o deficiente del refuerzo longitudinal provocando el colapso de la viga. En vigas sometidas a cargas concentradas aplicadas muy cerca del apoyo (a una distancia menor que el peralte). El concreto se agrieta diagonalmente uniendo ambos puntos , es decir el apoyo con el punto de aplicación de la carga, la viga resiste mucho más de lo normal porque el concreto trabaja diagonalmente. Existen dos fallas como la

falla por pérdida de anclaje o por aplastamiento del concreto. Para evitar este tipo de fallas se debe colocar refuerzo transversal.

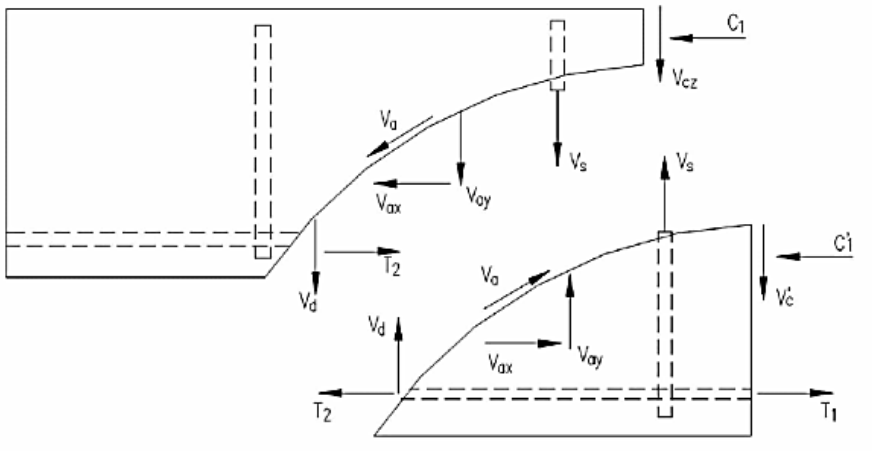
Figura 11 Patrón de fisuras para vigas de concreto con diferentes esbelteces



Nota. (Harmsen, 2017)

En el caso de vigas con refuerzo en el alma, su resistencia será tomada por los siguientes componentes:

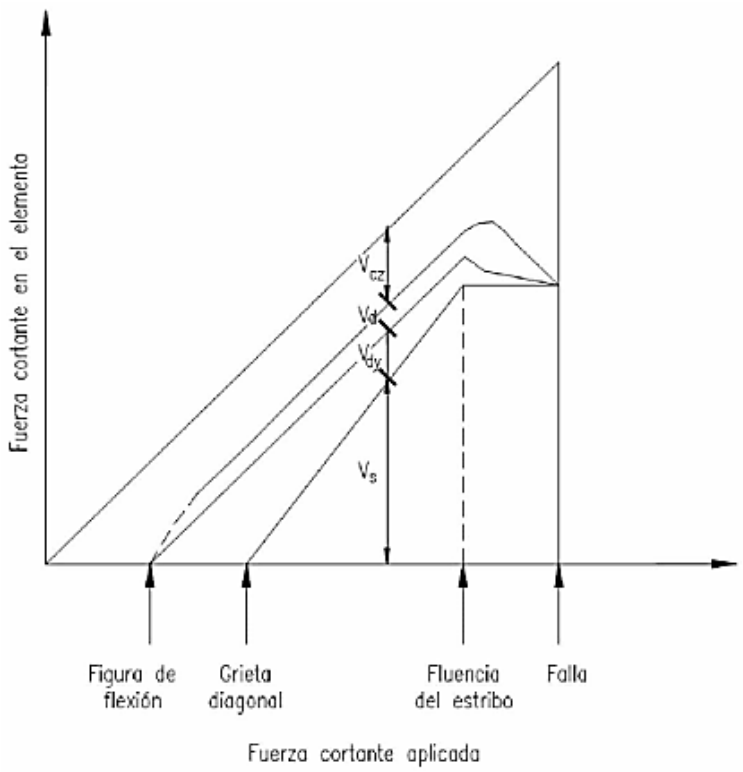
Figura 12 Fuerzas que resisten el corte en vigas con refuerzo en el alma de una viga



Nota. (Harmsen, 2017)

Los estribos no solo sirven para resistir al cortante, sino también confinan al concreto, es por ello que este puede soportar mayores esfuerzos de compresión antes de que falle el elemento estructural. Además, limitan el crecimiento de las grietas por cortante por eso se conserva una mayor área de concreto trabajando a compresión, evitando que los esfuerzos se concentren demasiado. Como resultado a todos los efectos previos, la viga puede soportar cargas mayores de la viga, retrasando su falla.

Figura 13 Resistencia al corte aportado por el concreto y por el acero longitudinal y transversal



Nota. (Harmsen, 2017)

2.6. Evaluación del desempeño estructural

2.6.1. Sintomatología en las estructuras de concreto armado

A lo largo de su vida útil, los elementos de concreto armado pueden presentar diferentes manifestaciones de deterioro, tales como corrosión del acero, desprendimientos, eflorescencias,

deformaciones excesivas y otros daños a causa de factores mecánicos, físicos o ambientales. Esto afecta directamente a la capacidad resistente, durabilidad y el comportamiento estructural del elemento de concreto armado.

De acuerdo a la perspectiva del autor citado "Un observador ajeno al tema, al contemplar el crecimiento de los fallos en la construcción, pensaría probablemente que cada vez va disminuyendo la capacidad del hombre para construir correctamente. Esto no es cierto. Sí lo es que el número de fallos y de problemas en general, crece sin cesar, pero no proporcionalmente a lo construido" (Calavera Ruiz, 2005). Esta reflexión permite comprender que la presencia de fallos no solo proviene directamente de deficiencias destructivas, sino también al cambio de uso de una edificación existente.

2.7. Intervención estructural de estructuras de concreto armado

"Existen muchas razones por la cual es necesario reforzar los elementos estructurales que conforman una edificación. Una de las principales corresponde al incremento de las cargas de servicio. Es por eso que, al aplicar un proceso de reforzamiento, se busca mejorar la capacidad resistente del elemento estructural y así garantizar una vida útil prolongada."

2.7.1. Alternativas de reforzamiento de estructuras de concreto armado

- Encamisado de concreto armado

Este método consiste en envolver el elemento estructural a reforzar con concreto armado adicional, logrando así un mejoramiento en su comportamiento a esfuerzos de compresión, flexión y cortante. Este proceso implica la combinación de concreto existente (viejo) con concreto nuevo, mediante el uso de un adhesivo epóxico.

Figura 14 Encamisado de concreto armado en viga y columna

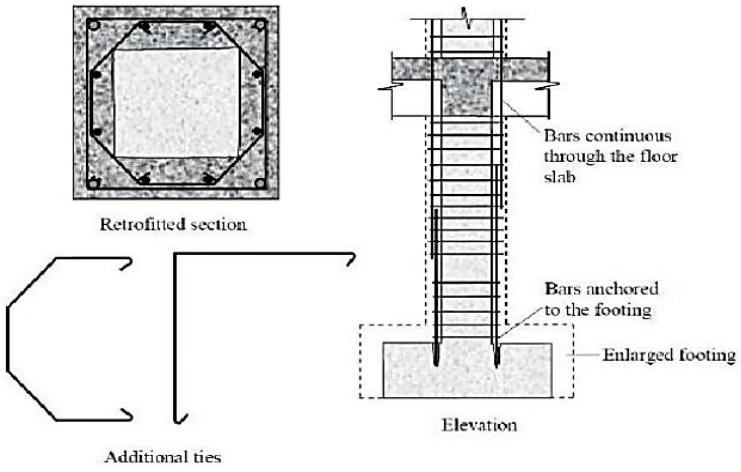


Nota. (Preserva Ingeniería y Construcción, s.f.)

- Encamisado con acero

En la mayoría de casos, este método de reforzamiento se aplica en columnas, esto consiste en colocar ángulos en las aristas y placas transversales de las columnas que se adhieren mediante una resina epóxica. De esta forma, se conforma una camisa de acero que está alrededor del elemento estructural, y así contribuye a resistir las cargas axiales y transversales, lo que mejora su capacidad portante y ductilidad.

Figura 15 Encamisado de concreto armado y armaduras dentro del encofrado



Nota. (Enriquez, s.f.)

- Encamisado y confinamiento con CFRP

Lo que proporciona mayor rigidez y resistencia a los elementos estructurales, es el refuerzo de fibra de carbono, siendo la base principal de la presente investigación. Esta alternativa de reforzamiento consiste en la aplicación de tejidos o laminados de fibra de carbono, mientras que el adhesivo epóxico actúa como medio de adhesión y protección, lo cual asegura la unión efectiva entre la fibra de carbono y la superficie de concreto del elemento estructural.

Este sistema se puede aplicar en vigas, columnas u otros elementos estructurales, mejorando su comportamiento frente a otros tipos de refuerzo. Además, resulta más eficiente en términos de costo y facilidad de aplicación, ya requiere menos mano de obra y no incrementa significativamente el peso de la estructura.

Figura 16 Refuerzo de estructuras de hormigón con polímeros reforzados con fibras



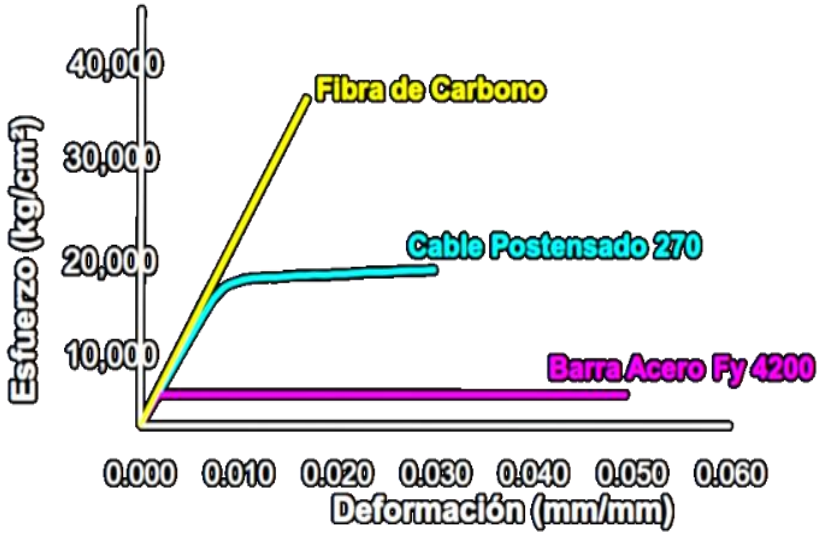
Nota. (Universidad Politécnica de Madrid, s.f.)

2.8. Sistema de reforzamiento estructural con CFRP

2.8.1. Fibra de carbono

- Propiedades y características

Figura 17 Comparación del Comportamiento de la Fibra de Carbono con otros Tipos de Refuerzo



Nota. (Baca Escobar, 2010)

- Datos técnicos

Tabla 6 Hoja de datos del producto SikaWrap ®-600C - Tejido de fibra de carbono para reforzamiento estructural

Resistencia a tensión:	620,000 psi (4,300 N/mm2)
Módulo de elasticidad:	34.9 x 106 psi (240,000 N/mm2)
Elongación:	1.55%
Dirección de la fibra:	Orientación de la Fibra: 0° (unidireccional)
Densidad del área:	610 g
Espesor:	0.337 mm (0.0133 pulgadas)
Densidad de la fibra:	1.81 g/cc

Nota. (SIKA, 2019)

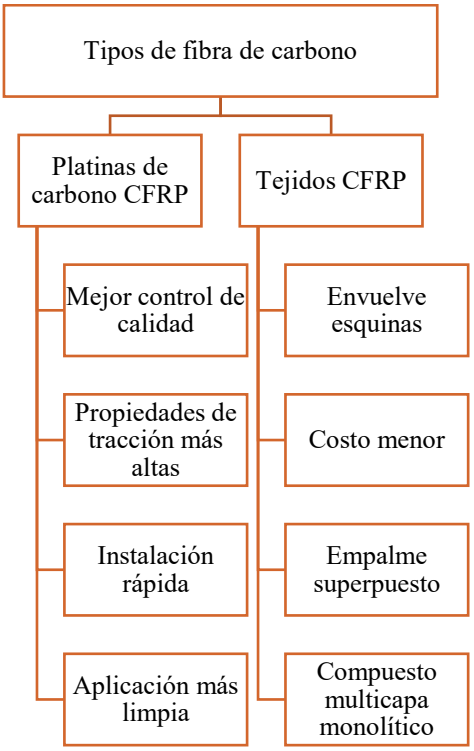
Figura 18 Comportamiento de diferentes fibras de refuerzo (esfuerzo-deformación)



Nota. (Baca Escobar, 2010)

- Tipos de fibras de carbono

Figura 19 Clasificación de los sistemas de reforzamiento con fibra de carbono utilizados en ingeniería estructural



Nota. Elaboración propia

- Resistencia de fibras más comunes

Tabla 7 Características técnicas de diferentes productos de CFRP utilizados para el reforzamiento de estructuras de concreto armado

TIPO	MODELO	RESISTENCIA ÚLTIMA A TRACCIÓN	MÓDULO DE ELASTICIDAD	ELONGACIÓN A LA ROTURA	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)
Lámina	CarboDur S512	2800	160000	0.0169	50	1.2
Lámina	CarboDur S812	2800	160000	0.0169	80	1.2
Lámina	CarboDur S1012	2800	160000	0.0169	100	1.2
Manto	SikaWrap 600C	651	62354	0.0091	-	1.016
Manto	SikaWrap 300C	662	51724	0.0101	-	0.508
Manto	SikaWrap Hex 230C	626	58817	0.0097	-	0.381
Manto	SikaWrap Hex 100G	531	23607	0.0212	-	1.016
Barra	CarboDur Rods	1167	141892	0.0079	N/A	N/A

Nota. (Diescon Ingenieros, 2021)

- Aplicación y usos de la fibra de carbono en estructuras de concreto armado

La fibra de carbono tiene aplicaciones en todo el mundo gracias a sus extraordinarias propiedades y beneficios, se presentan algunos casos representativos que evidencian el uso de la fibra de carbono en diferentes contextos y aplicaciones a nivel global, nacional y local.

Uso global de fibras de carbono*:*

Cube en Alemania

Utilizaron la fibra de carbono como material de construcción para este edificio, para mejorar la flexibilidad e incrementar la durabilidad resistencia.

Edificio Laureano Costa Rica

Para brindar una prolongada vida útil y mayor seguridad es que reforzaron estructuralmente esta edificación con ayuda del código sísmico de Costa Rica, este proyecto fue eficiente ya que la fibra de carbono se adaptó a las dimensiones de las estructuras sin alterarlas.

Uso nacional de las fibras de carbono:

Edificio Chocavento.

Ubicado en el distrito de San Isidro (Citibank 5 sótanos + 16 pisos) - febrero del 2002. Reforzaron vigas y losas, dónde aplicaron las fibras de carbono para reforzar la resistencia a la flexión y cortante.

Figura 20 Laminado de las fibras de carbono (Flexión)



Nota. (Baca Escobar, 2010)

Figura 21 Laminado del refuerzo por cortante



Nota. (Baca Escobar, 2010)

Puente Pacllo Callún.

En Chasquistambo-Ancash, durante la construcción del ducto minero Antamina, el brazo de una excavadora tiró accidentalmente uno de los cables principales del puente. Esto provocó que se saliera del carro de dilatación y se desplazó sobre la viga superior de una de las torres de soporte. Es por lo que optan por reforzar las columnas de la torre con fibras de carbono.

Figura 22 Colocación de las fibras de carbono en torre



Nota. (Baca Escobar, 2010)

Supermercado Plaza Vea Av. Brasil en junio 2002

Reforzaron vigas losas y columnas ya que hubo sobrecarga en depósitos y almacenes. Ya que es una causa común para poder realizar este tipo de reforzamiento.

Figura 23 Reforzamiento de losas en dos direcciones



Nota. (Baca Escobar, 2010)

Muelle San Nicolás en Marcona-Nazca Perú 2009

Tuvieron como objetivo optimizar las condiciones estructurales del muelle; por ende, aumentaron la capacidad de carga del muelle, repararon las áreas afectadas por corrosión y, finalmente, se realizó el refuerzo usando FRP.

Figura 24 Reforzamiento con FRP de 3 a 4 capas según proyecto



Nota. (Baca Escobar, 2010)

Centro comercial Jockey Plaza

Por el incremento de cargas, se reforzaron las vigas, columnas y losas post tensadas, además hubo corrosión por deficiencias constructivas en las losas.

Figura 25 Refuerzo de vigas, losas y encamisado de columnas



Nota. (Baca Escobar, 2010)

Puente el mirador en carretera Chimbote Huallanca octubre 2010

Se necesitó aumentar la capacidad del puente para soportar mayores cargas, además de haber identificado deficiencias en la estructura, aplicaron fibras de carbono cómo reforzamiento ya que así contribuyeron a una mayor seguridad para los usuarios del puente.

Figura 26 Refuerzo del Puente El Mirador



Nota. (Baca Escobar, 2010)

Centro comercial Camino Real

Emplearon las fibras de carbono para reforzar viguetas de las vigas principales, así como placas livianas y macizas, ya que hubo cambios de uso en el área de interés.

Tren eléctrico de Lima

Fue un proyecto exitoso ya que se cumplió con los plazos y alcances acordados en cuanto reforzamiento con fibra de carbono de columnas existentes.

Figura 27 Reforzamiento FRP con fibra de carbono de columnas del Tren Eléctrico de Lima, Perú



Nota. (TopConsult Ingeniería, s.f.)

Uso regional de las fibras de carbono:

Complejo Cerro Verde

Reforzaron las viguetas de las losas aligeradas del techo del primer piso del complejo de Cerro Verde ubicado en la Av. Parra, ya que su primer piso fue diseñado para soportar una sobrecarga menor a la requerida actualmente Es por ello que hacen el reforzamiento con la fibra de carbono los cuales sus resultados fueron positivos con la debida evaluación estructural para verificar si este tipo de reforzamiento era factible.

Figura 28 Reforzamiento de viguetas de losas aligeradas del Complejo Cerro Verde



Nota. (Sika at Work, 2013)

Sunat-Sede Arequipa

Ubicada en la calle mercaderes de la ciudad. Cabe mencionar que la causa del reforzamiento fue porque la estructura fue diseñada para un uso inferior a la requerida, de igual manera realizaron una evaluación estructural para verificar el método de reforzamiento a trabajar por lo que sí fue posible realizar este proyecto donde reforzaron viguetas vigas y columnas.

Figura 29 Reforzamiento estructural Sede Sunat – Arequipa



Nota. (SIKA AT WORK, 2016)

- Comercialización y marcas en la industria de CFRP en el Perú

Al adquirir la fibra de carbono, es importante indicar que no se trata de un material de fácil disponibilidad local. En Arequipa, las distribuidoras no cuentan con stock inmediato de la fibra de carbono y su adhesivo epóxico, por lo que es necesario hacer cotizaciones de acuerdo al metrado a los proveedores ubicados en la ciudad de Lima, desde donde se gestiona el traslado de la fibra de carbono con sus respectivos adhesivos epóxicos.

En el país, existen marcas como Sika, Mapei, Z Aditivos, entre otras; son pocas las empresas que comercializan este sistema de reforzamiento, ya que se trata de un producto relativamente moderno en el sector de la construcción. Es por ello, que su adquisición requiere tiempo de gestión y una inversión económica considerable.

2.8.2. Adhesivo epóxico

El adhesivo epóxico, también denominado resina de polímero epóxico, el cual transfiere las cargas y protege las fibras contra el deterioro. Este material se utiliza para unir las fibras de

carbono al elemento estructural, en este caso vigas de concreto armado, y adicionalmente permite sellar el sustrato, lo cual garantiza una adecuada adherencia y durabilidad del refuerzo.

"Los adhesivos se utilizan para unir laminados de FRP precurados y sistema de montaje superficial (NSM) al sustrato de concreto, proporcionando una transferencia de carga cortante entre el concreto y el sistema de refuerzo de FRP" (ACI 440.2R, 2017, sección 4.1.1.4)

- Propiedades y características

Según la ficha técnica del adhesivo epóxico para el sistema SikaWrap® (SIKA, 2019).El adhesivo epóxico, presenta un adecuado tiempo abierto después del mezclado, lo cual facilita su aplicación a los elementos estructurales en obra. Además, se caracteriza por la facilidad de mezclado, lo que permite una preparación homogénea del material.

Admite la presencia de humedad antes, durante y después del proceso de curado, lo que amplía sus condiciones de su uso en campo. Presenta alta resistencia mecánica y un elevado módulo elástico, lo que garantiza una buena transferencia de esfuerzos entre el concreto y el sistema de refuerzo.

Proporciona una buena adherencia al concreto, metales, madera, mampostería y la mayoría de los materiales usados en el sector de la construcción, siendo compatible y desarrollado para el sistema SikaWrap®. Este presenta un comportamiento mejor frente a temperaturas elevadas y una alta resistencia al flujo plástico bajo cargas permanentes.

Finalmente, esta sustancia muestra alta resistencia a la abrasión y al impacto, libre de solventes y además cumple con las normativas ambientales relacionadas con compuestos orgánicos volátiles.

Figura 30 Sikadur®-301, resina Epóxica de impregnación para sistemas de reforzamiento con fibra de carbono



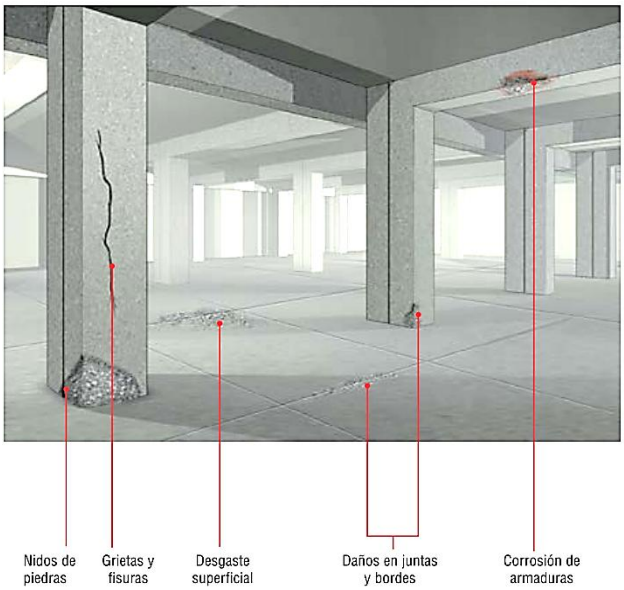
Nota. (Sika Building Trust - Sika Perú, 2021)

2.8.3. Reforzamiento de vigas a flexión con CFRP

- Intervención estructural

La intervención estructural en edificaciones puede ser necesaria por diferentes motivos, tales como el deterioro progresivo de los elementos estructurales por falta de mantenimiento, errores en el expediente técnico, deficiencias durante los procesos constructivo, actualizaciones en los reglamentos de diseño estructural o cambios en el uso de edificación.

Figura 31 Diferentes tipos de daños en estructuras de concreto



Nota. (Sika, 2013)

En el marco teórico de la presente investigación, se orienta al cambio de uso de la edificación como principal motivo de intervención estructural. Es importante destacar que no es estrictamente necesario que existan daños visibles en el elemento estructural para justificar el reforzamiento, ya que el incremento de las cargas de servicio puede afectar su desempeño. El reforzamiento estructural se considera como una estrategia preventiva, cuyo objetivo es asegurar que el comportamiento del elemento reforzado sea adecuado frente a nuevas condiciones de carga.

- Circunstancias en la que se recomienda aplicar fibra de carbono

Circunstancias preventivas:

- Reforzamientos: Cuando a un elemento estructural se le modifica sus características para alcanzar un nivel de seguridad mayor a la original. Cabe resaltar que antes de reforzar una estructura, esta debe ser reparada y monolítica para restituir propiedades como la resistencia, rigidez y masa. Según el ACI 440, antes de reforzar con fibra de carbono se deben sellar las grietas > 0.01”

Circunstancias correctivas:

- Reparación: Sucede cuando un elemento estructural está dañado se restituye al menos su capacidad resistente y su rigidez original.
- Restauración: (Calla Deza & Torres Almirón , 2015), señalan que la restauración consiste en la modificación de algún detalle que pueda interferir con el desarrollo de la capacidad resistente de la estructura.

- Método de aplicación

- Preparación del sustrato: Según (Proaño Tataje, 2012), el sustrato del concreto se debe preparar antes de la aplicación de sistemas CFRP, especialmente cuando hay problemas de corrosión en los aceros de refuerzo, señala que los sistemas CFRP no están diseñados para resistir fuerzas expansivas que sean generadas por dicha patología. En caso de que no se presenten patologías en el concreto, es importante verificar que la superficie de concreto a reforzar debe estar limpia, seca y libre de humedad en su superficie. Asimismo, se debe proceder a la remoción de partículas extrañas, polvo o cualquier elemento que no permita una adecuada adherencia

  "Para la preparación de la superficie de concreto se recomienda utilizar chorro de arena o cualquier otro procedimiento de limpieza mecánica (escarificado con amoladora) que provea textura rugosa a la superficie." (SIKA, 2019)

Figura 32 Proceso de modernización de columnas utilizando materiales compuestos de fibra de carbono



Nota. (Horse Construction Refuerzo Estructural, 2023)

- Prueba de adherencia: Cuando la adherencia es un parámetro crítico, la resistencia de adherencia del sustrato del concreto debe evaluarse mediante ensayo de tracción por arrancamiento (pull-off), los cuales son realizados de acuerdo las normativas: ASTM D7522/D7522M. Según la norma (ACI 440.2R, 2017), la resistencia de adherencia obtenida

debe ser mayor a 1.4 MPa y el modo de falla se debe manifestar en el sustrato de concreto, en caso se obtenga valores menores, se requerirá evaluación por parte del profesional responsable.

- Aplicación del refuerzo externo sobre la viga de concreto armado

  a) Preparación del sustrato de concreto, asegurando una superficie limpia, seca y libre de elementos extraños que puedan impedir una buena adherencia.

  b) Aplicación del adhesivo epóxico sobre el sustrato de concreto, conforme a las recomendaciones de la ficha técnica del fabricante, con los componentes debidamente dosificados y pesados.

  c) Impregnación de adhesivo epóxico a la fibra de carbono cubriéndola uniformemente a lo largo de toda su longitud; previamente la fibra de carbono se recorta de acuerdo con las dimensiones establecidas en el proyecto.

  d) Eliminar burbujas de aire, mediante el uso de rodillos quita-burbujas especiales para garantizar una adecuada adherencia entre el refuerzo y el concreto.

  e) Sellado final con adhesivo epóxico, con el fin de proteger el sistema de refuerzo y contribuir a la durabilidad y al desempeño del sistema CFRP.

2.9. Reforzamiento a flexión en vigas de concreto reforzado mediante el uso de fibras de carbono según normativa ACI 440.2R-17

Está basado en los principios de diseño de concreto armado convencionales, es decir, adaptando cálculos y métodos donde se integre las características del refuerzo con fibra de carbono. Todo ello contribuye a la mejora del comportamiento estructural de las vigas de concreto armado bajo cargas de flexión.

- Condiciones generales para el diseño

La fibra de carbono trabaja muy bien como refuerzo para resistir las fuerzas de tracción, se debe asegurar la adherencia y compatibilidad de deformaciones entre la fibra de carbono y el concreto. Este tipo de refuerzo no está hecho para soportar compresión, a menos que por efecto de la inversión de momento y la fibra de carbono queda en la zona comprimida, puede que experimente compresión, no obstante, dicho aporte no se considera en el cálculo de la resistencia a flexión

- Filosofía del diseño FRP

Según la normativa del ACI 440.2R-2017, en el capítulo 9.1, para diseñar con refuerzo de fibra de carbono, se debe de seguir los pasos en cuanto a los requisitos de resistencia y capacidad de servicio. Así como en el concreto existen incertidumbres respecto a su resistencia y comportamiento, lo mismo ocurre con la fibra de carbono; por esta razón, se aplican factores de reducción a la resistencia que aporta el refuerzo de fibra de carbono para reflejar dichas incertidumbres y garantizar un diseño seguro y de calidad

- Lineamientos del reforzamiento FRP

En el capítulo 9.2 de la misma norma se indican que existen ciertos límites en el diseño de la fibra de carbono para prevenir el colapso de la estructura, si es que ocurren fallas en dicho refuerzo, como la pérdida de adherencia, daño físico u otras causas. Es importante mencionar que la resistencia existente debe ser suficiente para resistir un nivel de carga:

$$(\Phi R_n)_{existente} \geq (1.1\, S_{DL} + 0.75\, S_{LL})_{nuevo}$$

Donde:

$R_{n_existente} = Resistencia\ nominal\ del\ elemento$

$S_{DL} = Efecto\ de\ la\ carga\ permanente$

$S_{LL} = Efecto\ de\ la\ carga\ viva$

Momento resistente a flexión:

$$M_{existente} \geq \Phi_b * M_n$$

Momento ante carga muerta y viva:

$$M_{actuante} = 1.1\, M_{DL} + 0.75\, M_{LL}$$

2.10. Propiedades técnicas del fabricante de la fibra de carbono

Las propiedades de la fibra de carbono dependen del tipo de material que se utilice, ya que existen diversos sistemas disponibles en el mercado. Cada uno de ellos tiene su ficha técnica correspondiente, de donde se extrae la información técnica requerida para el dimensionamiento del refuerzo estructural.

Tabla 8 Propiedades técnicas del fabricante de la fibra de carbono utilizadas en el diseño del sistema FRP

ESFUERZO A LA TRACCIÓN ÚLTIMO	DEFORMACIÓN DE LA RUPTURA	MÓDULO DE ELASTICIDAD	ESPESOR DE LA FIBRA DE CARBONO	DENSIDAD DE LA FIBRA DE CARBONO
$\boldsymbol{f'_{fu}}$	ε'_{fu}	$E'_{fu} = \frac{f'_{fu}}{\varepsilon'_{fu}}$	$\boldsymbol{t_f}$	$\boldsymbol{\rho_f}$

Nota. Elaboración propia

2.10.1. Propiedades técnicas para el diseño a flexión de la fibra de carbono

Este tipo de refuerzo son expuestas diferentes condiciones ambientales y esto puede que disminuya sus propiedades mecánicas tales como la resistencia a la tracción, la fluencia y la fatiga de la fibra de carbono. Por ello, según la normativa establece ecuaciones de diseño donde se aplican factores de exposición ambiental, y así asegurar un diseño adecuado, seguro y confiable.

Tabla 9 Factor de reducción ambiental para varios sistemas FRP y condiciones de exposición

CONDICIONES DE EXPOSICIÓN	TIPO DE FIBRA	FACTOR DE REDUCCIÓN AMBIENTAL
Exposición interior	Carbono	0.95
	Vidrio	0.75
	Aramida	0.85
Exposición exterior (puentes, muelles y estacionamientos no cerrados)	Carbono	0.85
	Vidrio	0.65
	Aramida	0.75
Entorno agresivo (plantas químicas y plantas para el tratamiento de aguas residuales)	Carbono	0.85
	Vidrio	0.50
	Aramida	0.70

Nota. (ACI PRC-440.2-17, 2017)

Tabla 10 Propiedades técnicas para el diseño a flexión de la fibra de carbono utilizadas en el diseño del sistema FRP

ESFUERZO A LA TRACCIÓN ÚLTIMO DE DISEÑO	DEFORMACIÓN DE LA RUPTURA DE DISEÑO	MÓDULO DE ELASTICIDAD DE DISEÑO
$\boldsymbol{f_{fu} = C_E * f'_{fu}}$	$\boldsymbol{\varepsilon_{fu} = C_E * \varepsilon'_{fu}}$	$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}}$

Nota. Elaboración propia

- Procedimiento de cálculo FRP

En la sección 10.2 del ACI 440.2R-2017, presenta una guía para el cálculo del efecto de refuerzo por flexión al incorporar fibra de carbono a lo largo de una viga, además proporciona lineamientos para la resistencia y comportamiento estructural de los elementos a reforzar.

2.10.2. Cálculo de la deformación en el concreto en el instante de colocar el FRP

En este paso, se calcula suponiendo que la viga está agrietada y que las cargas muertas que actúan sobre ella son las únicas que aparecen sobre la viga al instalar la fibra de carbono.

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL} * (d_f - k * d)}{I_{cr} * E_c}$$

Donde:

$\varepsilon_{bi} =$ *Deformación unitaria inicial en el concreto al momento de colocar el CFRP*

$M_{DL} =$ *Momento de carga muerta*

$d_f =$ *Altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión*

k = Proporción *entre la profundidad del eje neutro de la viga y de la profundidad del refuerzo medido desde la fibra extrema a compresión.*

$d =$ *Distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo CFRP*

$I_{cr} =$ *Momento de inercia de la viga reforzada*

$E_c =$ *Módulo de elasticidad del concreto*

2.10.3. Determinar el coeficiente dependiente de adherencia del sistema del FRP

Este coeficiente adimensional proporciona un margen de seguridad al sistema de refuerzo de la fibra de carbono, ya que controla el comportamiento del FRP frente al riesgo de su desprendimiento, es por ello por lo que se necesita limitar el nivel de deformación que se puede dar en la fibra de carbono, mediante la siguiente ecuación se define el coeficiente de adherencia K_m , y así se garantiza una unión adecuada entre la fibra de carbono y el concreto.

$$K_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}}\left(1 - \frac{nE_f t_f}{360000}\right) \leq 0.90 & nE_f t_f \leq 180000\ N/mm \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}}\left(\frac{90000}{nE_f t_f}\right) \leq 0.90 & nE_f t_f > 180000\ N/mm \end{cases}$$

$n =$ *número de capas*

$\varepsilon_{fu} =$ *Deformación de ruptura de diseño del refuerzo de la fibra de carbono*

$E_f =$ *Módulo de elasticidad a tensión del refuerzo de la fibra de carbono*

$t_f =$ *Espesor nominal de una capa de fibra de carbono*

Cuando la fibra de carbono es muy rígida, el coeficiente dependiente de adherencia K_m disminuye. Dicho factor es un valor que no supera el 0.90 que puede ser multiplicado por la deformación a rotura de la fibra de carbono ε_{fu} y así se reduce la deformación permitida en el diseño, donde se mantiene la adherencia entre la fibra de carbono y el concreto, evitando el despegue de este.

2.10.4. Estimar la profundidad del eje neutro

Una estimación razonable para tomar como valor inicial es $c = 0.20 * d$ y este será ajustado hasta que se cumpla la condición de equilibrio entre las fuerzas internas de la sección de la viga.

$$c = 0.20 * d$$

Donde:

$$d = Distancia\ desde\ la\ fibra\ extrema\ a\ compresión\ al\ centroide\ del\ refuerzo\ CFRP$$

2.10.5. Determinar el nivel efectivo de deformación de la fibra de carbono

Este procedimiento permite determinar la deformación alcanzada por la fibra de carbono en una viga antes de fallar, identificando el modo de falla que controla la sección (aplastamiento del concreto o el desprendimiento de la fibra de carbono). Como el FRP suele gobernar la falla, el concreto no siempre llega a la deformación máxima de 0.003.

La deformación efectiva en el refuerzo de la fibra de carbono en el estado límite último se obtiene a partir de la siguiente ecuación. (ACI 440.2R, 2017)

$$\varepsilon_{fe} = 0.003\left(\frac{d_f - c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq K_m\,\varepsilon_{fu}$$

$c = Profundidad\ del\ eje\ neutro$

$d_f = Altura\ efectiva\ del\ refuerzo\ CFRP\ a\ flexión$

$\varepsilon_{bi} = Deformación\ inicial\ en\ el\ concreto\ al\ momento\ de\ colocar\ la\ fibra\ de\ carbono$

$\varepsilon_{fu} = Deformación\ de\ ruptura\ de\ diseño\ del\ refuerzo\ de\ la\ fibra\ de\ carbono$

$K_m = Coeficiente\ de\ adherencia$

Si la primera expresión fuera la que gobierna, el modo de falla sería el aplastamiento del concreto. Sin embargo, como la fibra de carbono es la que controla la falla de la sección, la deformación del concreto en el momento de la falla puede ser menor que 0.003. Así que se puede calcular mediante triángulos semejantes, aplicando la siguiente ecuación.

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{c}{d_f - c}\right)$$

2.10.6. Determinar modo de falla

En el capítulo 10.1. del (ACI 440.2R, 2017), indican los diferentes modos de fallo, donde se menciona que la resistencia a la flexión de una sección estructural depende del modo de falla que la controla:

Tabla 11 Modos de falla según ACI 440.2R

MODOS DE FALLO SEGÚN ACI 440.2R
a) Aplastamiento del concreto en compresión antes de la fluencia del acero de refuerzo
b) Fluencia del acero en tracción seguida de la rotura del laminado del FRP
c) Fluencia del acero en tracción seguida del aplastamiento del concreto
d) Delaminación por cortante/ tracción del recubrimiento del concreto (delaminación del recubrimiento)
e) Desprendimiento del FRP del sustrato del concreto (desprendimiento del FRP)

Nota. (ACI 440.2R, 2017)

Determinar la deformación en el acero de refuerzo existente

Este paso puede ser calculado usando la relación de semejanza de triángulos en la distribución de deformaciones (figura 33) asumiendo un comportamiento elástico, por lo tanto, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right)$$

$\varepsilon_{fe} = Deformación\ efectiva\ del\ refuerzo\ de\ la\ fibra\ de\ carbono$

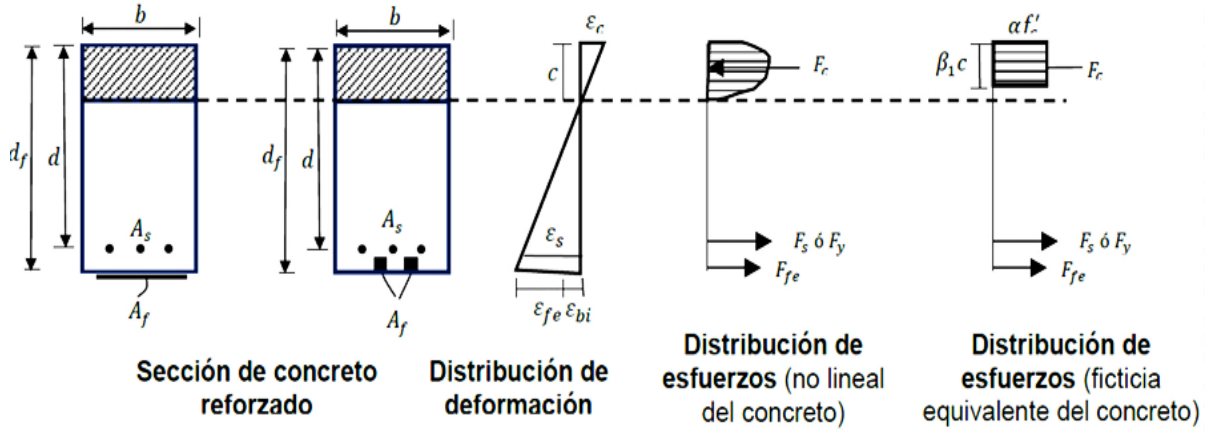
$\varepsilon_{bi} = Deformación\ inicial\ en\ el\ concreto\ al\ momento\ de\ colocar\ la\ fibra\ de\ carbono$

$d = Distancia\ desde\ la\ fibra\ extrema\ a\ compresión\ al\ centroide\ del\ refuerzo\ CFRP$

$c = Profundidad\ del\ eje\ neutro$

$d_f = Altura\ efectiva\ del\ refuerzo\ CFRP\ a\ flexión$

Figura 33 Distribución de esfuerzos internos



Nota. (ACI 440.2R, 2017)

2.10.7. Nivel de resistencia en el refuerzo del acero estructural y el sistema FRP

El nivel de refuerzo del acero de refuerzo puede ser calculado en función de su deformación, considerando su curva esfuerzo – deformación de tipo perfectamente plástica, además el resultado debe ser menor o igual al valor del esfuerzo de fluencia del acero.

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$$

Donde:

$E_s =$ *Módulo de elasticidad del acero*

$\varepsilon_s =$ *Deformación del acero de refuerzo*

$f_y =$ *Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo*

De la misma forma, el nivel de esfuerzo del refuerzo de la fibra de carbono se calcula en función de la deformación de la fibra de carbono, que ya fue hallado anteriormente, donde se considera un comportamiento elástico perfecto.

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

$E_f =$ *Módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP*

$\varepsilon_{fe} =$ *Deformación efectiva del refuerzo CFRP alcanzada en la falla*

2.10.8. Cálculo del equilibrio de fuerzas internas

De acuerdo con la normativa, la siguiente ecuación describe el equilibrio de las fuerzas internas de una sección de concreto reforzada con acero estructural y fibra de carbono, donde se iguala la fuerza de compresión del concreto a la suma de fuerzas de tracción del acero y de la fibra de carbono. El procedimiento inicia con una estimación de c, el cual corresponde a la profundidad del eje neutro.

$$\alpha_1 f_c \beta_1 b c = A_s f_s + A_f f_{fe}$$

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b}$$

$c = Profundidad\ del\ eje\ neutro$

$A_s = Área\ de\ acero\ de\ refuerzo$

$f_s = Esfuerzo\ del\ acero\ de\ refuerzo$

$A_f = Área\ del\ refuerzo\ de\ la\ fibra\ de\ carbono$

$f_{fe} = Esfuerzo\ efectivo\ del\ refuerzo\ de\ la\ fibra\ de\ carbono\ en\ la\ seccion\ de\ la\ falla$

$\alpha_1 = Factor\ de\ la\ resistencia\ de\ concreto\ (f'c)\ asociado\ con\ el\ bloque\ de\ esfuerzos$

$f'_c = Resistencia\ a\ la\ compresión\ del\ concreto$

$\beta_1 = Relación\ entre\ la\ altura\ del\ bloque\ equivalente\ de\ compresión\ y\ la\ altura\ del\ eje\ neutro$

$b = Ancho\ de\ la\ cara\ a\ compresión\ de\ la\ sección\ a\ estudiar$

Los términos $\alpha_1\ y\ \beta_1$, se emplean para simplificar la distribución de los esfuerzos del concreto, ya que así ajustan de manera ideal para representar de manera más precisa el comportamiento real del bloque en compresión.

Se asume $\alpha_1 = 0.85\ y\ \beta_1$ es determinado según la siguiente tabla:

Tabla 12 Valores de β_1 para la distribución rectangular equivalente de esfuerzos en el concreto

f'_c, MPa f'_c, MPa	β_1
$17 \leq f'_c \leq 28$	0.85
$28 \leq f'_c \leq 55$	$0.85-\frac{0.05(f'_c-28)}{7}$
$f'_c \geq 55$	0.65

Nota. (ACI 318-14, 2014)

La profundidad del eje neutro se determinó mediante un proceso iterativo hasta alcanzar el equilibrio de fuerzas y compatibilidad de deformaciones. Se busca que el valor asumido de c, coincida con el valor calculado, en caso contrario se repiten los cálculos hasta lograr la coincidencia de ambos valores de c, donde se asegura el equilibrio de la sección.

2.10.9. Cálculo de los componentes de la resistencia de diseño a flexión del elemento estructural

Una vez convergido el valor de c (profundidad del eje neutro), se calculó el momento nominal resistente por parte del acero estructural y por parte de la fibra de carbono de la viga reforzada.

$$Momento\ nominal\ resistente\ que\ proporciona\ el\ acero\ estructural$$

$$M_{ns} = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2}\right)$$

$A_s =$ $Área\ de\ acero\ de\ refuerzo$

$f_s =$ $Esfuerzo\ del\ acero\ de\ refuerzo$

$d = Distancia\ desde\ la\ fibra\ extrema\ a\ compresión\ al\ centroide\ del\ refuerzo\ CFRP$

$\beta_1 =$ $Relación\ entre\ la\ altura\ del\ bloque\ equivalente\ de\ compresión\ y\ la\ altura\ del\ eje\ neutro$

$c =$ $Profundidad\ del\ eje\ neutro$

$$Momento\ nominal\ resistente\ que\ proporciona\ la\ fibra\ de\ carbono$$

$$M_{nf} = A_s f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2}\right)$$

$A_s =$ $Área\ de\ acero\ de\ refuerzo$

$f_{fe} = Esfuerzo\ efectivo\ del\ refuerzo\ de\ la\ fibra\ de\ carbono\ en\ la\ seccion\ de\ la\ falla$

$d_f =$ $Altura\ efectiva\ del\ refuerzo\ CFRP\ a\ flexión$

$\beta_1 =$ $Relación\ entre\ la\ altura\ del\ bloque\ equivalente\ de\ compresión\ y\ la\ altura\ del\ eje\ neutro$

$c =$ $Profundidad\ del\ eje\ neutro$

2.10.10. Cálculo de momento resistencia a flexión reforzada con el sistema FRP

La resistencia nominal a la flexión con refuerzo externo de FRP, se determina según la ecuación mostrada, donde se aplica dos factores de reducción: el factor de reducción de resistencia del elemento estructural (φ), que considera las condiciones del diseño, y el factor de reducción de resistencia del refuerzo de FRP (ψ_f), el cual toma en cuenta las posibles limitaciones del sistema de la fibra de carbono bajo esfuerzo de flexión.

$$Momento\ nominal\ resistente\ que\ proporciona\ el\ sistema\ FRP$$

$$\varphi M_n = \ \varphi\left[M_{ns} + \ \psi_f\, M_{nf}\ \right]$$

$\varphi = \ Factor\ de\ reducción\ de\ resistencia\ del\ elemento\ estructural$

$\psi_f \ = \ Factor\ de\ reducción\ de\ resistencia\ del\ refuerzo\ de\ la\ fibra\ de\ carbono\ para\ flexión$

$M_{ns} = \ Momento\ nominal\ resistente\ que\ proporciona\ el\ acero\ estructural$

$M_{nf} = Momento\ nominal\ resistente\ que\ proporciona\ la\ fibra\ de\ carbono$

$$Factor\ de\ reducción\ de\ resistencia\ del\ elemento\ estructural$$

$$\varphi = \begin{cases} 0.90\ para\ \varepsilon_s \ \geq \ 0.005 \\ 0.65 + \dfrac{0.25(\varepsilon_s - \ \varepsilon_{sy})}{0.005 \ - \ \varepsilon_{sy}} para\ \varepsilon_{sy} < \ \varepsilon_s < 0.005 \\ 0.65\ para\ \varepsilon_s \ < \ \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

$$Diseño\ de\ resistencia\ a\ la\ flexión$$

$$\varphi M_n \ \geq \ M_u$$

$\varphi M_n = Resistencia\ nominal\ a\ la\ flexión\ multiplicada\ por\ el\ factor\ de\ reducción$

$M_u = Momento\ calculado\ a\ partir\ de\ cargas\ amplificadas$

2.10.11. Verificación de esfuerzos de servicio en el acero estructural y el sistema FRP

Se calculó la profundidad elástica del eje neutro agrietado:

$$Valor\ de \qquad k = \sqrt{(\rho_s n_s + \rho_f n_f)^2 + 2(\rho_s n_s + \rho_f n_f * \left(\frac{d_f}{d}\right))} - \rho_s n_s + \rho_f n_f$$

$\rho_s =$ *Cuantía del acero estructural*

$n_s =$ *Relación entre el módulo de elasticidad del acero y del concreto*

$\rho_f =$ *Cuantía de la fibra de carbono*

$n_f =$ *Relación entre el módulo de elasticidad de las fibra de carbono y del concreto*

$d_f =$ *Altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión*

$d =$ *Distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo CFRP*

$$k * d$$

Nivel de esfuerzo en el acero de refuerzo bajo cargas de servicio

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3}\right)\right](d - kd)E_s}{A_s E_s(d - \frac{kd}{3})(d - kd) + A_f E_f (d_f - \frac{kd}{3})(d_f - kd)}$$

$M_s =$ *Momento de servicio*

$\varepsilon_{bi} =$ *Deformación unitaria inicial en el concreto al momento de colocar el CFRP*

$A_f =$ *Área del refuerzo de la fibra de carbono*

$E_f =$ *Módulo de elasticidad a tensión de refuerzo CFRP*

$d_f =$ *Altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión*

$k =$ *Proporción entre la profundidad del refuerzo desde la fibra extrema a compresión y la profundidad del eje neutro*

$d =$ *Distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo CFRP*

$E_s =$ *Módulo de elasticidad del acero*

$A_s =$ *Área de acero de refuerzo*

Verificación del nivel de esfuerzo del acero de refuerzo

$$f_{s,s} \leq 0.80\, f_y$$

2.10.12. Verificación del límite de ruptura por fluencia en servicio en sistema FRP

La tensión en la fibra de carbono bajo cargas de servicio se determina mediante la ecuación correspondiente, la cual permitirá calcular el esfuerzo en el refuerzo cuando la viga está dentro de su comportamiento elástico.

$$f_{f,s} = f_{s,s}\left(\frac{E_f}{E_s}\right)\left(\frac{d_f - kd}{d - kd}\right) - \varepsilon_{bi}E_f$$

$f_{s,s} = Esfuerzo\ en\ el\ refuerzo\ del\ CFRP\ dentro\ de\ su\ comportamiento\ elástico$

$E_f = Módulo\ de\ elasticidad\ a\ tensión\ de\ refuerzo\ CFRP$

$E_s = Módulo\ de\ elasticidad\ del\ acero$

$d_f = Altura\ efectiva\ del\ refuerzo\ CFRP\ a\ flexión$

$k = Proporción\ entre\ la\ profundidad\ del\ refuerzo\ desde\ la\ fibra\ extrema\ a\ compresión\ y\ la\ profundidad\ del\ eje\ neutro$

$d = Distancia\ desde\ la\ fibra\ extrema\ a\ compresión\ al\ centroide\ del\ refuerzo\ CFRP$

$\varepsilon_{bi} = Deformación\ unitaria\ inicial\ en\ el\ concreto\ al\ momento\ de\ colocar\ el\ CFRP$

$E_f = Módulo\ de\ elasticidad\ a\ tensión\ de\ refuerzo\ CFRP$

$$Límite\ de\ carga\ sostenida\ mas\ cíclica = 0.55 * f_{fu}$$

2.10.13. Longitud de desarrollo

La adherencia del FRP se desarrolla a lo largo de una longitud crítica. Donde existe una transferencia de esfuerzos entre el concreto y la fibra de carbono. La longitud de anclaje debe ser mayor al valor obtenido según la ecuación:

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n\,E_f\,t_f}{\sqrt{f'_c}}}$$

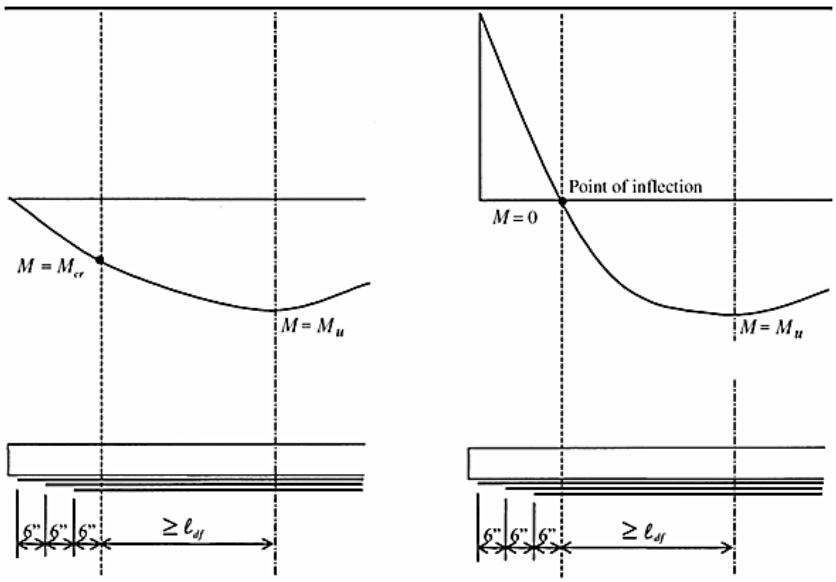
$n = número\ de\ capas$

$f'_c = Resistencia\ a\ la\ compresión\ del\ concreto$

$E_f = Módulo\ de\ elasticidad\ a\ tensión\ de\ refuerzo\ CFRP$

$t_f = Espesor\ de\ la\ fibra\ de\ carbono$

Figura 34 Representación gráfica de las directrices para los puntos de terminación permitidos de un laminado de fibra de carbono – 03 capas



Viga simplemente apoyada | Viga continua

Nota. (ACI 440.2R, 2017)

2.11. Modos de fallo según la normativa ACI 440.2R-17

2.11.1. Aplastamiento del concreto en compresión antes de la fluencia del acero de refuerzo

Se asume que el aplastamiento del concreto ocurre si la deformación de compresión en el concreto alcanza su deformación máxima utilizable.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 0.003$$

2.11.2. Fluencia del acero a tensión seguida de rotura del laminado de FRP

$$f_s = f_y$$

Seguido de:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fu}$$

2.11.3. Fluencia del acero a tensión seguida del aplastamiento del concreto

Sin falla del refuerzo externo de la fibra de carbono. Donde esta falla es la esperada.

$$f_s = f_y$$

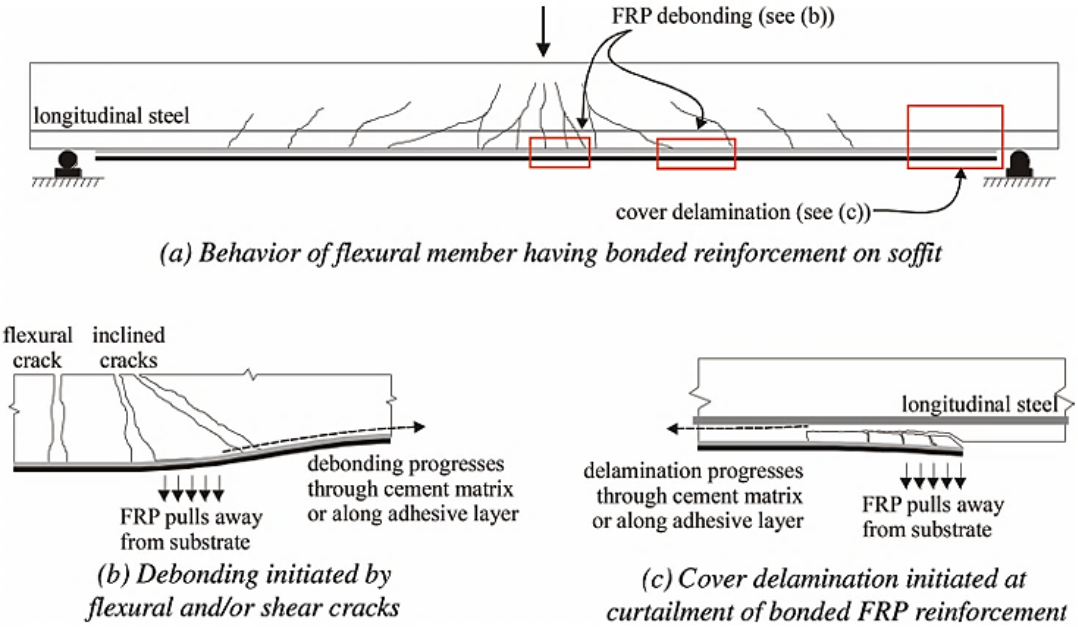
Seguido de:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 0.003$$

2.11.4. Delaminación por corte/tensión de la cubierta de concreto (delaminación del recubrimiento)

Esto sucede cuando el sustrato del concreto no soporta la tensión de la fibra de carbono

Figura 35 Despegue y delaminación de sistemas FRP adheridos externamente



Nota. (ACI 440.2R, 2017)

2.11.5. Desprendimiento del FRP del sustrato de concreto (desprendimiento de FRP)

Ello sucede cuando se producen grietas por flexión y cortante. Según la normativa del ACI 440.2R-17, menciona que en los extremos donde termina el FRP adherido externamente, puede regir una falla controlada por el desprendimiento de este. Entonces, para evitar este modo de falla, la deformación efectiva en el refuerzo debe limitarse a la deformación a la que pueda ocurrir el desprendimiento ε_{fd}.

$$\varepsilon_{fe} \leq \varepsilon_{fd}$$

2.12. Causas y condiciones que provocan la delaminación

2.12.1. Deficiente preparación de la superficie

Una de las causas principales de la delaminación prematura en sistemas FRP, es la deficiente preparación de la superficie del sustrato del concreto. Para garantizar una transferencia efectiva de esfuerzos entre el concreto y el sistema CFRP, la calidad del sustrato del concreto es un factor determinante en el éxito de este sistema de reforzamiento. Según la hoja de datos del producto (SIKA, 2019), la superficie debe encontrarse sana, limpia y seca. Es importante remover cualquier agente contaminante como grasas, lechadas de cemento o partículas sueltas que puedan comprometer la adherencia. También recomiendan una limpieza mecánica mediante chorro de arena o escarificado con amoladora, ya que este dará una textura rugosa necesaria y la nivelación con morteros de reparación ante posibles irregularidades superficiales. Finalmente, la eficacia de dicha preparación debe validarse mediante ensayos de adherencia para asegurar la integridad del sistema.

2.12.2. Condiciones ambientales

El rendimiento a largo plazo de los sistemas C

FRP está ligado a las condiciones ambientales a las que se expondrá el elemento estructural reforzado. Factores como la humedad persistente, el impacto mecánico, la exposición prolongada a la radiación ultravioleta y fluctuaciones térmicas pueden degradar la matriz epóxica y alterar las propiedades del sistema, reduciendo tanto la resistencia a la tracción como la capacidad de carga del sistema, es por ello que se puede aplicar un recubrimiento protector al sistema CFRP que mitigue el impacto de dichas condiciones ambientales.

2.12.3. Calidad del puente adherente

La calidad del puente adherente radica en que estos productos ya vienen certificados por el fabricante y cumplen determinadas normas técnicas. Sin embargo, el problema podría presentarse en la ejecución en obra. Una resina de buena calidad no servirá de mucho si las proporciones entre la resina y el endurecedor son incorrectas, o si el proceso de rodillado es insuficiente para asegurar la aplicación del adhesivo epóxico. Asimismo, la falta de una eliminación adecuada de las burbujas de aire mediante el rodillo correspondiente compromete la integridad de la capa, derivando inevitablemente en una delaminación prematura de la fibra de carbono.

2.13. Mitigación de fallas

2.13.1. Métodos para evitar la delaminación

En la norma (ACI 440.2R, 2017), menciona que el uso de sistemas de anclaje, como el uso de cintas en U (U-Wraps), que “abrazan” el refuerzo longitudinal; fijaciones mecánicas, que emplean pernos o platinas para anclar los extremos; anclajes de fibra, que penetran en el núcleo del concreto; y la técnica de refuerzo insertado en ranuras (NSM), la cual incrementa significativamente la superficie de adherencia y reduce la vulnerabilidad ante el despegue superficial

La aplicación del refuerzo en forma de U-Wraps es una de las estrategias más efectivas para poder mitigar la delaminación, ya que estos actúan como un mecanismo de anclaje que restringe el desprendimiento de la lámina de fibra de carbono longitudinal. Al abrazar la sección transversal de la viga hace que se disminuya considerablemente el riesgo de falla ya que evita que los extremos de la fibra se levanten, que es por donde empieza a desprenderse el refuerzo.

CAPÍTULO III

3. Metodología

3.1 Enfoque de la investigación

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, debido a que se basa en la obtención y análisis de resultados numéricos provenientes de ensayos experimentales realizados en vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono.

La investigación se sustenta en mediciones de deflexión, observación de grietas, identificación de tipos de falla y comportamiento estructural durante los ensayos de flexión. Asimismo, los resultados obtenidos permiten analizar experimentalmente el mecanismo de delaminación y evaluar la influencia de la disposición del refuerzo estructural en dicho fenómeno.

3.2 Nivel de investigación

La investigación corresponde a un nivel explicativo – experimental, debido a que busca explicar el comportamiento estructural de las vigas reforzadas con fibra de carbono y analizar cómo la disposición del refuerzo influye en la aparición de la falla por delaminación.

Asimismo, se estudian las relaciones entre las variables involucradas durante el ensayo experimental, permitiendo comprender el mecanismo de falla presentado en las vigas ensayadas.

3.3 Diseño de investigación

La investigación presenta un diseño experimental, ya que se fabricaron y ensayaron vigas de concreto armado con diferentes configuraciones de refuerzo estructural, permitiendo observar directamente el comportamiento de las vigas y el desarrollo de la delaminación bajo ensayo de flexión. Las variaciones consideradas en la investigación corresponden principalmente a:

- Resistencia a la compresión del concreto.

- Cantidad de estribos.
- Refuerzo longitudinal de acero.
- Presencia de fibra de carbono.
- Tipo de refuerzo con fibra de carbono.
- Configuración del ensayo de flexión.

Estas configuraciones permitieron evaluar experimentalmente diferentes comportamientos estructurales y mecanismos de falla.

3.4 Tipo de investigación

La investigación es de tipo experimental y aplicada, debido a que se desarrollaron ensayos en laboratorio para analizar el mecanismo de delaminación en vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono.

Asimismo, es aplicada porque busca generar conocimiento útil para comprender el comportamiento real del refuerzo con fibra de carbono y aportar criterios técnicos relacionados con la aparición de la falla por delaminación en elementos sometidos a flexión.

3.5 Lugar de ensayo, materiales, equipos y procedimientos experimentales

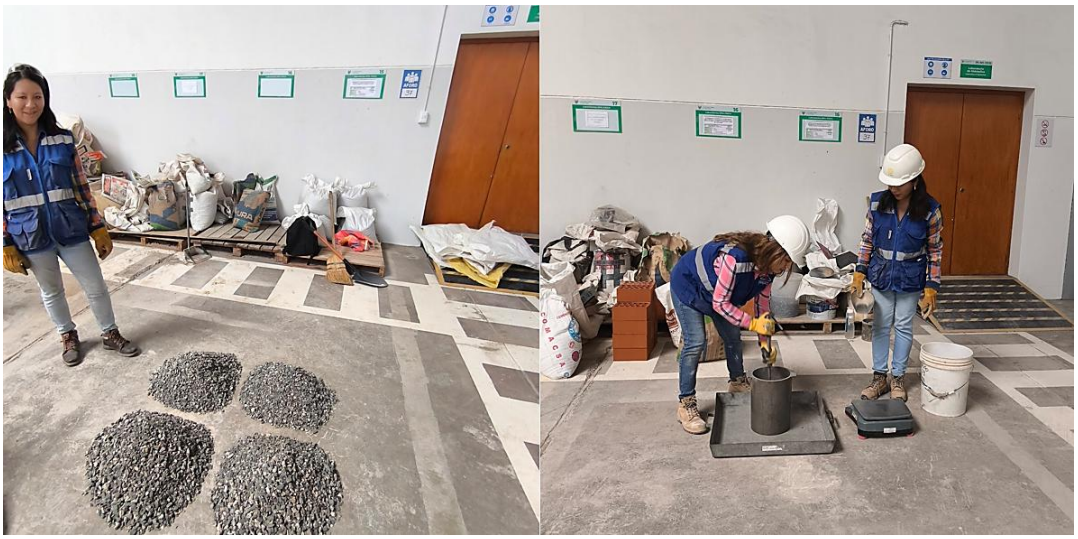
3.5.1 Lugar de ensayos

Los ensayos relacionados con la caracterización de los agregados, incluyendo su diseño de mezclas y las pruebas ultrasónicas para la estimación de los valores de la resistencia a compresión del concreto se realizó en el Laboratorio de Suelos y Concreto de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Santa María de Arequipa. Posteriormente, se

realizaron los ensayos de flexión de las vigas a escala media en la Universidad Nacional de San Agustín.

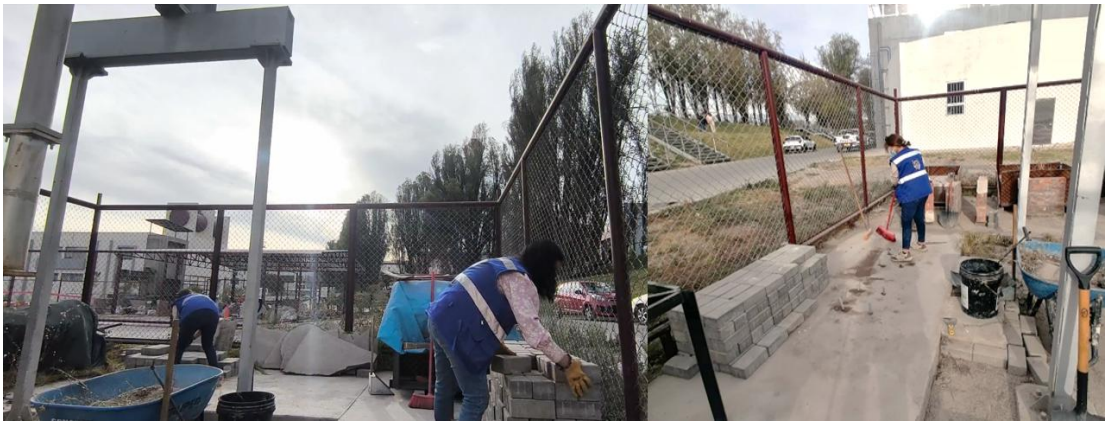
Antes de iniciar, se realizó la limpieza y la organización del área para disponer adecuadamente las vigas a ensayar.

Figura 36 Ensayos de caracterización de agregados en el Laboratorio de Suelos y Concreto de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Santa María de Arequipa



Nota. Elaboración propia

Figura 37 Limpieza y acondicionamiento de la zona de trabajo brindada por la Universidad Nacional de San Agustín



Nota. Elaboración propia

Figura 38 Vista externa e interna del Marco de Reacción para los ensayos de flexión en las vigas a escala media dentro de la Universidad Nacional de San Agustín



Nota. Elaboración propia

3.5.2 Materiales e insumos

Para la fabricación de las vigas de concreto armado y las probetas utilizadas en la presente investigación, se emplearon los siguientes materiales:

Tabla 13 Materiales

- Arena gruesa y piedra chancada HUSO 7

Figura 39 Obtención de agregados de arena gruesa y piedra chancada HUSO 7 para la elaboración del concreto de la cantera "La Poderosa" adquiridas a través de Supermix



Nota. Elaboración propia

- Cemento Portland Tipo HS

Figura 40 Cemento Portland Tipo HS Yura Max



Nota. Elaboración propia

- Agua utilizada para la elaboración de concreto

Figura 41 Agua almacenada en cilindros para la elaboración de vigas



Nota. Elaboración propia

- Acero de refuerzo de 3/8”, 8 mm y de 6 mm

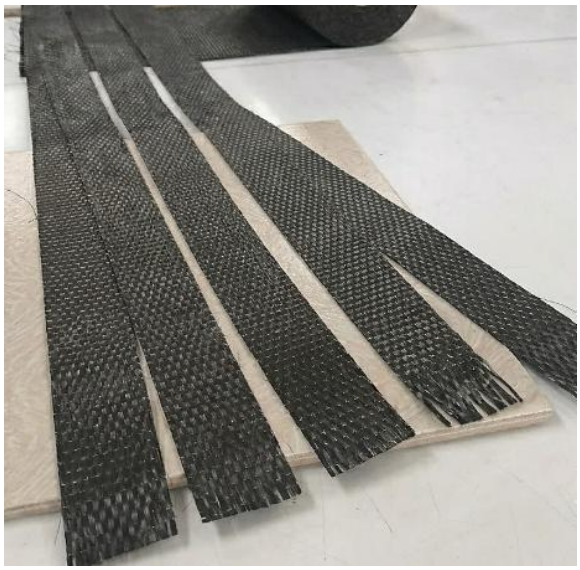
Figura 42 Armaduras de acero de refuerzo fabricadas para las vigas, conformadas por barras longitudinales de 3/8"y 8 mm y de 6 mm diámetro para los estribos



Nota. Elaboración propia

- Fibra de carbono SikaWrap-600C

Figura 43 Fibra de carbono SikaWrap®-600C utilizada como sistema de reforzamiento externo en las vigas de concreto armado

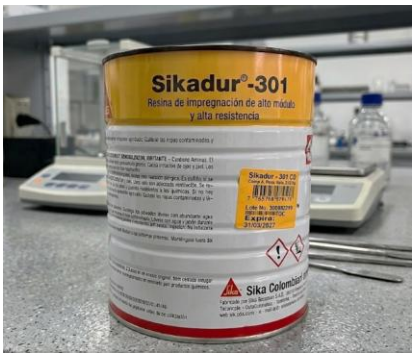


Nota. Elaboración propia

- Adhesivo epóxico Sikadur-301, compuesto por:

  - Componente A: Resina de impregnación de alto módulo y alta resistencia (3.11 kg).

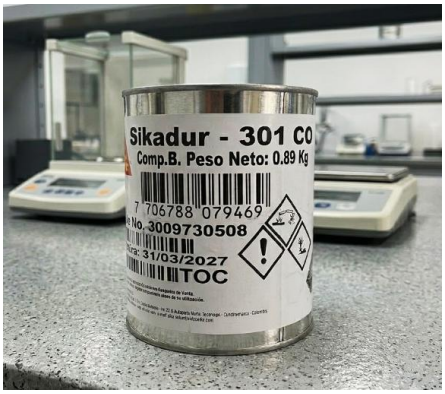
Figura 44 Resina epóxica correspondiente al componente A del adhesivo Sikadur®-301, empleada para la instalación del sistema CFRP



Nota. Elaboración propia

  - Componente B: Endurecedor (0.89 kg).

Figura 45 Endurecedor correspondiente al componente B del adhesivo Sikadur®-301, utilizado para la preparación de la mezcla adhesiva del CFRP



Nota. Elaboración propia

Nota. Elaboración propia

Durante el desarrollo experimental se emplearon los siguientes insumos y elementos auxiliares:

Tabla 14 Insumos

- Moldes fenólicos con dimensión interna de 10cm × 20cm × 200cm.

Figura 46 Moldes fenólicos de fabricación propia utilizados para la elaboración de vigas de concreto armado de 10 × 20 × 210 cm



Nota. Elaboración propia

- Moldes cilíndricos para probetas de concreto de 10 cm de diámetro y 20 cm

Figura 47 Moldes cilíndricos empleados para la fabricación de probetas de concreto destinadas a los ensayos de resistencia



Nota. Elaboración propia

- Rodillos quitaburbujas para instalación de CFRP

Figura 48 Rodillo quitaburbujas utilizado para garantizar la correcta impregnación y adherencia de la fibra de carbono sobre la superficie del concreto



Nota. Elaboración propia)

- Desmoldante para moldes fenólicos

Figura 49 Desmoldante empleado para facilitar el retiro de los moldes fenólicos después del fraguado del concreto



Nota. Elaboración propia

- Rodillos manuales para aplicación del adhesivo epóxico

Figura 50 Aplicación del adhesivo epóxico mediante rodillo manual durante el proceso de reforzamiento con fibra de carbono



Nota. Elaboración propia

- Cono de Abrams para control de asentamiento del concreto

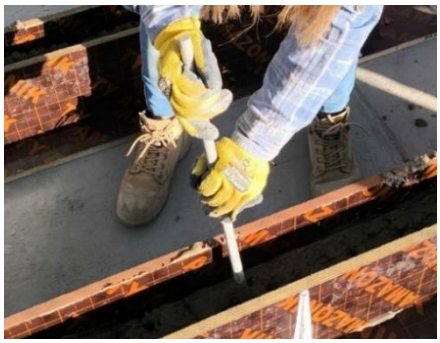
Figura 51 Cono de Abrams utilizado para el control del asentamiento (slump) del concreto fresco



Nota. Elaboración propia

- Varillas metálicas para compactación manual del concreto

Figura 52 Compactación manual del concreto mediante varilla metálica durante el vaciado de las vigas experimentales



Nota. Elaboración propia

- Martillos de goma para vibrado externo del encofrado

Figura 53 Vibrado manual externo del encofrado mediante martillo de goma para reducir vacíos en el concreto



Nota. Elaboración propia

- Espátulas, cucharones, llanas y herramientas auxiliares empleadas para mezclado, vaciado y acabado del concreto

Figura 54 Herramientas auxiliares empleadas durante las etapas de mezclado, vaciado y acabado superficial del concreto



Nota. Elaboración propia

- Carretilla, baldes y palas para el transporte y manipulación de materiales

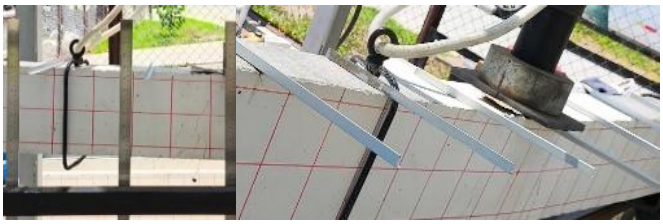
Figura 55 Elementos utilizados para el transporte y manipulación de agregados, concreto fresco y materiales auxiliares



Nota. Elaboración propia

- Reglas metálicas y perfiles de aluminio para medición de deformaciones

Figura 56 Sistema de referencia conformado por reglas metálicas y perfiles de aluminio utilizado para el registro de deformaciones durante los



Nota. Elaboración propia

Nota. Elaboración propia

3.5.3 Equipos e instrumentos

Los equipos utilizados durante la investigación fueron los siguientes:

Tabla 15 Equipos e instrumentos utilizados para la fabricación, reforzamiento y medición deformaciones de las vigas experimentales

- Mezcladora de concreto de 11 pies³ Dynamic Honda CH440 de 14 HP, para la elaboración del concreto.

Figura 57 Mezcladora utilizada durante la preparación y mezclado del concreto para la fabricación de las vigas experimentales.



Nota. Elaboración propia

- Equipo de ultrasonido Proceq PL-200, proporcionado por la Universidad Católica de Santa María.

Figura 58 Equipo empleado para la evaluación no destructiva de la resistencia del concreto mediante propagación de ondas ultrasónicas



Nota. Elaboración propia

- Gata hidráulica con manómetro de lectura

Figura 59 Gata hidráulica utilizada para la aplicación controlada de carga durante los ensayos de flexión



Nota. Elaboración propia

- Marco de Reacción proporcionado por la Universidad Nacional de San Agustín.

Figura 60 Marco de reacción utilizado para la transmisión de cargas durante los ensayos experimentales de flexión



Nota. Elaboración propia

- Cabezales metálicos distribuidores de carga utilizado para la aplicación de una y dos cargas puntuales.

Figura 61 Cabezales metálicos empleados para la aplicación de una y dos cargas puntuales sobre las vigas ensayadas



Nota. Elaboración propia

- Sistema de apoyos y estructura auxiliar utilizado para el montaje de las vigas y la instalación de los instrumentos de medición.

Figura 62 Sistema metálico de ensayo fabricado para la presente investigación, compuesto por dos apoyos metálicos con rodillos y una estructura longitudinal destinada a la instalación de diales digitales electrónicos para el registro de deformaciones y desplazamientos durante los ensayos de flexión



Nota. Elaboración propia

- Diales digitales electrónicos

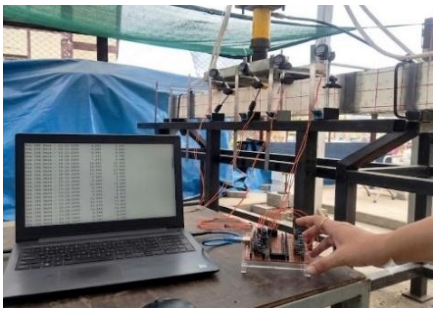
Figura 63 Instrumentos utilizados para el registro de deformaciones y desplazamientos durante los ensayos de flexión



Nota. Elaboración propia

- Sistema de adquisición de datos basado en Arduino

Figura 64 Sistema digital Arduino, conectado a diales electrónicos para el registro y almacenamiento de datos durante los ensayos



Nota. Elaboración propia

- Cámara fotográfica y dispositivos móviles

Figura 65 Equipos empleados para el registro visual del comportamiento estructural, formación de fisuras y procesos de delaminación



Nota. Elaboración propia

- Lijadora eléctrica orbital Truper de superficie cuadrada.

Figura 66 Preparación superficial de las vigas mediante lijado previo a la aplicación del adhesivo epóxico y la instalación del CFRP



Nota. Elaboración propia

Nota. Elaboración propia

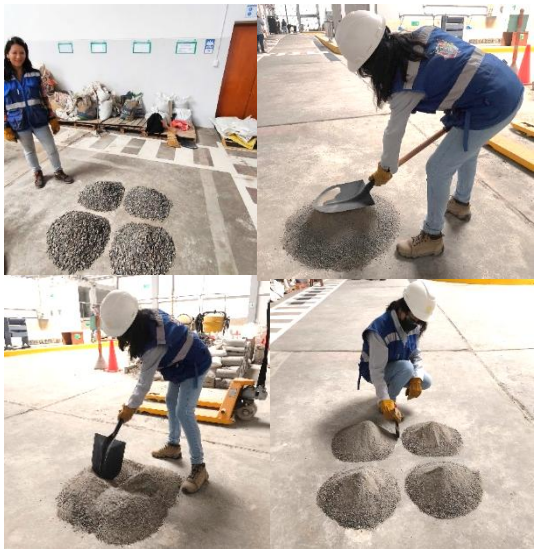
3.5.4 Ensayos de caracterización de materiales

- *Ensayos de caracterización de materiales*

Tabla 16 Ensayos de caracterización física de los agregados utilizados en la elaboración del concreto

- Ensayo de cuarteo

Figura 67 Proceso de cuarteo realizado para obtener muestras representativas de agregado fino y agregado grueso destinadas a los ensayos de caracterización



Nota. Elaboración propia

- Ensayo de granulometría

Figura 68 Tamizado mecánico empleado para determinar la distribución granulométrica de los agregados utilizados en la elaboración del concreto



Nota. Elaboración propia

- Ensayo de contenido de humedad

Figura 69 Determinación experimental del contenido de humedad de los agregados mediante secado en horno



Nota. Elaboración propia

- Ensayo de peso específico y absorción

Figura 70 Procedimiento experimental para determinar el peso específico y la absorción del agregado fino y grueso



Nota. Elaboración propia

- Ensayo de Peso Unitario Suelto

Figura 71 Enrasado del recipiente durante el ensayo de peso unitario suelto del agregado grueso



Nota. Elaboración propia

- Ensayo de Peso Unitario Compactado

Figura 72 Compactación del agregado grueso en capas durante el ensayo de peso unitario compactado



Nota. Elaboración propia

Nota. Elaboración propia

3.5.5 Procedimiento de fabricación de vigas de concreto armado

Tabla 17 Procedimiento de fabricación de vigas experimentales de concreto armado

- Habilitación de moldes de vigas

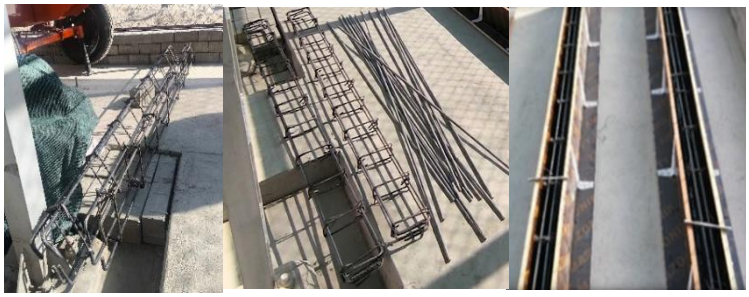
Figura 73 Moldes fenólicos preparados y acondicionados para el vaciado de las vigas experimentales de concreto armado



Nota. Elaboración propia

- Armado de canastillas de acero

Figura 74 Doblado y armado de estribos para elaborar armaduras de acero para las vigas y colocación de la armadura de acero de refuerzo dentro del encofrado de las vigas



Nota. Elaboración propia

- Elaboración del concreto

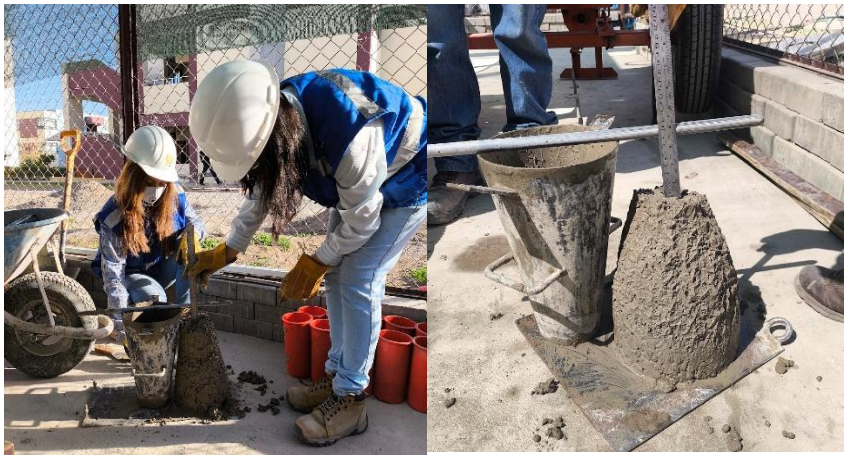
Figura 75 Dosificación y mezclado de los materiales empleados para la preparación del concreto



Nota. Elaboración propia

- Ensayo de asentamiento (Cono de Abrams)

Figura 76 Determinación del asentamiento del concreto fresco mediante el ensayo de cono de Abrams para verificar su trabajabilidad.



Nota. Elaboración propia

- Vaciado, compactación y acabado de vigas

Figura 77 Colocación, compactación manual y acabado superficial del concreto en los moldes de las vigas



Nota. Elaboración propia

- Elaboración de probetas cilíndricas

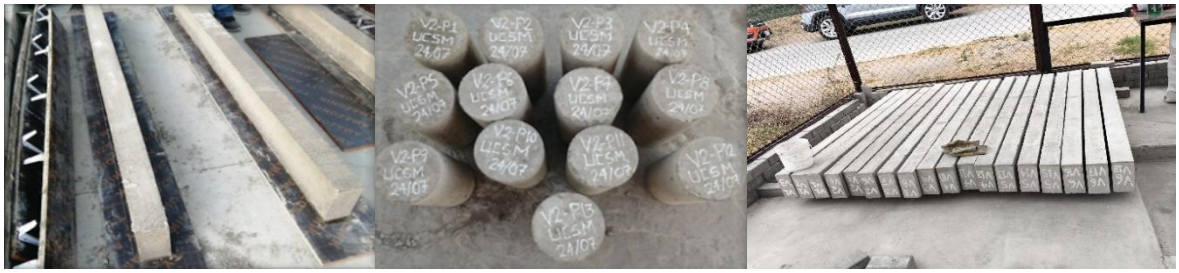
Figura 78 Moldeo, compactación y acabado de probetas cilíndricas destinadas al control de resistencia del concreto



Nota. Elaboración propia

- Desmoldado de vigas y probetas

Figura 79 Retiro de moldes y extracción de vigas y probetas después del fraguado inicial del concreto



Nota. Elaboración propia

Nota. Elaboración propia

3.5.6 Curado y control de resistencia del concreto

Tabla 18 Procedimiento de curado y evaluación de la resistencia del concreto

- Curado de vigas y probetas

Figura 80 Proceso de curado de vigas y probetas de concreto para garantizar el adecuado desarrollo de resistencia



Nota. Elaboración propia

- Evaluación de resistencia mediante ultrasonido en vigas y probetas

Figura 81 Medición no destructiva de la calidad y resistencia del concreto mediante equipo de ultrasonido



Nota. Elaboración propia

- Ensayo de resistencia a la compresión

Figura 82 Evaluación de la resistencia a compresión de probetas cilíndricas de concreto en laboratorio



Nota. Elaboración propia

- Ensayo de flexión en vigas

Figura 83 Montaje experimental y aplicación de carga en vigas de concreto armado durante los ensayos de flexión



Nota. Elaboración propia

Nota. Elaboración propia

3.5.7 Procedimiento de reforzamiento con CFRP

Tabla 19 Procedimiento de instalación del sistema de reforzamiento con fibra de carbono (CFRP)

<table>
<tr>
<td>

- Preparación superficial de las vigas

Figura 84 Lijado y limpieza de la superficie de las vigas previo a la instalación del sistema CFRP.



Nota. Elaboración propia

</td>
<td>

- Delimitación de zonas de reforzamiento

Figura 85 Trazado de las áreas destinadas a la colocación del refuerzo de fibra de carbono



Nota. Elaboración propia

</td>
</tr>
<tr>
<td>

- Habilitación de la fibra de carbono

Figura 86 Corte y acondicionamiento de las láminas de fibra de carbono según las dimensiones de diseño



Nota. Elaboración propia

</td>
<td>

- Preparación del adhesivo epóxico

Figura 87 Dosificación y mezclado de los componentes A y B del adhesivo Sikadur®-301

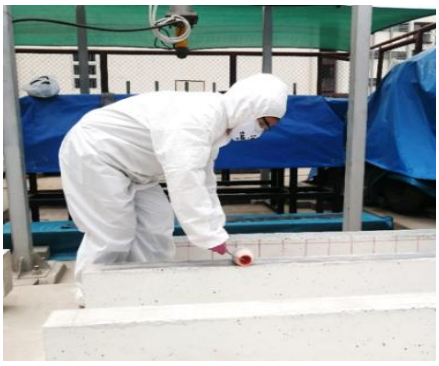


Nota. Elaboración propia

</td>
</tr>
<tr>
<td>

Instalación del sistema CFRP

Figura 88 Aplicación del adhesivo epóxico y colocación de la fibra de carbono sobre la superficie de las vigas



Nota. Elaboración propia

</td>
<td>

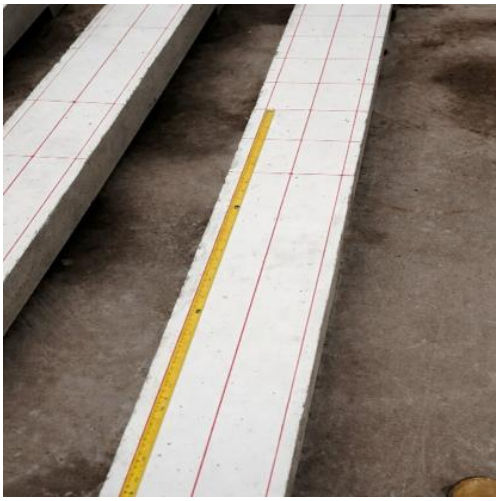
- Eliminación de burbujas y sellado

Figura 89 Compactación de la fibra de carbono mediante rodillo quitaburbujas para asegurar su correcta adherencia.



Nota. Elaboración propia

</td>
</tr>
</table>

- Curado del sistema CFRP *Figura 90 Secado y curado del sistema de reforzamiento con fibra de carbono previo a los ensayos estructurales*  *Nota. Elaboración propia*	- Cuadriculado para seguimiento de fisuras *Figura 91 Marcado superficial de las vigas para el registro y seguimiento de la propagación de fisuras durante los ensayos de flexión*  *Nota. Elaboración propia*

Nota. Elaboración propia

3.6 Población y muestra

Población

La población de estudio fue 12 vigas de concreto armado de sección rectangular, con dimensiones de 2.10 m de longitud, 10 cm de ancho y 20 cm de peralte.

Muestra

Se realizaron 12 vigas de concreto armado. De este total, 09 especímenes fueron reforzadas con fibra de carbono, mientras que las 03 vigas restantes fueron consideradas como vigas patrón. A continuación, se detallan las características y especificaciones de las vigas de estudio, consideradas en la investigación:

Tabla 20 Características y especificaciones de las vigas de estudio

VIGA	CARGAS APLICADAS	RESISTENCIA F′C (KG/CM2)	ARMADURA DE ACERO	REFUERZO CON CFRP
V1	1 puntual	210	2 ϕ 3/8" + 10 estribos	Sin CFRP
V2	1 puntual	210	2 ϕ 3/8" + 8 estribos	Sin CFRP
V3	1 puntual	210	2 ϕ 3/8" + 8 estribos	Lámina longitudinal
V4	1 puntual	210	2 ϕ 3/8" + 8 estribos	Lámina + 2 U-Wraps
V5	1 puntual	175	2 ϕ 8 mm (Sin estribos)	Lámina + 2 U-Wraps
V6	1 puntual	175	2 ϕ 8 mm (Sin estribos)	Lámina + 4 U-Wraps
V7	2 puntuales	175	2 ϕ 8 mm (Sin estribos)	Lámina longitudinal
VIGA	**CARGAS APLICADAS**	**RESISTENCIA F′C (KG/CM2)**	**ARMADURA DE ACERO**	**REFUERZO CON CFRP**
V8	2 puntuales	175	2 ϕ 8 mm (Sin estribos)	Lámina longitudinal
V9	2 puntuales	175	2 ϕ 8 mm (Sin estribos)	Sin CFRP
V10	2 puntuales	175	2 ϕ 8 mm (Sin estribos)	Lámina longitudinal
V11	2 puntuales	175	2 ϕ 8 mm (Sin estribos)	Lámina + 4 U-Wraps
V12	2 puntuales	175	2 ϕ 8 mm (Sin estribos)	Lámina + 2 U-Wraps

Nota. Elaboración propia

3.7 Métodos de la investigación

La investigación se desarrolló mediante procedimientos experimentales orientados a evaluar el comportamiento estructural de vigas reforzadas con fibra de carbono bajo ensayo de flexión. Durante los ensayos se analizaron:

- Formación de grietas
- Deflexiones
- Tipo de falla
- Aparición de la delaminación
- Comportamiento estructural de las vigas

Los resultados obtenidos permitieron evaluar el mecanismo de delaminación en diferentes configuraciones estructurales.

3.7.1 Técnicas de recolección de datos

La técnica utilizada fue la observación directa experimental durante la ejecución de los ensayos de flexión.

- La recolección de datos se realizó mediante:
- Observación visual del comportamiento de las vigas
- Registro fotográfico
- Medición de deflexiones mediante diales
- Identificación de grietas y delaminación
- Registro de carga aplicada

Los datos fueron organizados en cuadros y registros experimentales para su posterior análisis.

3.7.2 Método de análisis de datos

La información obtenida durante los ensayos fue organizada en tablas, gráficos y cuadros comparativos para facilitar el análisis del comportamiento estructural de las vigas.

Se evaluó:

- Tipo de falla estructural
- Presencia de delaminación
- Ubicación del desprendimiento
- Influencia de la disposición del refuerzo
- Comportamiento observado durante el ensayo

Asimismo, se realizaron comparaciones entre el comportamiento experimental y el comportamiento teórico esperado.

3.7.3 Prueba de hipótesis

La hipótesis planteada fue evaluada mediante el análisis experimental de los resultados obtenidos en los ensayos de flexión.

Para ello, se comparó el comportamiento de las vigas considerando las distintas configuraciones de refuerzo estructural y la aparición de la falla por delaminación, permitiendo determinar la influencia de dichas configuraciones en el mecanismo de falla observado.

3.8 Esquema del método de investigación

El desarrollo de la investigación se estructuró en cinco fases metodológicas secuenciales:

Fase 1: Diseño analítico y caracterización de materiales: Se realizaron los ensayos físicos de agregados (granulometría, peso específico, absorción y humedad) según normas ASTM/NTP, el diseño de mezclas de concreto ($f'_c = 175\ kg/\text{cm}^2$ y $210 kg/\text{cm}^2$) y el dimensionamiento analítico de las vigas y del sistema CFRP bajo la normativa ACI 318, NTP E.060 y ACI 440.2R-17.

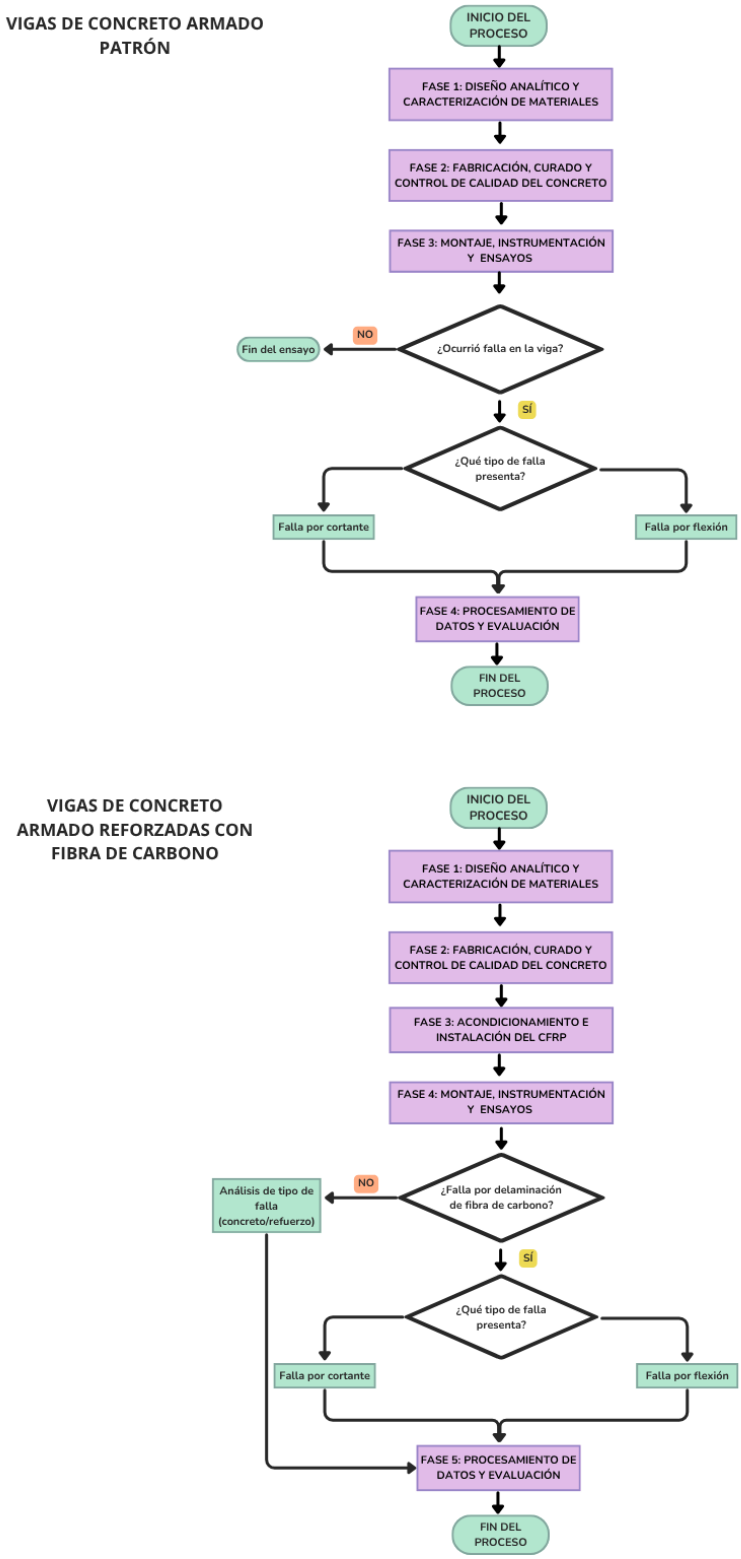
Fase 2: Fabricación, curado y control de calidad del concreto: Se habilitaron encofrados fenólicos, se armaron las canastillas de acero de refuerzo, se vaciaron y compactaron 12 vigas y probetas cilíndricas. Posteriormente al desencofrado, se realizó el curado y control de resistencia a compresión destructiva en prensa y no destructiva mediante ultrasonido.

Fase 3: Acondicionamiento e instalación del sistema CFRP: Se efectuó la preparación mecánica de la superficie (escarificado/lijado), trazado de zonas de pegado, preparación de la resina epóxica bicomponente Sikadur®-301, aplicación del tejido de fibra de carbono SikaWrap®-600C (longitudinal y anclajes U-Wrap), expulsión de vacíos de aire con rodillo quitaburbujas y sellado.

Fase 4: Montaje, instrumentación y ejecución de ensayos de flexión: Se cuadricularon las caras laterales para monitoreo de fisuración, se montaron los especímenes en el marco de reacción de acero, instalando diales electrónicos conectados al sistema de adquisición Arduino. Se aplicó carga monotónica progresiva hasta la rotura (esquemas de 1 y 2 puntos de carga).

Fase 5: Procesamiento de datos y evaluación analítica: Se obtuvieron las curvas de carga vs. deflexión, se identificaron los modos de colapso y etapas del desprendimiento (delaminación), contrastando los resultados de laboratorio con las predicciones del modelo teórico de ACI 440.2R-17.

Figura 92 Diagramas de flujo: Vigas de Concreto Armado Patrón y Vigas de Concreto Armado Reforzadas con Fibra de Carbono



Nota. Elaboración propia

CAPÍTULO IV

4. Resultados

4.1. Resultados del ensayo de flexión

Los resultados se obtuvieron a partir de los ensayos de flexión realizados a las vigas, las cuales fueron evaluadas bajo diferentes condiciones. En todos los casos, la carga se aplicó progresivamente mediante una gata hidráulica. Asimismo, las deformaciones máximas se registraron mediante diales digitales.

4.1.1. Carga máxima alcanzada

Tabla 21 Resultados experimentales de carga máxima de vigas sometidas a 01 carga puntual

VIGAS SOMETIDAS A 01 CARGA PUNTUAL					
NOMEN.	**CANT. ESTRIBOS**	**REFORZADO C/FIBRA DE CARBONO**	**TÉCNICA DE COLOCACIÓN**	**PRESIÓN (PSI)**	**CARGA DE ROTURA ENSAYO (TON)**
V1	10	NO	-	1080.00	**1.93**
V2	8	NO	-	1100.00	**1.97**
V3	8	SI	LAMINADO LONGITUDINAL	1380.00	**2.47**
V4	8	SI	LAMINADO LONGITUDINAL+2U	1460.00	**2.61**
V5	0	SI	LAMINADO LONGITUDINAL+2U	1220.00	**2.18**
V6	0	SI	LAMINADO LONGITUDINAL+4U	1250.00	**2.24**

Nota. Elaboración propia

Tabla 22 Resultados experimentales de carga máxima de vigas sometidas a 02 cargas puntuales

VIGAS SOMETIDAS A 02 CARGAS PUNTUALES					
NOMEN.	**CANT. ESTRIBOS**	**REFORZADO C/FIBRA DE CARBONO**	**TÉCNICA DE COLOCACIÓN**	**PRESIÓN (PSI)**	**CARGA DE ROTURA ENSAYO (TON)**
V7	0	SI	LAMINADO LONGITUDINAL	1400.00	**2.51**
V8	0	SI	LAMINADO LONGITUDINAL	1420.00	**2.54**
V9	0	NO	-	1300.00	**2.33**
V10	0	SI	LAMINADO LONGITUDINAL	1400.00	**2.51**
V11	0	SI	LAMINADO LONGITUDINAL+4U	1600.00	**2.87**
V12	0	SI	LAMINADO LONGITUDINAL+2U	1290.00	**2.31**

Nota. Elaboración propia

4.1.2. Deflexión máxima en el centro de luz de las vigas

Tabla 23 Resultados experimentales de deflexión máxima en el centro de luz de las vigas ensayadas

NOMEN.	CANT. ESTRIBOS	TÉCNICA DE COLOCACIÓN	CARGA (TON)	DEFLEXIÓN MÁXIMA EN EL CENTRO DE LUZ (CM)
V1	10	-	1.93	2.50
V2	8	-	1.97	2.70
V3	8	LAMINADO LONGITUDINAL	2.47	2.30
V4	8	LAMINADO LONGITUDINAL+2U	2.61	2.60
V5		LAMINADO LONGITUDINAL +2U	2.18	1.65
V6		LAMINADO LONGITUDINAL +4U	2.24	1.79
V7		LAMINADO LONGITUDINAL	2.51	1.36
V8		LAMINADO LONGITUDINAL	2.54	1.30
V9		-	2.33	2.64
V10		LAMINADO LONGITUDINAL	2.51	1.38
V11		LAMINADO LONGITUDINAL +4U	2.87	2.07
V12		LAMINADO LONGITUDINAL +2U	2.31	1.14

Nota. Elaboración propia

4.1.3. Formación y propagación de grietas

Las principales manifestaciones del comportamiento estructural bajo cargas considerables, fueron la aparición de fisuras y grietas en las vigas ensayadas. En 04 vigas presentaron fisuras predominantes en la zona central y de tracción de la viga, asociadas a un comportamiento típico de falla por flexión; donde se propagaron progresivamente hacia el eje neutro conforme se aumentaba la carga aplicada, finalmente se observaba una grieta principal ubicada en el medio que ascendía hasta producir la falla de la viga ensayada.

Por otro lado, las 08 vigas restantes, presentaron una falla por cortante. En la mayoría de ellas, aparecieron fisuras inclinadas aproximadamente a 45°, las cuales se propagaron hasta la falla del elemento estructural. En algunos casos, la falla ocurrió de manera abrupta, sin evidenciar fisuras notables, lo que demostró una falla frágil y una pérdida de capacidad estructural.

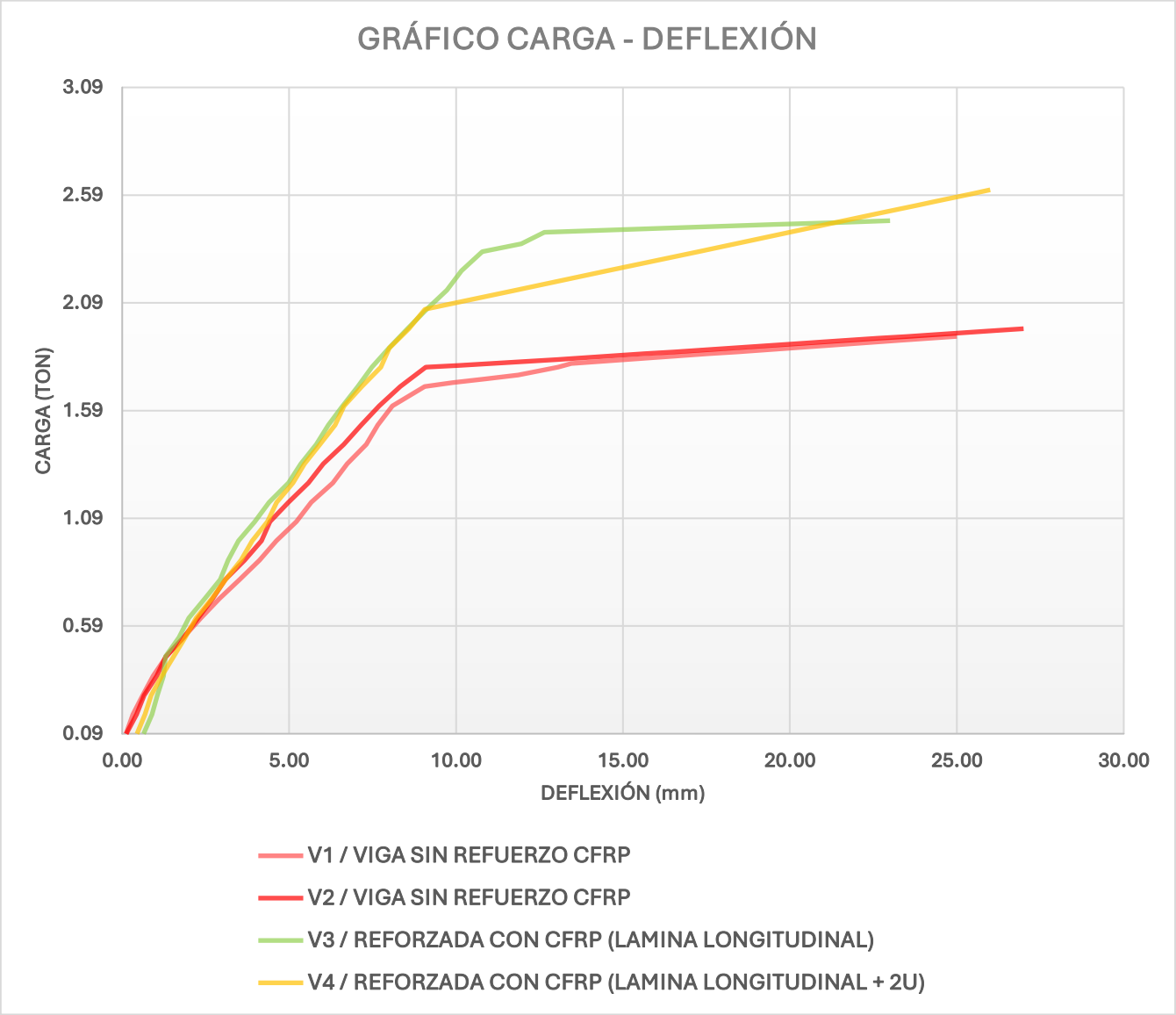
Curvas carga – deflexión

En respuesta de las vigas ensayadas en términos de carga aplicada-deflexión, se ve que, al alcanzarse una determinada carga, la carga externa continúa en aumento pese al incremento de la deflexión. De acuerdo con (Ottazi Pasino, 2011), este comportamiento se debe al endurecimiento del acero de refuerzo después de alcanzar la fluencia, lo que permite que el elemento estructural continúe soportando mayores cargas antes del colapso.

En el gráfico, se presenta el comportamiento del grupo de especímenes ensayados que fallaron por flexión, con el objetivo de comparar el desempeño de las vigas sin reforzamiento CFRP con las que sí estén reforzadas. Como se observa, las vigas reforzadas con fibra de carbono alcanzan mayores valores de carga y presentan un mejor comportamiento estructural.

Nota. Elaboración propia

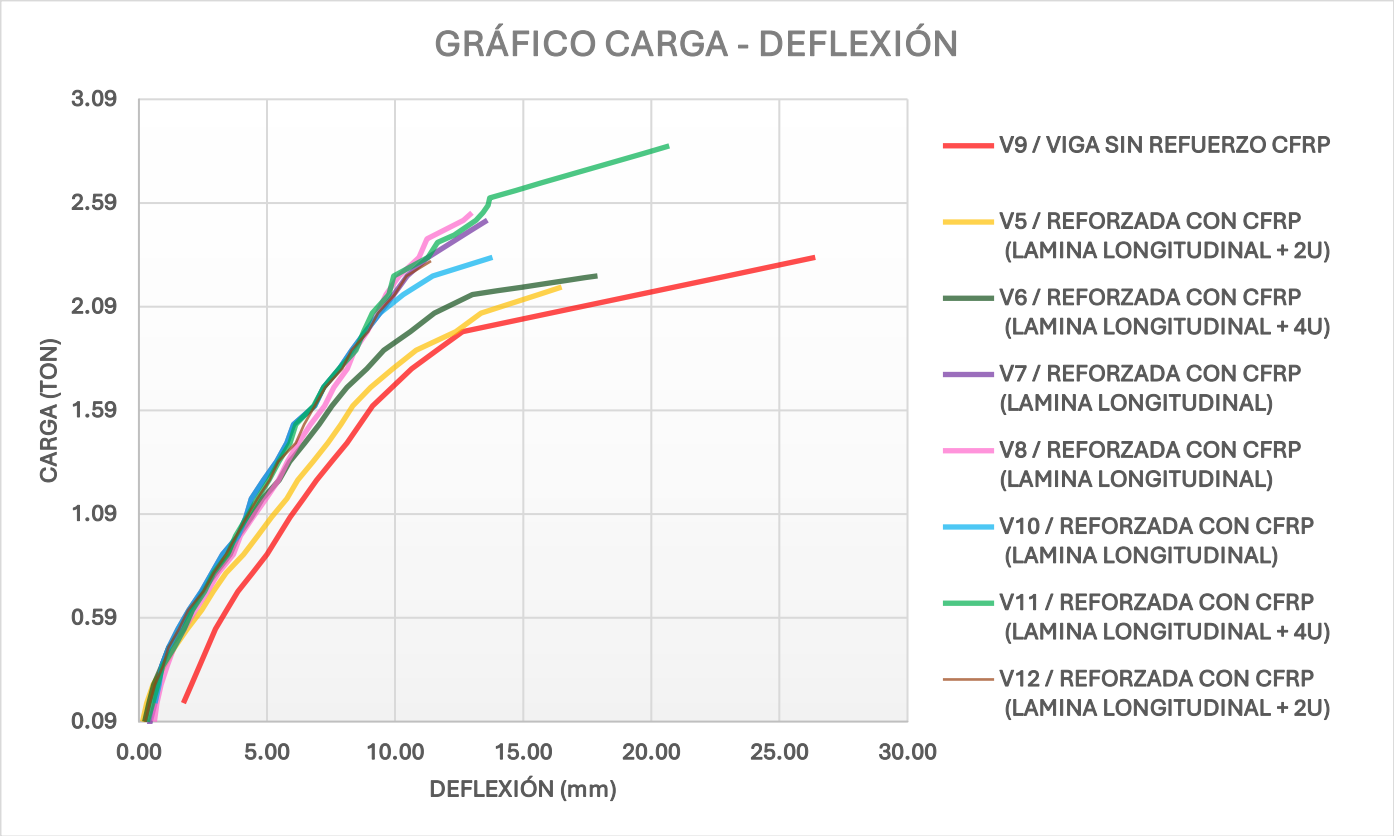
Figura 93 Carga vs deflexión de vigas que fallaron por flexión



Nota. Elaboración propia

En el grupo de las vigas que fallaron por cortante, como ya se mencionó, en la figura, se observa que las vigas reforzadas presentan una mayor capacidad resistente y un buen comportamiento estructural. Asimismo, las vigas que tienen anclajes tipo U, alcanzan mayores valores de carga antes de que falle, y así se retrase la delaminación. Por otro lado, se debe considerar la influencia que tienen los estribos, porque las vigas que cuentan con ellas, presentan una mayor resistencia frente al cortante.

Figura 94 Carga vs deflexión de vigas que fallaron por cortante



Nota. Elaboración propia

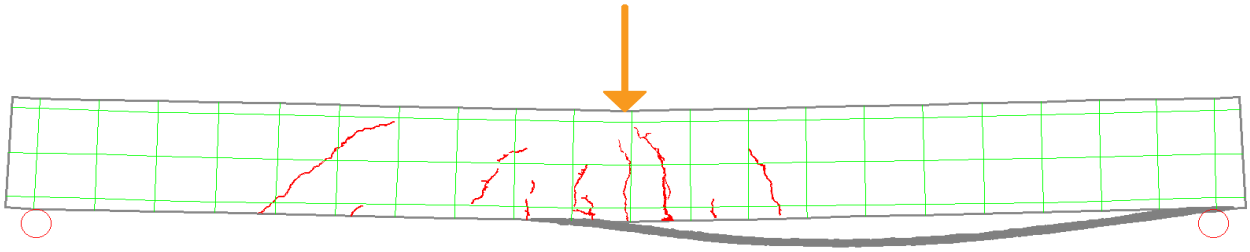
4.2. Comportamiento estructural de las vigas reforzadas

4.2.1. Comportamiento del laminado longitudinal CFRP

La principal influencia del laminado longitudinal de CFRP, es el incremento de carga ante esfuerzos de flexión, lo que se permite que los elementos estructurales, en este caso las vigas superen su resistencia teórica nominal. Por otro lado, se observó que las vigas reforzadas con fibra de carbono en la zona de tracción presentan un aumento en su rigidez estructural, es por ello que se redujeron las deformaciones bajo carga a comparación de las vigas que estaban sin refuerzo CFRP. La eficacia de este sistema de reforzamiento está condicionada por una adecuada adherencia entre el adhesivo epóxico y la superficie del concreto. En la viga V3 sometida a una carga puntual

central, se evidenció que el refuerzo cumplió con su función estructural, incrementando la capacidad resistente de la viga.

Figura 95 Comportamiento estructural y formación de fisuras en la viga V3 sometida a carga puntual.



Nota. Elaboración propia

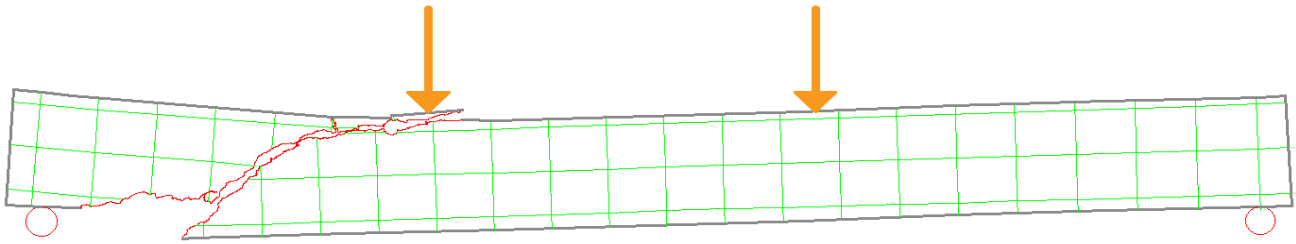
Figura 96 Manifestación del modo de falla por delaminación de la fibra de carbono en la zona de tracción de la viga V3



Nota. Elaboración propia

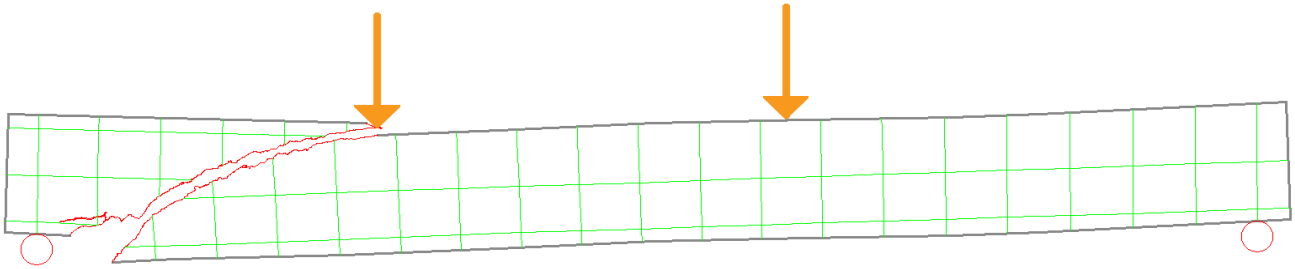
Sin embargo, en las vigas V7, V8 y V10, sometidas a 02 cargas puntuales, la aparición de fisuras diagonales por cortante alteró la transferencia de esfuerzos, es por ello que la falla por delaminación ocurrió prematuramente ya que el esfuerzo por cortante superó la capacidad de la sección antes que la fibra de carbono pudiera trabajar correctamente.

Figura 97 Comportamiento estructural y formación de fisuras en la viga V7 sometida a dos cargas puntuales



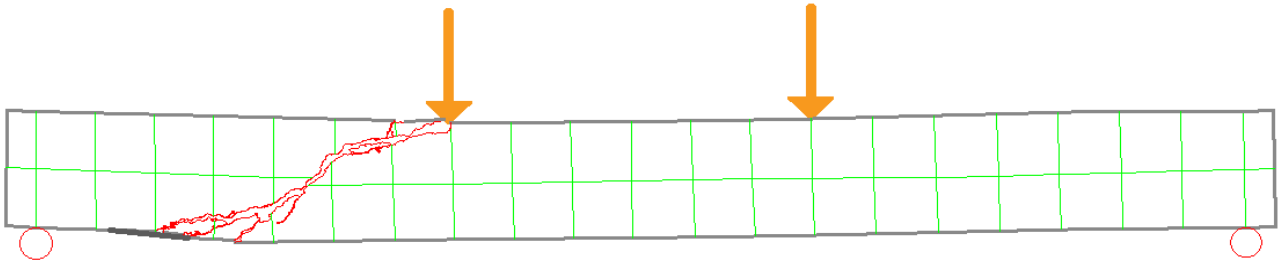
Nota. Elaboración propia

Figura 98 Comportamiento estructural y formación de fisuras en la viga V8 sometida a dos cargas puntuales



Nota. Elaboración propia

Figura 99 Comportamiento estructural y formación de fisuras en la viga V10 sometida a dos cargas puntuales



Nota. Elaboración propia

Figura 100 Fallas estructurales de vigas V7, V8 y V10



Nota. Elaboración propia

4.2.2. Comportamiento de vigas con U-Wrap

Las vigas reforzadas con laminado longitudinal y la técnica U-Wrap, presentaron un comportamiento más favorable en comparación con las vigas reforzadas únicamente con láminas longitudinales de fibra de carbono. En conjunto, las vigas V4, V5, V11 y V12 tuvieron una mejor adherencia entre la fibra de carbono y el concreto, esto gracias a la incorporación de este tipo de anclaje tipo U, es así que se retrasa la aparición de la falla por delaminación.

En las vigas sometidas a 01 carga puntual (V4, V5 y V6), el incremento del número de anclajes contribuyó al aumento de la carga de rotura experimental, es decir que los resultados obtenidos evidenciaron que la capacidad resistente alcanzada superó los valores teóricos

esperados, lo que se demuestra que el uso de estos anclajes favoreció al desempeño estructural durante el ensayo.

Por otro lado, las vigas sometidas a 02 cargas puntuales (V11 y V12), los anclajes tipo U permitió que sus comportamientos sean más estables, ya que reduce significativamente la aparición de una delaminación prematura. No se observó desprendimiento de la fibra de carbono en la viga V11. La presencia de dos anclajes en cada extremo fue necesaria para evitar la falla por delaminación. En cambio, la viga V12 presentó una falla que está asociada al arrancamiento del concreto antes del desarrollo completo del reforzamiento.

Figura 101 Falla estructural de viga V1.



Nota. Elaboración propia

4.3. Comportamiento del mecanismo de la delaminación

4.3.1. Etapas de aparición de la delaminación

Durante el ensayo de flexión, las vigas estuvieron sometidas a cargas puntuales crecientes hasta alcanzar su falla última. De acuerdo al comportamiento observado de todas las vigas reforzadas con CFRP, el mecanismo de la falla por delaminación se desarrolló principalmente en las etapas 3 y 4 del ensayo.

Tabla 24 Etapas del comportamiento de la viga donde se muestra la falla por delaminación

NOMEN.	ESTRIBOS	DISEÑO ARMADURA DE ACERO	DISPOSICIÓN DEL REFUERZO CFRP	ANCLAJES U-WRAP	ETAPA
V3	8	Acero positivo: 2 Φ 3/8" & Acero negativo :2 Φ 8 mm	LAMINADO LONGITUDINAL	-	Etapa 3
V4			LAMINADO LONGITUDINAL+2U	2	
V5	-	Acero positivo :2 Φ 8 mm	LAMINADO LONGITUDINAL +2U	2	Etapa 4
V6			LAMINADO LONGITUDINAL +4U	4	
V7			LAMINADO LONGITUDINAL	-	
V8			LAMINADO LONGITUDINAL	-	
V10			LAMINADO LONGITUDINAL	-	
V11			LAMINADO LONGITUDINAL +4U	4	No Presenta
V12			LAMINADO LONGITUDINAL +2U	2	Etapa 4

Nota. Elaboración propia

4.3.2. Relación entre la delaminación y la falla estructural

Durante los ensayos experimentales de las vigas reforzadas únicamente con el laminado longitudinal de la fibra de carbono, la falla por delaminación se presentó de manera prematura en los extremos hacia el centro, coincidiendo con la aparición y propagación de las grietas de flexión. En el caso de las vigas reforzadas con laminado longitudinal y anclajes tipo U, la falla por delaminación fue retrasada. En la mayoría de estas vigas fallaron por cortante ya que no contaban con estribos, es así que aparecieron fisuras y grietas inclinada. Asimismo, antes de que se produzca el colapso de la viga, la fibra de carbono contribuyó en mantener parcialmente la integridad estructural del elemento luego de haber iniciado la falla.

4.4. Comparación experimental y teórica

Comparación de cargas de rotura

Tabla 25 Comparación de las cargas de rotura experimentales y teóricas de las vigas ensayadas sometidas a una y dos cargas puntuales

COMPARACIÓN DE CARGAS DE ROTURA

VIGAS SOMETIDAS A 01 CARGA PUNTUAL

Nomen.	*Estribos*	*Fibra de carbono*	*Técnica de colocación*	*F'c diseño (kgf/cm2)*	*F'c ultrasonido (kgf/cm2)*	*Momento Nominal (ton/m)*	*Presión (PSI)*	*Carga de Rotura ensayo (Ton)*	*Carga de Rotura Teórica*		Variación (%) (Ensayo vs Teórico)	
									SIN CFRP	**CON CFRP**	**SIN CFRP**	**CON CFRP**
V1	10	NO	-	**210**	**169**	**0.903**	1080	**1.93**	1.76	-	10%	-
V2	8	NO	-	**210**	**160**	**0.895**	1100	**1.97**	1.74	-	13%	-
V3	8	SI	LAMINADO LONGITUDINAL	**210**	**150**	**0.886**	1380	**2.47**	*1.72	1.77	*43%	39%
V4	8	SI	LAMINADO LONGITUDINAL +2U	**210**	**143**	**0.879**	1460	**2.61**	*1.71	1.92	*53%	36%
V5	0	SI	LAMINADO LONGITUDINAL +2U	**175**	**164**	**0.691**	1220	**2.18**	*1.33	2.04	*64%	7%
V6	0	SI	LAMINADO LONGITUDINAL +4U	**175**	**151**	**0.685**	1250	**2.24**	*1.32	1.97	*69%	14%

VIGAS SOMETIDAS A 02 CARGAS PUNTUALES

Nomen.	*Estribos*	*Fibra de carbono*	*Técnica de colocación*	*F'c diseño (kgf/cm2)*	*F'c ultrasonido (kgf/cm2)*	*Momento Nominal (ton/m)*	*Presión (PSI)*	*Carga de Rotura ensayo (Ton)*	*Carga por punto (Ton)*	*Carga de Rotura Teórica*		Variación (%) (Ensayo vs Teórico)	
										SIN CFRP	**CON CFRP**	**SIN CFRP**	**CON CFRP**
V7	0	SI	LAMINADO LONGITUDINAL	**175**	**154**	**0.687**	1400	**2.51**	**1.25**	¨*1.89	2.84	*32%	-12%
V8	0	SI	LAMINADO LONGITUDINAL	**175**	**161**	**0.69**	1420	**2.54**	**1.27**	*1.9	2.89	*34%	-12%
V9	0	NO	-	**175**	**158**	**0.688**	1300	**2.33**	**1.16**	1.9	-	23%	-
V10	0	SI	LAMINADO LONGITUDINAL	**175**	**159**	**0.689**	1400	**2.51**	**1.25**	*1.9	2.88	*32%	-13%
V11	0	SI	LAMINADO LONGITUDINAL +4U	**175**	**152**	**0.686**	1600	**2.87**	**1.43**	*1.89	2.82	*52%	2%
V12	0	SI	LAMINADO LONGITUDINAL +2U	**175**	**155**	**0.687**	1290	**2.31**	**1.16**	*1.89	2.84	*22%	-19%

Nota. Elaboración propia

*Nota: *Valores referenciales que corresponden a estimaciones comparativas entre los distintos escenarios evaluados*

4.4.2. Diferencias entre el comportamiento teórico y experimental

VIGA V1: Es una viga patrón, sin reforzamiento con fibra de carbono, sometida a 01 carga puntual en el centro del elemento estructural, fue diseñada teóricamente para que tenga un comportamiento dominante y presente una falla por flexión pura, ya que contiene 10 estribos, lo que proporciona una capacidad que resiste a esfuerzos cortantes. Teóricamente se estimó una carga de rotura de 1.76 Ton, se esperaba la aparición de fisuras verticales en la zona media de la viga durante el proceso del ensayo. Durante el ensayo experimental, el comportamiento que tuvo esta viga fue acorde a lo esperado teóricamente, se presentaron fisuras que se propagaban progresivamente hacia el eje neutro conforme se aumentaba la carga aplicada. Finalmente, se produjo una fractura en el medio de la viga, zona donde se concentra el mayor momento flector. A partir de dicho comportamiento, se concluyó que el acero de refuerzo longitudinal (3/8") ya había alcanzado su fluencia, evidenciando un comportamiento dúctil. La viga alcanzó una carga de rotura experimental de 1.93 Ton, valor que supera al teórico (1.76 Ton) en aproximadamente 9.66%, lo que evidencia un desempeño estructural ligeramente superior al previsto teóricamente.

VIGA V2: Es la segunda viga patrón sin reforzamiento con fibra de carbono, sometida a 01 carga puntual en el centro del elemento estructural, en este caso contiene 08 estribos. Fue diseñada teóricamente para que falle por flexión debido a la presencia de estribos. Teóricamente se estimó una carga de rotura de 1.74 Ton. Durante el ensayo de dicha viga, se presentaron fisuras en la zona central del claro de la viga. Previo a la culminación del ensayo, aparecieron dos fracturas en la zona central, determinándose que bajo una carga de 1.97 Ton, el acero alcanzó la fluencia y se observó un comportamiento dúctil. La viga mostró un desempeño estructural de 13.22% respecto al valor esperado de carga de rotura.

VIGA V3: Viga reforzada longitudinalmente con fibra de carbono, contiene 08 estribos y fue sometida a 01 carga puntual en el medio del elemento estructural. Al tener estribos, se esperaba un comportamiento dúctil y falla por flexión. En teoría se estimó una carga de rotura de 1.72 Ton para la viga sin refuerzo, sin embargo, al tener reforzamiento de fibra de carbono se proyectó un incremento de hasta aproximadamente 1.77 Ton, pero al considerar estribos se esperaba una resistencia mayor. En el ensayo experimental, se evidenció un comportamiento dúctil, presentando fisuras en la zona central y dos fracturas localizadas en la misma zona. Debido al refuerzo de la fibra de carbono, se pudo observar el modo de falla de estudio, alcanzándose una carga de 2.47 Ton, y así se evidencia un incremento de la capacidad resistente respecto a los valores teóricos.

VIGA V4: Es una viga con 08 estribos, sometida a 01 carga puntual, reforzada longitudinalmente con un anclaje tipo U en cada extremo de la viga, sujetando la fibra de carbono en la zona de tracción, al tener este tipo de anclajes, se esperaba un retraso del modo de falla por delaminación y que su deflexión en el centro de la luz, sea menor a comparación de las demás vigas sin anclajes, ya que la fibra de carbono incrementa la rigidez del elemento estructural. Para el caso sin anclajes, se estimó una carga de rotura de 1.71 Ton. Esta viga presenta un comportamiento similar que las vigas V2 y V3, es decir que falla por flexión, evidenciando fisuras y dos fracturas visibles en la zona central de la luz. A comparación de estas vigas, la delaminación de la fibra de carbono comienza a una carga de 2.61 Ton, valor mayor al registrado en las vigas previamente descritas, lo que indica que mejora la capacidad del sistema CFRP y retrasa el desprendimiento del refuerzo.

VIGA V5: Viga sin estribos, con acero longitudinal de (8mm), reforzada longitudinalmente con fibra de carbono y un anclaje en cada extremo de la viga sometida a 01 carga puntual en el medio. Debido a la ausencia de estribos, se esperaba una falla por cortante, ya que no hay refuerzo

transversal que resista a esfuerzos cortantes, para dicha viga sin anclajes, se estimó una carga de rotura de 2.04 Ton. En el ensayo se observa una fisura diagonal que parte en la zona de tracción de la viga hacia el punto de aplicación de la carga, esta se va ensanchando hasta convertirse en una grieta, esto representa un comportamiento frágil y asociado a la falla por cortante. En dicha zona se evidencia una delaminación localizada de la fibra de carbono, donde se ve la pérdida de adherencia entre el concreto-CFRP, como consecuencia de la concentración de los esfuerzos en la zona fisurada. A una carga de 2.18 Ton se observa dicho modo de falla, en comparación con las demás vigas que cuentan con estribos, la carga resulta menor. Sin embargo, la diferencia no es tan significativa, ya que los anclajes contribuyen a mejorar la capacidad del elemento estructural.

VIGA V6: Al igual que la viga V5, esta viga presenta un comportamiento similar, con la diferencia de contar con dos anclajes tipo U en cada extremo, al no tener estribos, se esperaba una falla por cortante. También se preveía una menor deflexión respecto a vigas reforzadas con un anclaje en cada extremo o sin ellos, debido al incremento de rigidez aportado por el CFRP. Por otro lado, la presencia de doble anclaje tenía como objetivo retrasar la delaminación. Se esperaba una carga de rotura de 1.97 Ton sin anclajes. En laboratorio, conforme se iba aumentando la carga, aparecieron fisuras en el medio y una fisura pronunciada en la zona de tracción localizada en un anclaje que se fue propagando progresivamente hacia el punto de aplicación de la carga, hasta llegar a una grieta notable. En esta etapa se observó una delaminación localizada a los 2.24 Ton, evidenciándose que los anclajes retrasaron la delaminación limitando su desarrollo en esa zona.

VIGA V7: Es una viga reforzada longitudinalmente con fibra de carbono, no contiene estribos y fue sometida a dos cargas puntuales. Se consideraba que presente fisuras diagonales debido a la ausencia de estribos y termine fallando por cortante. Al contar con fibra de carbono en la zona de tracción, se esperaba una menor deflexión debido al aumento de rigidez aportado por

este refuerzo. Teóricamente, se estimó una carga de rotura de 2.84 Ton; sin embargo, en laboratorio, esta viga falló a 2.51 Ton, debido a que el elemento presentó una falla abrupta, sin mostrar fisuras previas antes del colapso, lo que refleja un comportamiento frágil. En la zona donde hubo la grieta de cortante, se evidenció el despegue de la fibra de carbono, producto de la pérdida de adherencia entre el concreto-CFRP. La fibra de carbono no llegó a trabajar en su totalidad, razón por la cual la viga alcanzó una carga de falla menor al estimado.

VIGA V8: Al igual que la viga V7, esta presenta las mismas características estructurales, por lo que se preveía un comportamiento igual, es decir, una falla gobernada por cortante. Se estimó un valor de 2.89 Ton como carga de rotura teórica. En el ensayo experimental, presentó un comportamiento similar a la viga V7, es decir que se evidenció una falla por cortante de manera abrupta alcanzando una carga de rotura de 2.54 Ton, esta vez con fisuras apenas visibles antes del colapso de la viga. La viga falló a un valor menor al teórico tal como la V7.

VIGA V9: Es una viga patrón, sin reforzamiento con fibra de carbono, sometida a 02 cargas puntuales, debido a la ausencia de refuerzo transversal, se preveía una falla por cortante, además al no tener reforzamiento, se estima que fallará con un valor de carga de rotura aproximadamente de 1.90 Ton, con una deflexión significativa mayor en el medio en comparación con las vigas reforzadas con fibra de carbono. Durante el ensayo, a medida que se aplicaban las cargas, se observaron fisuras en la zona central. Además, se observó una fisura diagonal importante que se originó en la zona de tracción que se iba extendiendo hacia uno de los apoyos de una de las cargas aplicadas. Con el aumento de la carga, esta fisuración se intensificó hasta llegar que la viga colapse de manera súbita, registrándose un comportamiento frágil. La viga alcanzó 2.33 Ton.

VIGA V10: Es una viga reforzada longitudinalmente con fibra de carbono, no contiene estribos y fue sometida a dos cargas puntuales, se esperó el mismo comportamiento de las vigas

V7 y V8, ya que tienen la misma configuración estructural. Se tuvo previsto que falle a una carga de 2.88 Ton. Sin embargo, en el ensayo experimental falló a 2.51 Ton. Esta viga colapsó de manera repentina, sin presentar fisuras previas; la fibra de carbono no alcanzó su capacidad teórica, se registró una deflexión baja en el punto medio antes del colapso.

VIGA V11: Es una viga reforzada longitudinalmente con fibra de carbono y con dos anclajes en cada extremo, sin estribos y sometida a 02 cargas puntuales. Al no tener estribos, se esperaba una falla cortante, y que se retrase la delaminación de la fibra de carbono. Se esperaba que fallara a 2.82 Ton sin considerar los anclajes. En laboratorio, fue una falla por cortante inesperada, pero antes de ello se mostró dos fisuras diagonales partiendo de la zona de tracción hacia los puntos de aplicación de carga. Solo en uno de los extremos se intensificó una grieta y colapsó con 2.87 Ton. La fibra no trabajó completamente porque el elemento estructural colapsó antes de que se produjera algún mecanismo de delaminación. En este caso, no se observó delaminación de la fibra de carbono durante el ensayo experimental.

VIGA V12: Al igual que la viga V11, esta presenta las mismas características estructurales, con la diferencia de que tiene un anclaje en cada extremo por lo que se preveía un comportamiento gobernado por cortante. Se estimó un valor de 2.84 Ton como carga de rotura teórica. En el ensayo experimental, presentó una falla por cortante abrupta, alcanzando una carga de rotura de 2.31 Ton, sin fisuras visibles en la zona central antes del colapso de la viga, pero sí se observó una fisura diagonal partiendo de la zona de tracción hacia un punto de apoyo. De igual forma, la fibra de carbono no llegó a trabajar como se esperaba, por lo que la viga falló a un valor menor al teórico, no se evidenció delaminación del refuerzo, pero si se pudo ver la fluencia del acero y el arrancamiento del recubrimiento del concreto en esa zona de falla.

CONCLUSIONES

- Se determinó que la disposición del refuerzo estructural tuvo una influencia significativa en la aparición de la falla por delaminación del CFRP. Las vigas que contaban con estribos presentaron una mejor distribución de esfuerzos y un mayor control de la propagación de fisuras, retrasando el desprendimiento del refuerzo de fibra de carbono. Por el contrario, las vigas sin refuerzo transversal desarrollaron fisuras diagonales asociadas a esfuerzos cortantes, las cuales favorecieron una delaminación más temprana y limitaron el aprovechamiento del sistema de reforzamiento.

- Se observó que la delaminación del CFRP se manifestó principalmente en las dos etapas finales del ensayo experimental, cuando las fisuras existentes se propagaron progresivamente, incrementando su abertura y extendiéndose hacia el eje neutro de la sección. En esta fase, el acero de refuerzo alcanzó su esfuerzo de fluencia, las deflexiones aumentaron considerablemente y el concreto se aproximó a su estado de falla por aplastamiento. Bajo estas condiciones, la transferencia de esfuerzos entre el concreto y el CFRP alcanzó niveles críticos que favorecieron el desprendimiento del refuerzo adherido.

- En el primer grupo de vigas con estribos, tomando como referencia la viga patrón V2 (sin reforzamiento), la viga V3 reforzada longitudinalmente con fibra de carbono presentó un incremento de capacidad resistente del 25.5 %, mientras que la viga V4, reforzada longitudinalmente y complementada con un anclaje en cada extremo, alcanzó un incremento del 32.7 %. Por otro lado, en el grupo de vigas con ausencia de estribos, tomando como referencia la viga patrón V9**,** las vigas laminadas longitudinalmente con CFRP (V7, V8 y V10) incrementaron su capacidad resistente en 7.7 %, 9.2 % y 7.7 %, respectivamente, mientras que la viga V11, laminada longitudinalmente con CFRP y cuatro anclajes en U, presentó el mejor

comportamiento, alcanzando un incremento del 23.1 % y sin presentar la falla por delaminación. A diferencia de las vigas V5, V6 y V12 que registraron reducciones de 6.2 %, 3.8 % y 0.8 %, respectivamente, respecto a la viga patrón V9. Las vigas reforzadas mostraron una reducción de las deflexiones y una menor propagación de fisuras. Este comportamiento evidenció un aumento de rigidez estructural y un mejor control del agrietamiento. Sin embargo, el incremento de resistencia estuvo condicionado por la aparición de la delaminación, la cual limitó el aprovechamiento completo de la capacidad resistente del CFRP. Asimismo, el comportamiento estructural observado dependió de la configuración de refuerzo existente, pudiendo desarrollarse mecanismos de falla por flexión o por cortante antes de alcanzar la capacidad última del sistema reforzado.

- La incorporación de laminados longitudinales de fibra de carbono permitió aumentar la capacidad resistente de las vigas y mejorar el control de la fisuración bajo cargas crecientes. No obstante, en varios especímenes la delaminación ocurrió antes de que el CFRP alcanzara su capacidad máxima resistente, evidenciando que la adherencia entre el concreto y la fibra constituye un aspecto determinante para la eficiencia del reforzamiento y para el desarrollo del mecanismo de falla predominante en la viga. El empleo de anclajes tipo U-Wrap tuvo un efecto significativo en el control de la delaminación del CFRP, al reducir el desprendimiento prematuro del laminado. Experimentalmente se verificó que la viga V11, equipada con cuatro anclajes tipo U-Wrap (dos por cada extremo), presentó un mejor desempeño en comparación con las vigas que tenían solo un anclaje en cada lado, ya que no se evidenció delaminación de la fibra de carbono durante el ensayo. La viga V11 alcanzó una carga última de 2.87 Ton, este valor fue superior en 23.7%,21.9% y 19.4% respecto a las vigas V5, V6 y V12 (con anclajes

en U), respectivamente. La mejora observada se asocia al uso de cuatro anclajes en tipo U, es decir que es más efectivo y permitió una mayor capacidad resistente antes de su falla.

- Se identificó que el modo de falla predominante fue la falla por cortante, observada en 8 de las 12 vigas ensayadas. Este comportamiento estuvo asociado a la formación de fisuras diagonales y a la concentración de esfuerzos cortantes en zonas críticas del elemento estructural. En varios casos, esta falla se desarrolló de forma frágil y repentina, presentando escasa deformación previa antes del colapso. En algunos casos, las fisuras diagonales permitieron anticipar este tipo de falla, ya que aparecieron progresivamente. Las vigas que presentaron esta falla por cortante correspondieron principalmente a aquellas que no contaban con estribos, evidenciando la importancia del refuerzo transversal en el control de los esfuerzos cortantes. Por otro lado, las vigas que desarrollaron un comportamiento dominado por flexión presentaron mayores deformaciones antes de la falla y mecanismos de delaminación menos abruptos.

- Se determinó que el tipo de carga aplicada influyó directamente en el mecanismo de falla desarrollado por las vigas. De las *seis* vigas sometidas a una carga puntual central, *cuatro* presentaron un comportamiento predominantemente asociado a la flexión, mostrando una tendencia experimental coherente con el comportamiento teórico esperado. Por otro lado, de las *seis* vigas sometidas a dos cargas puntuales, *todas* desarrollaron principalmente fallas por cortante incluyendo dos vigas que fueron sometidas a una carga puntual que, debido a su configuración de refuerzo y distribución de esfuerzos, también presentaron una falla por cortante. Este comportamiento es asociado a la configuración estructural de los especímenes, particularmente a la ausencia de estribos. Esta condición favoreció la aparición de fisuras diagonales y la ocurrencia de procesos prematuros de delaminación en las vigas reforzadas únicamente con laminado longitudinal de CFRP. Como consecuencia, en varios especímenes

el refuerzo no logró desarrollar completamente su capacidad resistente, limitando el aprovechamiento efectivo del sistema de reforzamiento previsto teóricamente. Los resultados obtenidos evidencian que la distribución de cargas y la presencia de refuerzo transversal son factores determinantes en la definición del modo de falla predominante y, por consiguiente, en el desarrollo del mecanismo de delaminación.

- Los principales factores identificados que influyeron en la aparición de la delaminación fueron la disposición del refuerzo de acero estructural, la presencia y evolución de las fisuras, las condiciones de adherencia entre el concreto y el CFRP y la ausencia o insuficiencia de anclajes transversales tipo U-Wrap. La interacción de estos factores determinó la ubicación, el momento de aparición, la propagación y la severidad del proceso de delaminación observado experimentalmente.

- Los resultados experimentales evidenciaron que el mecanismo de delaminación en vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono se desarrolla como consecuencia de la interacción entre la configuración del refuerzo interno, la adherencia concreto–CFRP y el modo de falla predominante de la viga. Cuando predominaron los esfuerzos cortantes, la delaminación se presentó de forma más temprana, generalmente asociada a fisuras diagonales y localizada principalmente en los extremos de la viga, limitando el aprovechamiento del sistema de reforzamiento. En cambio, cuando predominó la flexión, el CFRP permaneció adherido durante una mayor etapa del ensayo, permitiendo un aprovechamiento más eficiente de su capacidad resistente antes del desprendimiento.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda que las vigas cuenten con una cantidad adecuada de estribos, ya que estos ayudan a distribuir mejor los esfuerzos y a controlar la aparición y crecimiento de fisuras. Esto permite que la fibra de carbono trabaje de manera eficiente y permanezca adherida al sustrato de concreto por más tiempo.
- Se sugiere controlar el crecimiento de las fisuras en las vigas reforzadas con CFRP ya que cuando estas se vuelven más grandes, la fibra de carbono se desprende del concreto y pierde efectividad.
- Se recomienda usar anclajes tipo U-Wrap para mitigar la delaminación de la fibra de carbono especialmente en vigas con deficiencias de refuerzo transversal. Además de evaluar el tipo de falla que puede presentar la viga para poder garantizar que el reforzamiento sea efectivo.
- Se recomienda considerar tanto el número de cargas aplicadas como la presencia de estribos al diseñar el reforzamiento con CFRP, ya que estos factores influyen directamente en el modo de falla de la viga. En vigas con poca o ninguna resistencia al cortante, es conveniente reforzar previamente el elemento estructural para evitar fisuras diagonales y desprendimientos prematuros del CFRP.
- Se sugiere ensayar vigas a escala media o real, modificando la distancia entre apoyos y los puntos de aplicación de la carga. Lo que permitirá entender de mejor manera el momento exacto que la viga cambie su comportamiento.

- Se recomienda usar sensores de deformación a lo largo del elemento estructural y cerca a los anclajes de fibra de carbono, ya que ayudará a medir con precisión cómo se van transmitiendo las fuerzas antes de que ocurra la falla.
- Mantener en movimiento constante el adhesivo es importante durante su preparación ya que, al dejar la mezcla estática, acelera su endurecimiento en el recipiente, y así se altera químicamente reduciendo su capacidad de adherencia.
- Se sugiere realizar ensayos de adherencia tipo pull-off, esto servirá para evaluar la resistencia del concreto y poder ver si ello está en buenas condiciones para ser reforzado con el sistema CFRP.

REFERENCIAS

Aceros Arequipa. (junio de 2022). Construye Seguro. Manual del Maestro Constructor. Obtenido de https://www.acerosarequipa.com/manuales/manual-del-maestro-constructor/

ACI 318-14. (2014). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-14/ACI 318R-14). American Concrete Institute.

ACI 440.2R. (2017). Guía para el diseño y la construcción de sistemas de FRP adheridos externamente para el refuerzo de estructuras de hormigón.

ACI PRC-440.2-17. (2017). *Guía para el diseño y construcción de sistemas de FRP adheridos externamente para el refuerzo de estructuras de hormigón.*

Aguilar Chama, K. P., & Cari Montoya, B. J. (2019). Verificación de la efectividad del uso de la fibra de carbono en el reforzamiento de vigas de concreto armado sometidas a esfuerzo de flexión y corte. Arequipa, Perú.

Alegre Gago, G. (2017). Estudio de la influencia en la resistencia y ductilidad de las fibras de carbono utilizadas como reforzamiento de vigas de concreto armado. Lima, Perú.

Alfaro Valencia, L. I., & Hernandez Nongrados, M. M. (noviembre de 2023). Reforzamiento estructural de vigas mediante el uso de fibras de carbono (CFRP) en una vivienda de 4 pisos ubicada en el distrito de Carabayllo, Lima. Lima, Perú.

Aquino Cusquisibán, S. E. (2019). Variación de la resistencia a la flexión de vigas de concreto armado reforzadas con láminas de fibra de carbono (CFRP). Cajamarca, Perú.

Baca Escobar, W. (2010). Obtenido de https://es.scribd.com/document/308638337/12-William-Baca-Experiencia-Peruana-Diseno-Aplicacion-Reforzamiento-Estructural-Fibra-Carbono

Blanco Blasco, A. (1994). *Estructuración y Diseño de Edificaciones de Concreto Armado.*

Boletín de Educación ACI E2-00. (2006). Refuerzo para concreto - materiales y aplicaciones.

Calavera Ruiz, J. (2005). *Patología de estructuras de hormigón armado y pretensado* (2 ed., Vol. I). INTEMAC.

Calla Deza, F. J., & Torres Almirón , J. C. (2015). Reforzamiento por flexión de vigas de concreto armado con fibra de carbono. Arequipa, Perú.

Depaz Hidalgo, F. J. (2019). Aplicación de fibra de carbono CFRP en el reforzamiento a flexión de vigas experimentales de concreto armado en la ciudad de Huaraz en el año 2018. Huaraz, Ancash, Perú.

Diescon Ingenieros. (2021). Obtenido de Diescon Ingenieros.

Enriquez, E. (s.f.). Obtenido de https://es.scribd.com/document/401746350/Reforzamiento-Mediante-Encamisado-de-Columnas

Fahed H, S., Hayder A, R., & Huthaifa I, A. (mayo de 2024). Explicando los mecanismos de fallo por delaminación del recubrimiento de concreto en vigas de hormigón armado reforzadas con CFRP para proponer un enfoque de diseño basado en la mecánica. *Estructuras, 63*(106295). Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012424004478?via%3Dihub

Harmsen, T. (2017). *Diseño de Estructuras de Concreto Armado* (Quinta ed.). PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FONDO EDITORIAL .

Horse Construction Refuerzo Estructural. (26 de Septiembre de 2023). Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=Myi0n78bFEo

Instituto Americano del Concreto. (2025). *Código de Construcción para Concreto Estructural — Requisitos y Comentarios.*

Iskaner, M., Melad, M., Yasser, M., Rahim, W. A., & Mosa, A. (2020). Efecto de la ubicación de la unión de las tiras de CFRP sobre la capacidad de flexión y ductilidad de vigas de hormigón armado. En E.-M.-S. 2. 3.° Conferencia Europea y Mediterránea de Ingeniería Estructural y Construcción 2020, & ISEC (Ed.). Dakota del Norte, EE.UU. Obtenido de https://fount.aucegypt.edu/faculty_book_chapters/357

Kosmatka , S., & Wilson, M. (2011). *Design and Control of Concrete Mixtures. The guide to applications, methods, and materials* (Decimoquinta ed.). Portland Cement Association.

Medina Deza, D. A. (2020). Evaluación estructural de sistemas de reforzamiento en vigas de concreto armado con fibras de carbono y planchas de acero sometidas de flexión. Arequipa, Perú.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2009). Norma Técnica de Edificación. E.060 Concreto Armado.

Morales Morales, R. (2006). *Diseño en Concreto Armado.* Instituto de la Construcción y Gerencia.

Muhammad , I., Ravi, K., Kent A, H., & Jovan, T. (2024). Uso complementario de envolventes de CFRP en U como refuerzo de corte suplementario y anclaje en vigas de concreto reforzado fortalecidas con laminados de CFRP externamente unidos. *Integridad estructural de Procedia, 64*, 1540-1548. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321624010114

Muhammad Usman, H., Soo-Yeon, S., Hai Van, T., & Khol, S. (abril de 2023). Monitoreo y caracterización del desprendimiento de vigas de hormigón reforzado con CFRP utilizando tecnología de emisión acústica. *Desarrollos en el entorno, 14*. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666165923000236?via%3Dihub

Nilson, A. (2001). *Diseño de Estructuras de Concreto* (Duodécima ed.).

Ottazi Pasino, G. (2011). *Diseño en Concreto Armado* (Segunda ed.). Lima, Perú: Asociación Capitulo Peruano del Instituto Americano del Concreto - ACI PERU.

Preserva Ingeniería y Construcción. (s.f.). Obtenido de https://www.preservaing.com/servicios-ingenieria-arquitectura

Proaño Tataje, L. R. (2012). Comportamiento de vigas de concreto armado reforzadas externamente con platinas de fibras de carbono. Lima, Perú.

Sika. (2013). Guía de Soluciones: Reparación, Refuerzo y Protección de Estructuras de Hormigón. Obtenido de https://chl.sika.com/dms/getdocument.get/c4e590d5-0a80-3510-a955-0a14a31a36ca/Guia%20de%20soluciones%20Reparacion,%20Refuerzo%20y%20Proteccion%20de%20estructuras%20de%20hormigon.pdf

SIKA. (Julio de 2019). HOJA DE DATOS DEL PRODUCTO Sikadur®-301. *3*.

SIKA. (Julio de 2019). HOJA DE DATOS DEL PRODUCTO SikaWrap®-600 C. *TEJIDO DE FIBRA DE CARBONO PARA REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL*.

Sika at Work. (2013). Complejo Cerro Verde Structural Strengthening. Obtenido de https://per.sika.com/dms/getdocument.get/1f0b3893-2221-3b6c-aebe-616282db8078/SAW%20complejo%20cerro%20verde.pdf

SIKA AT WORK. (2016). REFUERZO CON FIBRAS DE CARBONO DE LA SEDE DE SUNAT EN AREQUIPA. Obtenido de https://per.sika.com/dms/getdocument.get/54f0aac1-f5bd-38ae-a149-29d040206d8b/SAW%20Sunat%20Sede%20Arequipa.pdf

Sika Building Trust - Sika Perú. (2021). Obtenido de https://per.sika.com/es/construccion/reforzamiento-estructural/adhesivos-epoxicos-fibras-carbono/sikadur-301.html

Silva Diaz, M. J., & Mendoza Rugel, G. E. (14 de noviembre de 2023). Propuesta de reforzamiento de estructuras con fibra de carbono en viviendas, por cambio de uso o ampliación de área construida - Lima. Lima, Perú.

Thamrin, R., Zaidir, Z., & Desharma, S. (16 de agosto de 2021). Análisis de fallos por desprendimiento de vigas de concreto reforzado fortalecidas con placas de CFRP. *Polímeros, 13*(16), 2738. Obtenido de https://www.mdpi.com/2073-4360/13/16/2738

TopConsult Ingeniería. (s.f.). Obtenido de https://fibradecarbono.com.pe/portafolio.html

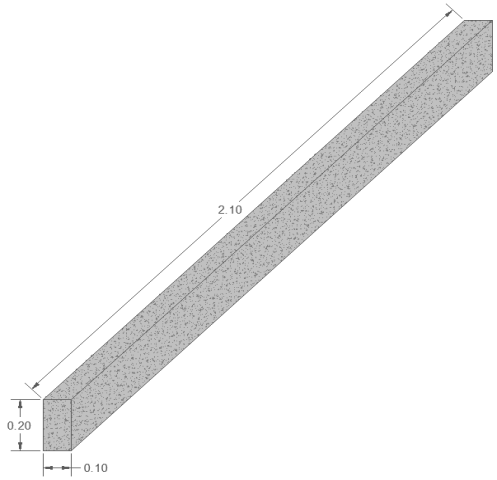
Ugarte Tassara, A. F., & Valdez Gamarra , M. O. (2024). Determinación de la técnica de refuerzo más económica para el diseño de vigas entre el refuerzo con láminas de fibra de carbono y el diseño de vigas doblemente reforzadas con acero . Arequipa, Perú.

Universidad Politécnica de Madrid. (s.f.). Obtenido de https://masteringenieriasismica.etsii.upm.es/refuerzo-de-estructuras-de-hormigon-con-polimeros-reforzados-con-fibras-frp/

ANEXOS

Anexo A Matriz de Consistencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA
Problema general ¿Cómo se desarrolla el mecanismo de delaminación en vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono bajo ensayo de flexión?	**Objetivo General** Evaluar experimentalmente el mecanismo de delaminación en vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono bajo ensayo de flexión, con el fin de comprender su comportamiento en función de la disposición del refuerzo y su influencia en la falla estructural.	**Hipótesis general** El mecanismo de la falla por delaminación en vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono bajo ensayo de flexión está influenciado por la disposición del refuerzo interno y externo estructural, de modo que en ciertos escenarios y configuraciones se incrementará la probabilidad de falla por delaminación, mientras que en otras permitirá retrasarla o reducirla.	**Variables Independientes** - Disposición del refuerzo estructural **Variables Dependientes** - Falla por delaminación	**Tipo de Investigación** Experimental y aplicada **Nivel de Investigación** Explicativo experimental

Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Población	Método de Investigación
- ¿Cómo influye la disposición del refuerzo estructural en la aparición de la falla por delaminación en vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono? - ¿En qué etapa del ensayo de flexión se presenta la falla por delaminación en las vigas de concreto armado? - ¿Cuál es el comportamiento estructural predominante de las vigas reforzadas con fibra de carbono durante el ensayo de flexión? - ¿Qué efecto tiene el refuerzo con fibra de carbono como laminado longitudinal en el comportamiento de las vigas?	- Evaluar la influencia de la disposición del refuerzo en la aparición de la falla por delaminación de la fibra de carbono. - Identificar en qué etapa del ensayo se presenta la falla por delaminación de la fibra de carbono. - Analizar el comportamiento estructural de las vigas durante el ensayo de flexión - Evaluar el desempeño del refuerzo longitudinal de fibra de carbono en cada viga. - Analizar el efecto del uso de refuerzos tipo U (U-Wraps) en el control de la falla por delaminación.	- La disposición del refuerzo estructural influye significativamente en la aparición de la falla por delaminación. - La delaminación se presenta en distintas etapas del ensayo, dependiendo del comportamiento de la viga. - Las vigas presentan dos comportamientos predominantes: flexión y cortante. - El refuerzo con fibra de carbono como laminado longitudinal, mejora el comportamiento estructural, pero su efectividad depende del tipo de falla. - El uso de refuerzos tipo U-Wrap retrasa la aparición de la delaminación. - La falla por delaminación está asociada al tipo de falla	Especímenes de vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono (CFRP). **Muestra** Total, de 12 muestras de 0.10 m x 0.20 m x 2.10 m. 	**Diseño de Investigación** Investigación experimental

- ¿Cómo influye el uso de refuerzo tipo U-Wrap en el control o reducción de la delaminación? - ¿Qué tipos de falla estructural se presentan en las vigas ensayadas y cómo se relacionan con la falla por delaminación? - ¿Qué diferencias existen entre el comportamiento experimental y el comportamiento teórico de las vigas? - ¿Qué factores influyen en la falla por delaminación en vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono?	- Identificar los tipos de comportamiento estructural predominantes en las vigas. - Comparar el comportamiento experimental con el comportamiento teórico esperado. - Identificar los principales factores que influyen en la falla por delaminación de las fibras de carbono en vigas de concreto armado bajo esfuerzos de flexión.	estructural que presenta la viga. - Existen diferencias entre el comportamiento experimental y teórico, debido a condiciones reales de ejecución en laboratorio. - Existen diferencias entre el comportamiento experimental y teórico, debido a condiciones reales de ejecución en laboratorio.

Anexo B Matriz de Operacionalización de Variables

VARIABLES INDEPENDIENTES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Disposición del refuerzo estructural	Configuración y distribución de CFRP, acero longitudinal y transversal en vigas de concreto armado para evaluar su comportamiento estructural bajo cargas de flexión.	Se evaluará diferentes configuraciones del acero estructural en vigas de concreto armado, donde se considere variaciones en el acero positivo longitudinal y la presencia o ausencia de estribos y el número de cargas aplicadas, con el fin de observar su comportamiento durante los ensayos experimentales.	- Ensayo a flexión de viga de concreto reforzado con fibra de carbono considerando diferentes condiciones y configuraciones de refuerzo de acero.	- Resistencia a la flexión de vigas de concreto armado reforzadas con fibras de carbono. - Tipo de falla estructural presentada en las vigas. - Aparición y propagación de fisuras - Comportamiento según la disposición de acero.

VARIABLES DEPENDIENTES	DEFINICIÓN	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Falla por delaminación	Esta falla estructural se produce cuando el sustrato de concreto no soporta la tensión de la fibra de carbono, ocurre en un extremo de la viga y se extiende hacia el centro de ella, se caracteriza por la separación o despegue de las capas de fibra de carbono del concreto.	Fenómeno que pretendemos mitigar, para abordar dicha problemática, se realizaron los ensayos estructurales que permitirán observar la magnitud de la delaminación y su impacto en el rendimiento de la viga	- Magnitud de la delaminación - Causas de la delaminación - Impacto en la capacidad de carga en las vigas de concreto armado	- Área afectada - Errores en la aplicación y factores contribuyentes - Incremento en capacidad de carga

TMN	1/2"
TM	3/4"

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO

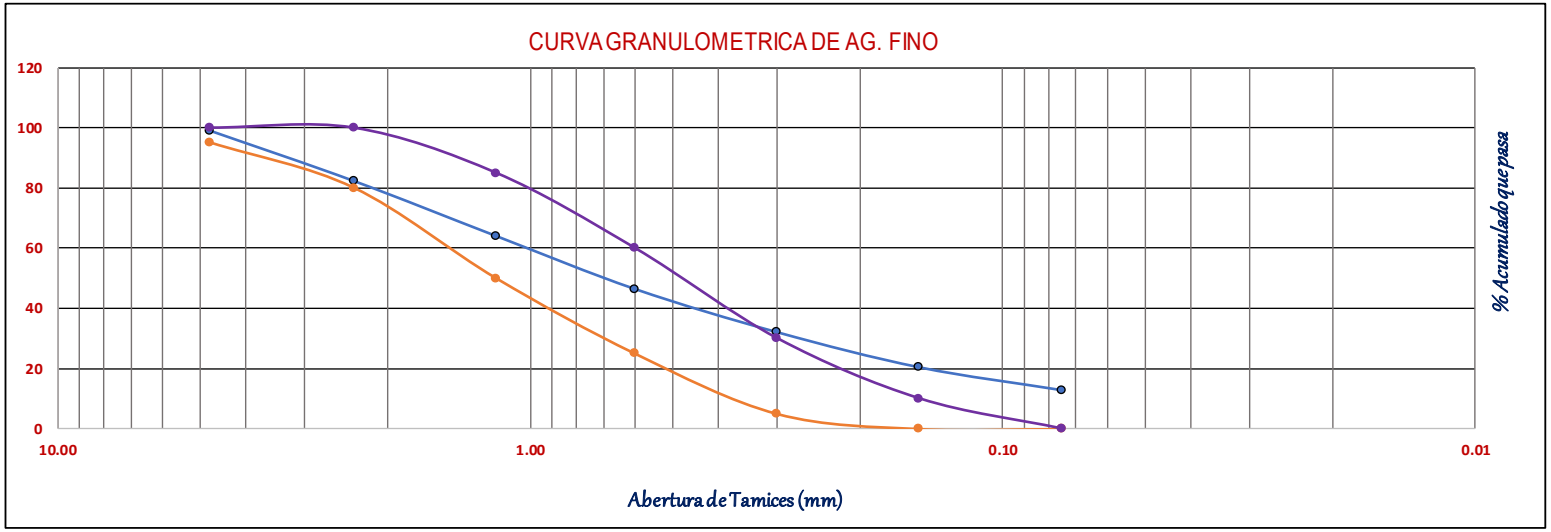
AGREGADO FINO

Peso inicial	1001.01	g

Tamiz		Peso Retenido (g)	%Retenido		%Pasa	%Pasa	
N°	Abertura (mm)		Total%	Acumulada %			
N°4	4.75	8.40	0.84	0.84	99.16	95.00	100.00
N°8	2.36	167.30	16.72	17.56	82.44	80.00	100.00
N°16	1.18	183.34	18.32	35.87	64.13	50.00	85.00
N°30	0.60	176.56	17.64	53.52	46.48	25.00	60.00
N°50	0.30	144.05	14.39	67.91	32.09	5.00	30.00
N°100	0.15	116.95	11.69	79.60	20.40	0.00	10.00
N°200	0.08	75.91	7.58	87.18	12.82	0.00	0.00
Fondo		128.30	12.82	100.00	0.00		
Peso total (g)		1000.81		255.29			

Pérdida	0.20
%Retenido Total	99.98

MF	2.55



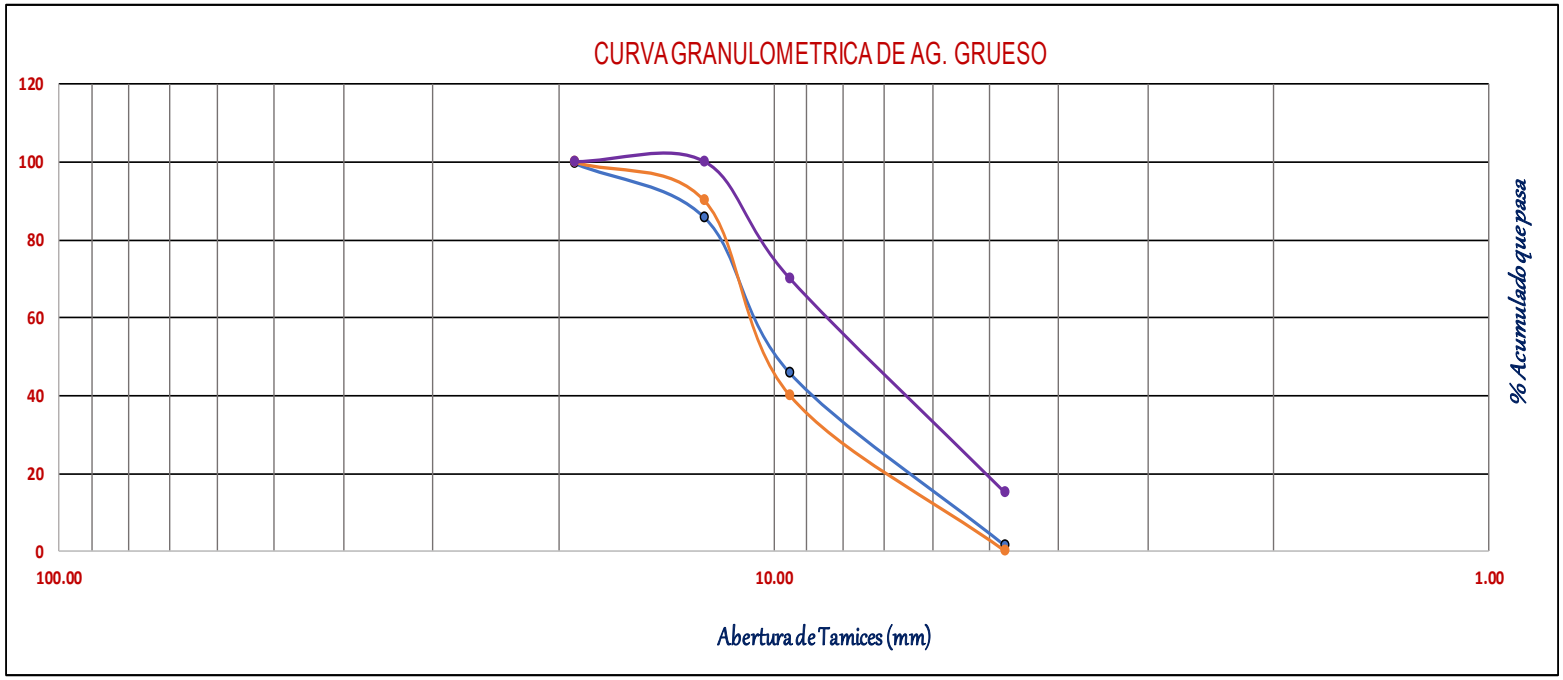
AGREGADO GRUESO

Peso inicial	3500.00	g

Tamiz		Peso Retenido (g)	%Retenido		%Pasa	%Pasa	
N°	Abertura (mm)		Total%	Acumulada %			
3/4"	19.00	15.40	0.44	0.44	99.56	100.00	100.00
1/2"	12.50	488.30	13.96	14.40	85.60	90.00	100.00
3/8"	9.50	1394.80	39.87	54.27	45.73	40.00	70.00
N°4	4.75	1550.70	44.33	98.60	1.40	0.00	15.00
Fondo		49.00	1.40	100.00	0.00		
Peso total (g)		3498.20					
				153.31			

Pérdida	1.80
%Retenido Total	99.95

MF	1.53



CONTENIDO DE HUMEDAD

	AG GRUESO	AG FINO
Peso inicial	1000.50	1000.10
Peso final	998.60	993.40
Peso del agua	1.90	6.70
Contenido de humedad (%)	***0.19***	***0.67***

$$P = \frac{(W - D)}{D} * 100$$

$P = Contenido\ de\ humedad\ de\ la\ muestra\ (\%)$
$W = Masa\ de\ la\ muestra\ húmeda\ original\ (g)$
$D = Masa\ de\ la\ muestra\ seca\ (g)$

PESO ESPECÍFICO y ABSORCION

AGREGADO FINO			
Peso Superficialmente Seco (SSS)	**500.00**	**500.00**	500.00
Peso fiola +agua	**1340.70**	**1305.70**	1323.20
Peso fiola + agua + material SSS	**1654.10**	**1619.50**	1636.80
Volumen de masa + volumen de vacios	186.60	186.20	186.40
Peso Seco	**493.70**	**488.70**	491.20
Volumen de masa	180.30	174.90	177.60
Peso Especifico Bulk (Base Seca) g/cm3	***2.646***	***2.625***	**2.64**
Peso Especifico Bulk (Base Saturada) g/cm3	***2.680***	***2.685***	**2.68**
Peso Especifico Aparente (Base Seca) g/cm3	***2.738***	***2.794***	**2.77**
ABSORCION (%)	***1.28***	***2.31***	**1.79**

AGREGADO GRUESO	
Peso Superficialmente Seco (SSS)	**4411.90**
Peso canastilla + material sumergido	**2199.30**
Peso Seco	**4383.00**
Peso Especifico Bulk (Base Seca) g/cm3	***1.98***
Peso Especifico Bulk (Base Saturada) g/cm3	***1.99***
Peso Especifico Aparente (Base Seca) g/cm3	***2.01***
ABSORCION (%)	***0.66***

PESO UNITARIO

DESCRIPCIÓN	AGREGADO FINO			AGREGADO GRUESO		
	1	2	3	1	2	3
Volumen del molde (Cm^3)	**3293.89**	**3293.89**	**3293.89**	**10520.42**	**10520.42**	**10520.42**
Peso del molde (g)	**1646.0**	**1646.0**	**1646.0**	**4840.0**	**4840.0**	**4840.0**
Peso muestra suelta (g)	7221.00	7225.00	7223.00	18224.00	18307.00	18275.00
Peso muestra compactada (g)	8037.00	8041.00	8045.00	19345.00	19325.00	19358.00
PUC (g/Cm^3)	1.94	1.94	1.94	1.38	1.38	1.38
PUS (g/Cm^3)	1.69	1.69	1.69	1.27	1.28	1.28
PUC promedio (g/Cm^3)	***1.941***			***1.379***		
PUS promedio (g/Cm^3)	***1.693***			***1.276***		

MOLDE PARA AG FINO	
DIAMETRO (cm)	16.18
ALTURA (cm)	16.02
MOLDE PARA AG GRUESO	
DIAMETRO (cm)	21.12
ALTURA (cm)	30.03

DISEÑO DE MEZCLAS

F'c = 175 kg/cm²	
Parámetro	**Valor**
Agregado grueso	793.754 kg/m³
Agregado fino	674.707 kg/m³
Cemento	288.00 kg/m³
Agua	227.254 lts/m³
Relación a/c	0.792
Dosificación	1 : 0.8 : 2.3 : 2.8

F'c = 210 kg/cm²	
Parámetro	**Valor**
Agregado grueso	793.754 kg/m³
Agregado fino	647.899 kg/m³
Cemento	315.789 kg/m³
Agua	226.955 lts/m³
Relación a/c	0.684
Dosificación	1 : 0.7 : 2.1 : 2.5

DISEÑO DE VIGA MODELO PARA LA INVESTIGACIÓN (TIPO I y II)

TESIS:	"Evaluación experimental del mecanismo de delaminación en vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono bajo ensayo de flexión"
TESIS TAS:	Montes Huanco Mariela Lizbeth & Yupanqui Soncco Daryann Gabriela

I TIPO DE VIGA: *6mm: 1 @ 0.05; 8 @ 0.20 m.*

Geometría de la viga:

Considerando las condiciones de manipulación y ensayo de las vigas a escala media, se seleccionó una longitud de 2.10 m. La viga se apoya sobre soportes en cada extremo de cada viga a ensayar.

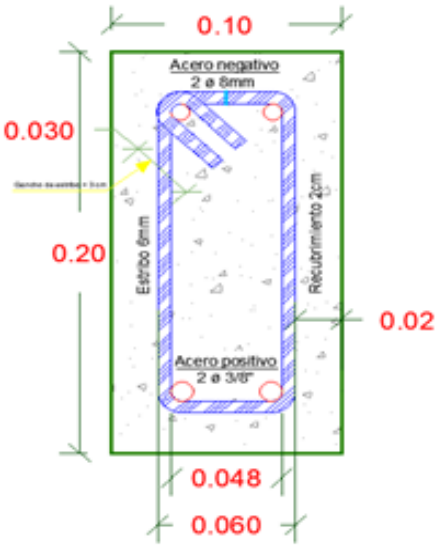
Luz entre apoyos: 2.00 m

Según la norma E.060:

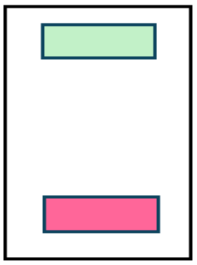
H=	L/12	@	L/10
	0.17		0.2
H=	**0.20**	m	

b>=1/2*h	0.10	m
b=	**0.10**	m

SECCION DE VIGA



Diseño de la viga para un f'c=210 kgf/cm2:		
Altura de la Viga (h) =	20	cm
Ancho de la Viga (b) =	10	cm
Recubrimiento (r) =	2	cm
Resistencia del Concreto f'c=	210	kg/cm2
Varilla - longitudinal =	**3/8**	"
Diámetro de la varilla	0.95	cm
Área de acero de refuerzo (As)	1.43	cm2
Varilla - transversal	**6**	**mm**
Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo (fy)	4280	kg/cm2
B1	0.85	
Ø	0.9	
Peralte efectivo (d)	16.9	cm
Distancia desde la fibra más comprimida hasta el acero en compresión (d')	3.08	cm



1.01 cm2

1.43 cm2

Verificación de rangos de cuantías	
Cuantía (p)	0.00842
Cuantía Balanceada (Pb)	0.020690525
Cuantía Mínima (Pmin)	0.00237
Cuantía Máxima (Pmáx)	0.01552
Área de acero mínima (As min)	0.40 cm2

CHEQUEO DE CUANTÍAS

0.00237 Cua.Min	<	0.00842 C. Hallada	<	0.01552 C. Máx

CUMPLE, está en el rango

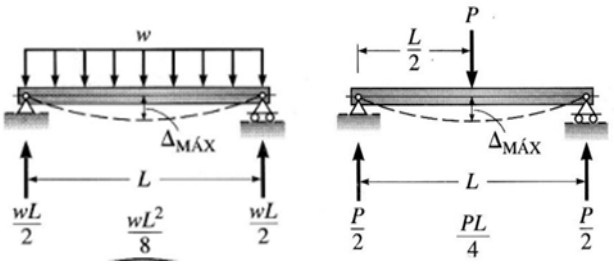
Momento resistente de diseño ØMn		
Altura del bloque rectangular equivalente de compresión (a)	3.42	cm
Momento resistente de diseño (ØMn)	835.25	kg*m
No se aplicará el factor de reducción por flexión (Ø = 0.90); así, el valor del momento resistente quedó expresado de la siguiente manera:		
Momento nominal resistente (Mn)	0.928	Ton/m
Cálculo de la carga ultima de rotura de acuerdo al Momento Máximo – VIGAS SOMETIDAS A 01 CARGA PUNTUAL		
Peso Específico del concreto	2400	kg/m3
Peso propio de la viga (w)	48	kg/m
Cálculo de la carga de rotura, despejando P	928.05	Kg/m
$M = \frac{PL}{4} + \frac{wL^2}{8}$	0.928	Ton/m
Despejamos P:		
Carga de rotura (P)	1.808	Tn
Cálculo del cortante de acuerdo a la carga de rotura		
Carga puntual =	1.81	Tn
Vu=	0.9521	Tn

Diseño por cortante

RESISTENCIA DEL CONCRETO

$$V_{C=} = 0,53 * \sqrt{f'c} \text{ *b*d}$$

Vc=	1299.82	Kg
Vc=	1.30	Tn
Ø	0.850	
ØVc = Fuerza cortante que resiste el concreto	1104.84	Kg
	1.105	**Tn**



Diseño Final del I Tipo de viga - f'c=210kg/cm2

Diseño por flexión

Se usó un área de acero positivo igual a 1.42 cm2 equivalente a dos varillas de 3/8"; como acero negativo dos varillas de 8 mm.

Diseño por cortante

Debido a que la viga corresponde a un modelo a escala media se optó por una distribución de estribos simplificada pero representativa del comportamiento real. Se colocó el primer estribo a 5 cm de cada apoyo, con el fin de controlar el cortante máximo y la fisuración diagonal en esa zona, y se dispusieron ocho estribos adicionales a cada 20 cm en el tramo central.

Diseño Final del II Tipo de viga - f'c=210kg/cm2

Diseño por flexión

Se usó un área de acero positivo igual a 1.42 cm2 equivalente a dos varillas de 3/8"; como acero negativo dos varillas de 8 mm.

Diseño por cortante

Debido a que la viga corresponde a un modelo a escala media se optó por una distribución de estribos simplificada pero representativa del comportamiento real. Se colocó el primer estribo a 5 cm de cada apoyo, con el fin de controlar el cortante máximo y la fisuración diagonal en esa zona, y se dispusieron seis estribos adicionales a cada 25 cm en el tramo central.

Nota: Para vigas sometidas a 02 cargas se emplea el mismo procedimiento de diseño, reemplazando la ecuación de momento máximo por la del sistema de dos cargas

DISEÑO DE VIGA MODELO PARA LA INVESTIGACIÓN (TIPO III)

TESIS:	"Evaluación experimental del mecanismo de delaminación en vigas de concreto armado reforzadas con fibra de carbono bajo ensayo de flexión"
TESISTAS:	Montes Huanco Mariela Lizbeth & Yupanqui Soncco Daryann Gabriela

II TIPO DE VIGA: *8 mm (acero negativo) - 0 ESTRIBOS.*

Geometría de la viga:

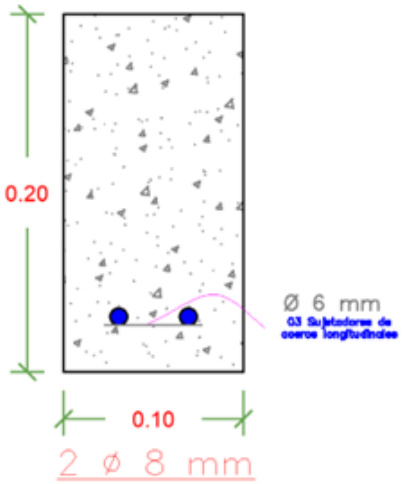
Considerando las condiciones de manipulación y ensayo de las vigas a escala media, se seleccionó una longitud de 2.10 m. La viga se apoya sobre soportes en cada extremo de cada viga a ensayar.

Luz entre apoyos: 2.00 m

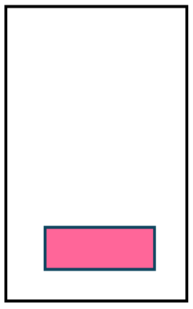
Según la norma E.060:

H=	L/12	@	L/10
	0.17		0.2
H=	**0.20**	m	

b>=1/2*h	0.10	m
b=	**0.10**	m



Diseño de la viga para un f'c=210 kgf/cm2:		
Altura de la Viga (h) =	20	cm
Ancho de la Viga (b) =	10	cm
Recubrimiento (r) =	2	cm
Resistencia del Concreto f'c=	175	kg/cm2
Varilla - longitudinal =	**8**	**mm**
Diámetro de la varilla	0.80	cm
Área de acero de refuerzo (As)	1.01	cm2
Varilla - transversal	**0**	**mm**
Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo (fy)	4280	kg/cm2
B1	0.85	
Ø	0.9	
Peralte efectivo (d)	17.6	cm
Distancia desde la fibra más comprimida hasta el acero en compresión (d')	2.40	cm



1.01 cm2

Verificación de rangos de cuantías	
Cuantía (p)	0.00571
Cuantía Balanceada (Pb)	0.017242104
Cuantía Mínima (Pmin)	0.00216
Cuantía Máxima (Pmáx)	0.01293
Área de acero mínima (As min)	0.38 cm2

CHEQUEO DE CUANTÍAS

0.00216 Cua.Min	<	0.00571 C. Hallada	<	0.01293 C. Máx	CUMPLE, está en el rango

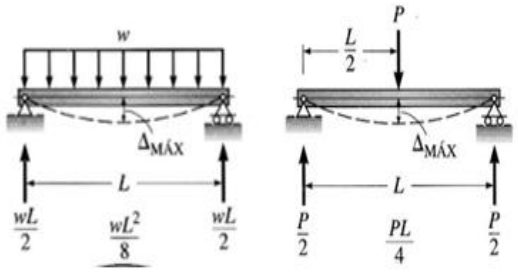
Momento resistente de diseño ØMn		
Altura del bloque rectangular equivalente de compresión (a)	2.89	cm
Momento resistente de diseño (ØMn)	625.54	kg*m
No se aplicará el factor de reducción por flexión (Ø = 0.90); así, el valor del momento resistente quedó expresado de la siguiente manera:		
Momento nominal resistente (Mn)	0.695	Ton/m
Cálculo de la carga ultima de rotura de acuerdo al Momento Máximo		
Peso Específico del concreto	2400	kg/m3
Peso propio de la viga (w)	48	kg/m
Cálculo de la carga de rotura, despejando P	695.05	Kg/m
$M = \frac{PL}{4} + \frac{wL^2}{8}$	0.695	Ton/m
Despejamos P:		
Carga de rotura (P)	1.342	Tn
Cálculo del cortante de acuerdo a la carga de rotura		
Carga puntual =	1.342	Tn
Vu=	0.7191	Tn

Diseño por cortante

RESISTENCIA DEL CONCRETO

$$V_{C=} = 0,53 * \sqrt{f'c}$$ *b*d

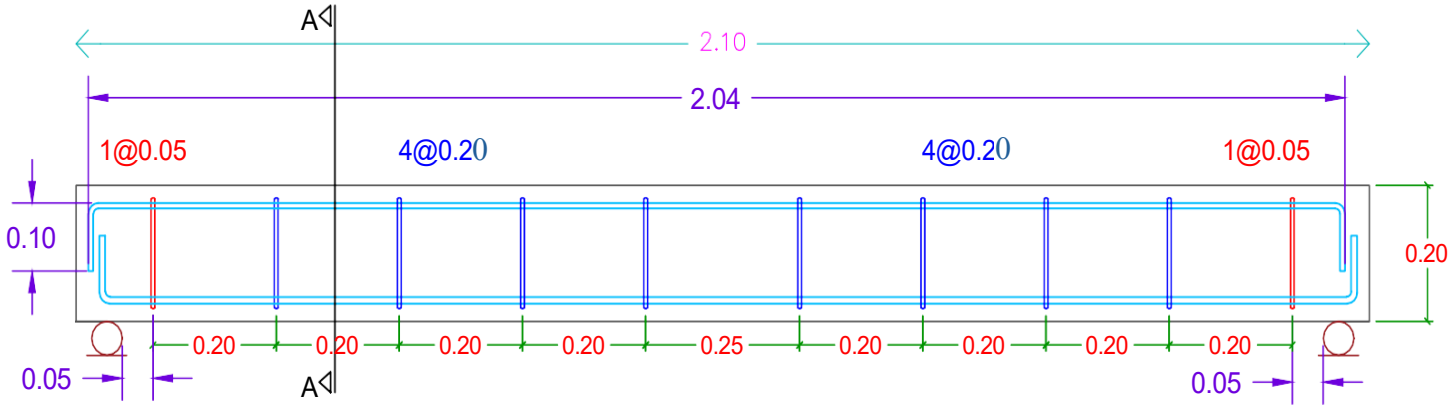
Vc=	1233.98	Kg
Vc=	1.23	Tn
Ø	0.850	
ØVc = Fuerza cortante que resiste el concreto	1048.88	Kg
	1.049	**Tn**



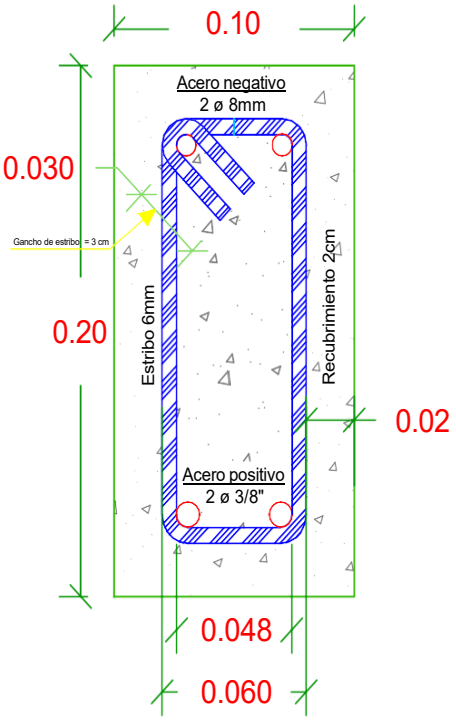
Diseño Final del III Tipo de viga - f'c=175kg/cm2
Diseño por flexión
Se usó un área de acero positivo igual a 1.01 cm2 equivalente a dos varillas de 8 mm.
Diseño por cortante
Sin estribos.

Nota: Para vigas sometidas a 02 cargas se emplea el mismo procedimiento de diseño, reemplazando la ecuación de momento máximo por la del sistema de dos cargas.

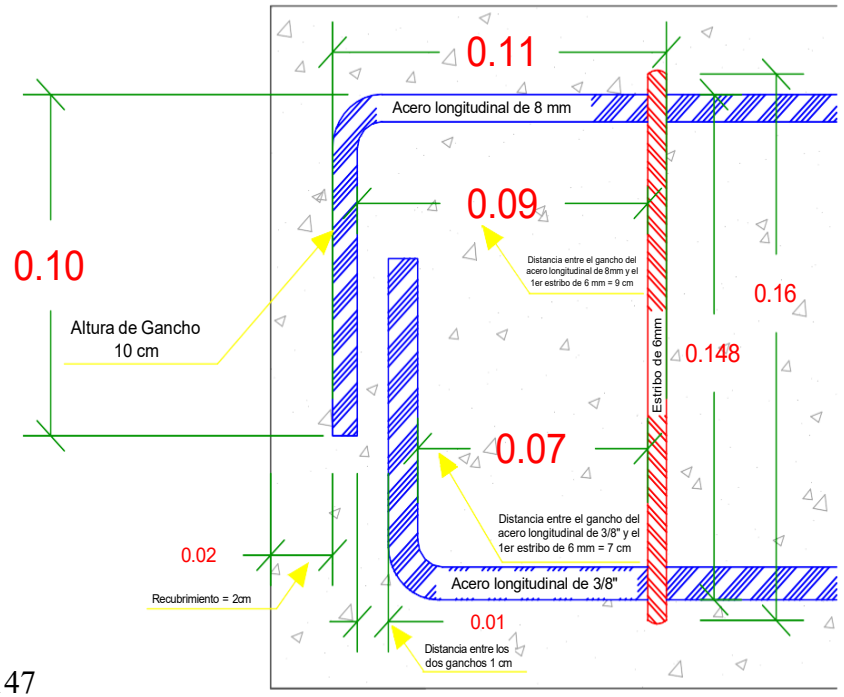
DETALLE LONGITUDINAL DE VIGA-TIPO I



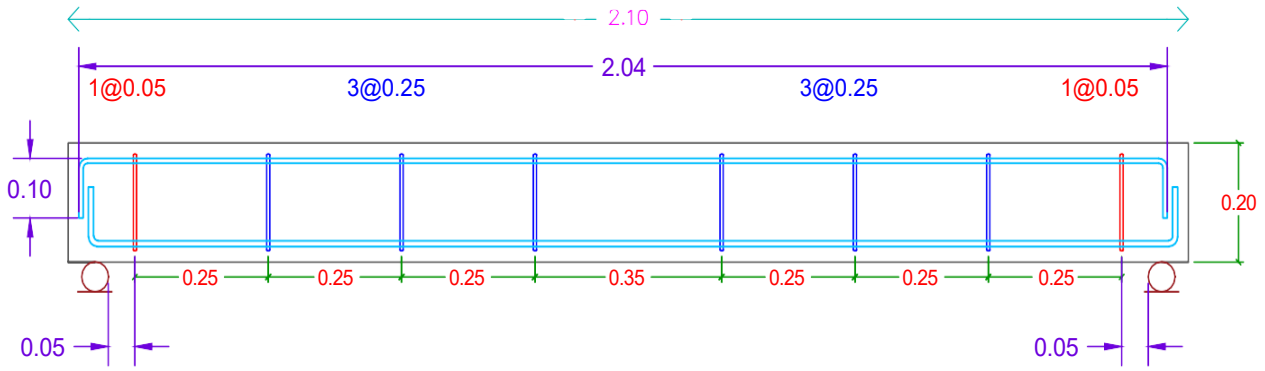
SECCION DE VIGA



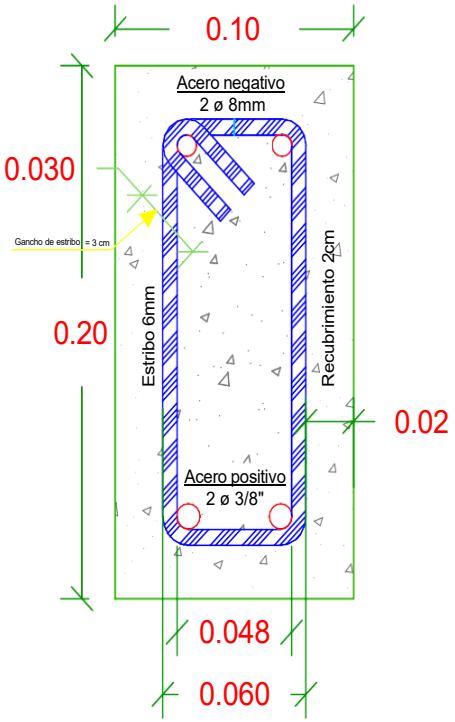
DETALLE CORTE A-A



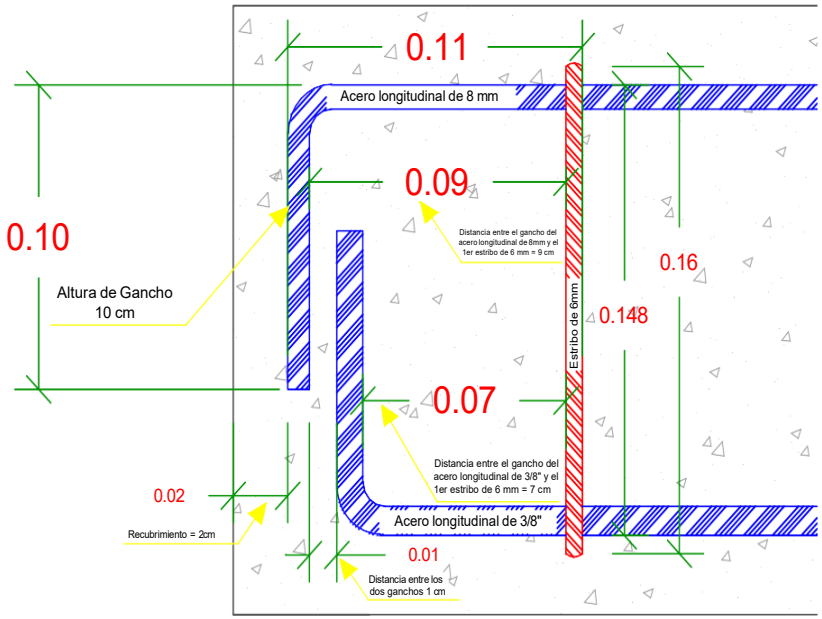
DETALLE LONGITUDINAL DE VIGA-TIPO II



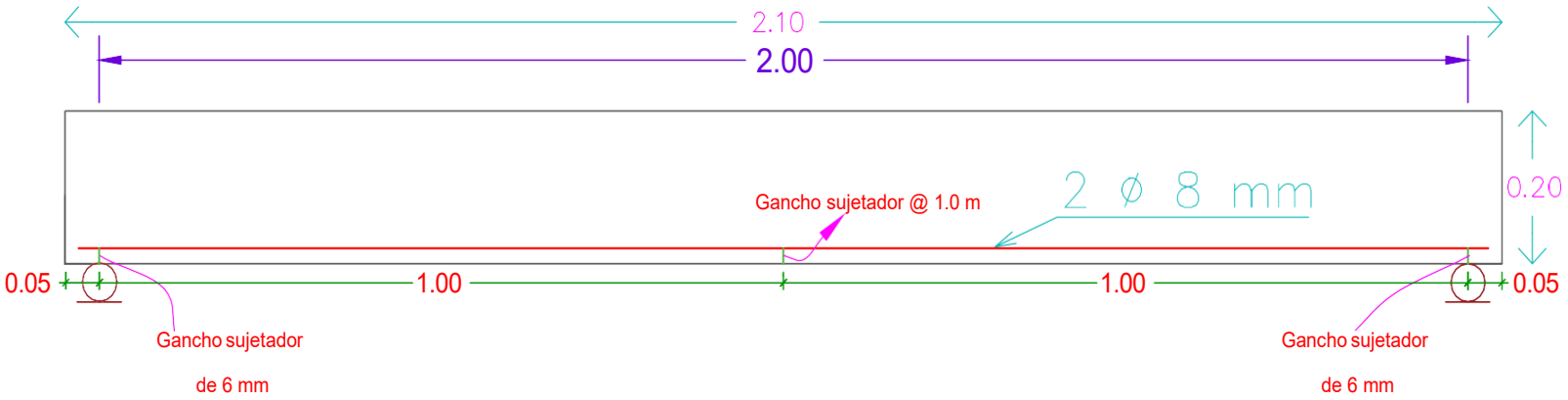
SECCION DE VIGA



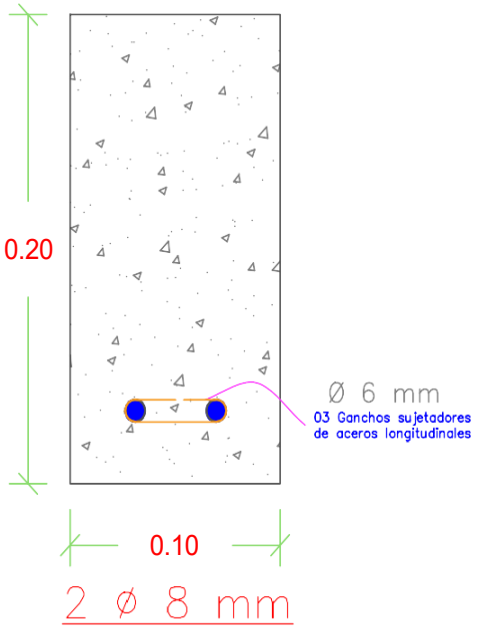
DETALLE CORTE A-A



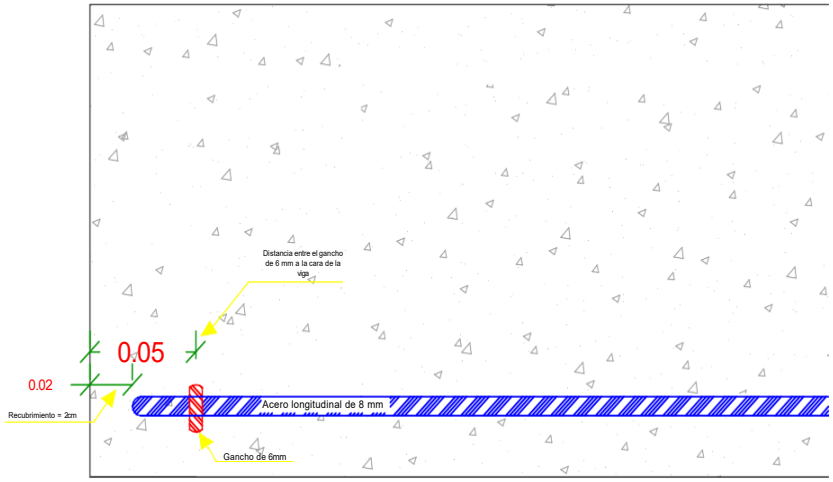
DETALLE LONGITUDINAL DE VIGA – TIPO III



SECCION DE VIGA



DETALLE



			VIGAS		
	Meas. Type	Result	Name	**Distance (m)**	**PROMEDIO**
	Compr. Strength	170 Kg/cm²	FV 1507 V1-V2_1	0.102	
V1	**Compr. Strength**	165 Kg/cm²	FV 1507 V1-V2_2	0.104	169
	Compr. Strength	173 Kg/cm²	FV 1507 V1-V2_3	0.105	
	Compr. Strength	168 Kg/cm²	FV 2407 V2-V6_1	0.103	
V2	**Compr. Strength**	151 Kg/cm²	FV 2407 V2-V6_2	0.102	160
	Compr. Strength	160 Kg/cm²	FV 2407 V2-V6_3	0.102	
	Compr. Strength	168 Kg/cm²	FV 2407 V2-V6_1	0.103	
V3	**Compr. Strength**	151 Kg/cm²	FV 2407 V2-V6_2	0.102	160
	Compr. Strength	160 Kg/cm²	FV 2407 V2-V6_3	0.102	
	Compr. Strength	144 Kg/cm²	FV 3107 V3_V8_1	0.101	
V4	**Compr. Strength**	144 Kg/cm²	FV 3107 V3_V8_2	0.103	150
	Compr. Strength	162 Kg/cm²	FV 3107 V3_V8_3	0.102	
	Compr. Strength	149 Kg/cm²	FV 3107 V3_V9_1	0.103	
V5	**Compr. Strength**	141 Kg/cm²	FV 3107 V3_V9_2	0.102	143
	Compr. Strength	138 Kg/cm²	FV 3107 V3_V9_3	0.102	
	Compr. Strength	175 Kg/cm²	FV 1308 V5-V13_1	0.104	
V6	**Compr. Strength**	155 Kg/cm²	FV 1308 V5-V13_2	0.102	164
	Compr. Strength	161 Kg/cm²	FV 1308 V5-V13_3	0.103	
	Compr. Strength	151 Kg/cm²	FV 2108 V6-V16_1	0.102	
V7	**Compr. Strength**	150 Kg/cm²	FV 2108 V6-V16_2	0.104	151
	Compr. Strength	153 Kg/cm²	FV 2108 V6-V16_3	0.103	
	Compr. Strength	162 Kg/cm²	FV 0708 V4-V10_1	0.104	
V8	**Compr. Strength**	150 Kg/cm²	FV 0708 V4-V10_2	0.103	154
	Compr. Strength	151 Kg/cm²	FV 0708 V4-V10_3	0.102	
	Compr. Strength	167 Kg/cm²	FV 0708 V4-V11_1	0.104	
V9	**Compr. Strength**	147 Kg/cm²	FV 0708 V4-V11_2	0.104	161
	Compr. Strength	170 Kg/cm²	FV 0708 V4-V11_3	0.102	
	Compr. Strength	155 Kg/cm²	FV 1308 V5-V14_1	0.102	
V10	**Compr. Strength**	155 Kg/cm²	FV 1308 V5-V14_2	0.104	158
	Compr. Strength	163 Kg/cm²	FV 1308 V5-V14_3	0.103	
	Compr. Strength	151 Kg/cm²	FV 2108 V6-V17_1	0.102	
V11	**Compr. Strength**	150 Kg/cm²	FV 2108 V6-V17_2	0.104	152
	Compr. Strength	155 Kg/cm²	FV 2108 V6-V17_3	0.103	
	Compr. Strength	156 Kg/cm²	FV 2108 V6-V18_1	0.103	
V12	**Compr. Strength**	156 Kg/cm²	FV 2108 V6-V18_2	0.103	155
	Compr. Strength	152 Kg/cm²	FV 2108 V6-V18_3	0.104	

Anexo J Resultados de Ensayos de Compresión de Probetas

ENSAYO DE COMPRESION DE PROBETAS FV1:15-07-25 (exceso de agua: 5.3468 ~ 5.400 L)

	N° Vaciado	NOMEN	FECHA DE VACIADO	FECHA DE ROTURA	EDAD (DIAS)	DISEÑO F'c (Kg/cm2)	D1 (cm)	D2 (cm)	D3 (cm)	D4 (cm)	Diámetro promedio	Altura 1 (cm)	Altura 2 (cm)	Altura promedio	AREA (cm2)	Peso (kg)	Carga (Lbf) o (kgf)	RESISTENCIA F'c (Kg/cm2)	% Alcanzado de Diseño	Promedio
EXCESO DE AGUA	V1	P9	15/07/2025	12/08/2025	28	210.00	10.10	10.06	10.00	9.85	10.00	21.40	21.76	21.58	78.58	3.7255	14847.0	**188.94**	89.97%	**93.18%**
	V1	P10	15/07/2025	12/08/2025	28	210.00	10.07	9.98	9.88	9.81	9.94	20.62	20.67	20.65	77.52	3.7225	15479.0	**199.67**	95.08%	
	V1	P11	15/07/2025	12/08/2025	28	210.00	10.12	10.05	9.93	9.82	9.98	20.57	20.61	20.59	78.23	3.7180	14154.0	**180.94**	86.16%	
	V1	P12	15/07/2025	12/08/2025	28	210.00	10.12	10.05	9.97	9.85	10.00	20.58	20.52	20.55	78.50	3.7005	15537.0	**197.92**	94.25%	
	V1	P13	15/07/2025	12/08/2025	28	210.00	10.09	10.06	9.95	9.82	9.98	20.67	20.64	20.66	78.23	3.7270	16496.0	**210.88**	100.42%	

ENSAYO DE COMPRESIÓN				
AREA (cm2)	RESISTENCIA F'c (Kg/cm2)	% Alcanzado de Diseño	Promedio	
78.54	**189.00**	90.00%	**92.67%**	
78.54	**197.00**	93.81%		
78.54	**180.00**	85.71%		
78.54	**197.00**	93.81%		
78.54	**210.00**	100.00%		

ENSAYO DE COMPRESION DE PROBETAS FV2:24-07-25 (exceso de agua: 1.7484 ~ 1.800 L)

	N° Vaciado	NOMEN	FECHA DE VACIADO	FECHA DE ROTURA	EDAD (DIAS)	DISEÑO F'c (Kg/cm2)	D1 (cm)	D2 (cm)	D3 (cm)	D4 (cm)	Diámetro promedio	Altura 1 (cm)	Altura 2 (cm)	Altura promedio	AREA (cm2)	Peso (kg)	Carga (Lbf) o (kgf)	RESISTENCIA F'c (Kg/cm2)	% Alcanzado de Diseño	Promedio
EXCESO DE AGUA	V2	P5	24/07/2025	07/08/2025	14	210.00	10.13	10.07	9.94	9.79	9.98	20.92	20.98	20.95	78.27	3.7780	15326.0	**195.82**	93.25%	**102.15%**
	V2	P6	24/07/2025	07/08/2025	14	210.00	10.11	10.02	9.89	9.76	9.95	20.56	20.41	20.49	77.68	3.7280	15283.0	**196.75**	93.69%	
	V2	P7	24/07/2025	07/08/2025	14	210.00	10.11	10.07	10.10	10.13	10.10	20.77	20.68	20.73	80.16	3.8090	19765.0	**246.58**	117.42%	
	V2	P8	24/07/2025	07/08/2025	14	210.00	10.06	9.99	9.84	9.79	9.92	20.51	20.49	20.50	77.29	3.6960	16919.0	**218.91**	104.24%	
	V2	P9	24/07/2025	21/08/2025	28	210.00	10.11	10.03	9.86	9.78	9.95	20.72	20.77	20.75	77.68	3.7363	18879.0	**243.04**	115.73%	**118.30%**
	V2	P10	24/07/2025	21/08/2025	28	210.00	10.09	10.05	9.91	9.78	9.96	20.34	20.47	20.41	77.87	3.7000	19293.0	**247.75**	117.97%	
	V2	P11	24/07/2025	21/08/2025	28	210.00	10.08	10.02	9.88	9.79	9.94	20.47	20.29	20.38	77.64	3.6995	19384.0	**249.67**	118.89%	
	V2	P12	24/07/2025	21/08/2025	28	210.00	10.13	10.09	9.90	9.79	9.98	20.46	20.30	20.38	78.19	3.6940	18993.0	**242.92**	115.68%	
	V2	P13	24/07/2025	21/08/2025	28	210.00	10.08	10.01	9.84	9.76	9.92	20.48	20.37	20.43	77.33	3.6855	20011.0	**258.78**	123.23%	

ENSAYO DE COMPRESIÓN				
AREA (cm2)	RESISTENCIA F'c (Kg/cm2)	% Alcanzado de Diseño	Promedio	
78.54	**195.00**	92.86%	**101.79%**	
78.54	**194.00**	92.38%		
78.54	**251.00**	119.52%		
78.54	**215.00**	102.38%		
78.54	**240.00**	114.29%	**116.76%**	
78.54	**245.00**	116.67%		
78.54	**246.00**	117.14%		
78.54	**241.00**	114.76%		
78.54	**254.00**	120.95%		

ENSAYO DE COMPRESION DE PROBETAS FV3:31-07-25 (exceso de agua: 1.3485 ~ 1.400 L)

	N° Vaciado	NOMEN	FECHA DE VACIADO	FECHA DE ROTURA	EDAD (DIAS)	DISEÑO F'c (Kg/cm2)	D1 (cm)	D2 (cm)	D3 (cm)	D4 (cm)	Diámetro promedio	Altura 1 (cm)	Altura 2 (cm)	Altura promedio	AREA (cm2)	Peso (kg)	Carga (kgf)	RESISTENCIA F'c (Kg/cm2)	% Alcanzado de Diseño	Promedio
EXCESO DE AGUA	V3	P1	31/07/2025	07/08/2025	7	210.00	10.08	10.03	9.91	9.50	9.88	20.67	20.72	20.77	76.67	3.7495	12771.0	**166.58**	79.32%	**78.97%**
	V3	P2	31/07/2025	07/08/2025	7	210.00	10.09	10.05	9.92	9.79	9.96	20.68	20.85	20.47	77.95	3.7315	12874.0	**165.15**	78.64%	
	V3	P3	31/07/2025	07/08/2025	7	210.00	10.12	10.13	10.12	10.14	10.13	20.42	20.51	20.47	80.56	3.8420	13446.0	**166.92**	79.48%	
	V3	P4	31/07/2025	07/08/2025	7	210.00	10.11	10.10	9.87	9.78	9.97	20.61	20.52	20.57	77.99	3.7295	13075.0	**167.65**	79.83%	
	V3	P5	31/07/2025	07/08/2025	7	210.00	10.08	10.04	9.93	9.83	9.97	20.56	20.55	20.56	78.07	3.7160	12719.0	**162.92**	77.58%	
	V3	P6	31/07/2025	14/08/2025	14	210.00	10.10	10.01	9.86	9.76	9.93	20.63	20.65	20.64	77.48	3,7245	13197.0	**170.32**	81.11%	**84.90%**
	V3	P7	31/07/2025	14/08/2025	14	210.00	10.15	10.07	9.95	9.83	10.00	20.62	20.63	20.63	78.54	3,7665	13991.0	**178.14**	84.83%	
	V3	P8	31/07/2025	14/08/2025	14	210.00	10.09	10.02	9.88	9.79	9.95	20.79	20.74	20.77	77.68	3,7745	14091.0	**181.40**	86.38%	
	V3	P9	31/07/2025	14/08/2025	14	210.00	10.10	10.04	9.95	9.78	9.97	20.51	20.49	20.50	78.03	3,6970	14300.0	**183.26**	87.27%	
	V3	P10	31/07/2025	28/08/2025	28	210.00	10.13	10.01	9.91	9.72	9.94	20.53	20.51	20.52	77.64	3,7230	14860.0	**191.40**	91.14%	**98.38%**
	V3	P11	31/07/2025	28/08/2025	28	210.00	10.10	9.99	9.92	9.74	9.94	20.55	20.53	20.54	77.56	3,7350	16500.0	**212.74**	101.30%	
	V3	P12	31/07/2025	28/08/2025	28	210.00	10.11	10.03	9.92	9.80	9.97	20.51	20.57	20.54	77.99	3,7610	16553.0	**212.24**	101.07%	
	V3	P13	31/07/2025	28/08/2025	28	210.00	10.19	10.02	9.90	9.79	9.98	20.60	20.69	20.65	78.15	3,7500	16394.0	**209.78**	99.90%	
	V3	P14	31/07/2025	28/08/2025	28	210.00	10.14	10.08	9.94	9.78	9.99	20.54	20.58	20.56	78.30	3,7050	16195.0	**206.82**	98.49%	

ENSAYO DE COMPRESIÓN					ULTRASONIDO
AREA (cm2)	RESISTENCIA F'c (Kg/cm2)	% Alcanzado de Diseño	Promedio		RESISTENCIA F'c (Kg/cm2)
78.54	**162.00**	77.14%	**78.38%**		
78.54	**163.00**	77.62%			
78.54	**171.00**	81.43%			
78.54	**166.00**	79.05%			
78.54	**161.00**	76.67%			
78.54	**168.00**	80.00%	**84.17%**		
78.54	**178.00**	84.76%			
78.54	**179.00**	85.24%			
78.54	**182.00**	86.67%			
78.54	**189.00**	90.00%	**97.43%**		**189.00**
78.54	**210.00**	100.00%			**198.00**
78.54	**210.00**	100.00%			**185.00**
78.54	**208.00**	99.05%			**189.00**
78.54	**206.00**	98.10%			**187.00**

ENSAYO DE COMPRESION DE PROBETAS FV4:31-07-25 (exceso de agua)

	N° Vaciado	NOMEN	FECHA DE VACIADO	FECHA DE ROTURA	EDAD (DIAS)	DISEÑO F'c (Kg/cm2)	D1 (cm)	D2 (cm)	D3 (cm)	D4 (cm)	Diámetro promedio	Altura 1 (cm)	Altura 2 (cm)	Altura promedio	AREA (cm2)	Peso (kg)	Carga (kgf)	RESISTENCIA F'c (Kg/cm2)	% Alcanzado de Diseño	Promedio
EXCESO DE AGUA	V4	P1	07/08/2025	14/08/2025	7	175.00	10.08	10.04	9.87	9.77	9.94	20.30	20.39	20.35	77.60	3,6810	11591.0	**149.37**	85.35%	**89.89%**
	V4	P2	07/08/2025	14/08/2025	7	175.00	10.07	10.00	9.87	9.78	9.93	20.50	20.37	20.44	77.44	3,6760	12499.0	**161.39**	92.23%	
	V4	P3	07/08/2025	14/08/2025	7	175.00	10.03	10.02	9.94	9.79	9.95	20.55	20.58	20.57	77.68	3,7245	12517.0	**161.14**	92.08%	
	V4	P4	07/08/2025	21/08/2025	14	175.00	10.12	10.07	9.89	9.80	9.97	20.47	20.44	20.46	78.07	3,6875	14042.0	**179.87**	102.78%	**101.86%**
	V4	P5	07/08/2025	21/08/2025	14	175.00	10.10	10.01	9.86	9.77	9.94	20.35	20.51	20.43	77.52	3,6775	13515.0	**174.34**	99.62%	
	V4	P6	07/08/2025	21/08/2025	14	175.00	10.09	10.04	9.90	9.79	9.96	20.43	20.46	20.45	77.83	3,6995	14052.0	**180.54**	103.16%	
	V4	P7	07/08/2025	05/09/2025	29	175.00	10.08	10.04	9.89	9.81	9.96	20.59	20.64	20.62	77.83	3,7505	17068.0	**219.29**	125.31%	**122.68%**
	V4	P8	07/08/2025	05/09/2025	29	175.00	10.12	10.07	9.94	9.82	9.99	20.43	20.37	20.40	78.34	3,7170	16027.0	**204.57**	116.90%	
	V4	P9	07/08/2025	05/09/2025	29	175.00	10.06	10.01	9.90	9.81	9.95	20.52	20.45	20.49	77.68	3,7320	17105.0	**220.20**	125.83%	

ENSAYO DE COMPRESIÓN					ULTRASONIDO
AREA (cm2)	RESISTENCIA F'c (Kg/cm2)	% Alcanzado de Diseño	Promedio		RESISTENCIA F'c (Kg/cm2)
78.54	**147.00**	84.00%	88.57%		
78.54	**159.00**	90.86%			
78.54	**159.00**	90.86%			
78.54	**178.00**	101.71%	100.57%		
78.54	**172.00**	98.29%			
78.54	**178.00**	101.71%			
78.54	**217.00**	124.00%	121.52%		**199.00**
78.54	**204.00**	116.57%			**207.00**
78.54	**217.00**	124.00%			**201.00**

ENSAYO DE COMPRESION DE PROBETAS FV5:31-07-25 (exceso de agua: 5.7117 ~ 5.8000 L)

	N° Vaciado	NOMEN	FECHA DE VACIADO	FECHA DE ROTURA	EDAD (DIAS)	DISEÑO F'c (Kg/cm2)	D1 (cm)	D2 (cm)	D3 (cm)	D4 (cm)	Diámetro promedio	Altura 1 (cm)	Altura 2 (cm)	Altura promedio	AREA (cm2)	Peso (kg)	Carga (kgf)	RESISTENCIA F'c (Kg/cm2)	% Alcanzado de Diseño	Promedio	ENSAYO DE COMPRESIÓN AREA (cm2)	ENSAYO DE COMPRESIÓN RESISTENCIA F'c (Kg/cm2)	ENSAYO DE COMPRESIÓN % Alcanzado de Diseño	ENSAYO DE COMPRESIÓN Promedio	ULTRASONIDO RESISTENCIA F'c (Kg/cm2)
EXCESO DE AGUA	V5	P1	13/08/2025	20/08/2025	7	175.00	10.02	10.01	9.86	9.77	9.92	20.47	20.37	20.42	77.21	3,702	11325.0	**146.68**	83.82%	**82.41%**	78.54	**144.00**	82.29%	80.95%	
	V5	P2	13/08/2025	20/08/2025	7	175.00	10.07	10.01	9.89	9.79	9.94	20.70	20.71	20.71	77.60	3,753	10991.0	**141.64**	80.94%		78.54	**139.00**	79.43%		
	V5	P3	13/08/2025	20/08/2025	7	175.00	10.08	10.01	9.88	9.74	9.93	20.76	20.66	20.71	77.41	3,734	11173.0	**144.34**	82.48%		78.54	**142.00**	81.14%		
	V5	P4	13/08/2025	27/08/2025	14	175.00	10.13	10.02	9.89	9.77	9.95	20.47	20.45	20.46	77.80	3,739	12743.0	**163.80**	93.60%	**96.54%**	78.54	**162.00**	92.57%	95.43%	**189.00**
	V5	P5	13/08/2025	27/08/2025	14	175.00	10.10	10.00	9.88	9.80	9.95	20.59	20.48	20.54	77.68	3,784	13524.0	**174.10**	99.49%		78.54	**172.00**	98.29%		**180.00**
	V5	P6	13/08/2025	11/09/2025	29	175.00	10.11	10.05	9.93	9.78	9.97	20.52	20.40	20.46	78.03	3,731	15179.0	**194.53**	111.16%		78.54	**193.00**	110.29%		**210.00**
	V5	P7	13/08/2025	11/09/2025	29	175.00	10.04	10.09	9.93	9.81	9.97	20.59	20.47	20.53	78.03	3,762	16187.0	**207.45**	118.54%	**112.73%**	78.54	**206.00**	117.71%	111.62%	**215.00**
	V5	P8	13/08/2025	11/09/2025	29	175.00	10.08	10.04	9.89	9.78	9.95	20.65	20.70	20.68	77.72	3,763	14756.0	**189.87**	108.50%		78.54	**187.00**	106.86%		**205.00**

ENSAYO DE COMPRESION DE PROBETAS FV6:31-07-25 (exceso de agua: 4.6515 ~ 4.7000 L)

	N° Vaciado	NOMEN	FECHA DE VACIADO	FECHA DE ROTURA	EDAD (DIAS)	DISEÑO F'c (Kg/cm2)	D1 (cm)	D2 (cm)	D3 (cm)	D4 (cm)	Diámetro promedio	Altura 1 (cm)	Altura 2 (cm)	Altura promedio (cm)	AREA (cm2)	Peso (kg)	Carga (kgf)	RESISTENCIA F'c (Kg/cm2)	% Alcanzado de Diseño	Promedio	ENSAYO DE COMPRESIÓN AREA (cm2)	ENSAYO DE COMPRESIÓN RESISTENCIA F'c (Kg/cm2)	ENSAYO DE COMPRESIÓN % Alcanzado de Diseño	ENSAYO DE COMPRESIÓN Promedio	ULTRASONIDO RESISTENCIA F'c (Kg/cm2)
EXCESO DE AGUA	V6	P1	21/08/2025	28/08/2025	7	175.00	10.10	10.00	9.89	9.77	9.94	20.45	20.52	20.49	77.60	3,7820	10354.0	**133.43**	76.24%	**77.58%**	78.54	**131.00**	74.86%	76.00%	**167.00**
	V6	P2	21/08/2025	28/08/2025	7	175.00	10.09	9.97	9.85	9.73	9.91	20.51	20.44	20.48	77.13	3,7020	10915.0	**141.51**	80.86%		78.54	**138.00**	78.86%		**165.00**
	V6	P3	21/08/2025	28/08/2025	7	175.00	10.15	10.02	9.87	9.75	9.95	20.53	20.55	20.54	77.72	3,7430	10286.0	**132.35**	75.63%		78.54	**130.00**	74.29%		**160.00**
	V6	P4	21/08/2025	05/09/2025	15	175.00	10.11	10.05	9.94	9.81	9.98	20.46	20.43	20.45	78.19	3,7190	13943.0	**178.33**	101.90%	**101.65%**	78.54	**177.00**	101.14%	100.57%	**196.00**
	V6	P5	21/08/2025	05/09/2025	15	175.00	10.08	9.96	9.87	9.80	9.93	20.56	20.54	20.55	77.41	3,7075	13939.0	**180.08**	102.90%		78.54	**177.00**	101.14%		**191.00**
	V6	P6	21/08/2025	05/09/2025	15	175.00	10.13	10.04	9.91	9.80	9.97	20.55	20.55	20.55	78.07	3,7215	13680.0	**175.23**	100.13%		78.54	**174.00**	99.43%		**191.00**
	V6	P7	21/08/2025	18/09/2025	28	175.00	10.13	10.70	9.96	9.80	10.42	20.45	20.38	20.42	85.19	3,7195	15508.0	**182.03**	104.02%	**109.34%**	78.54	**197.00**	112.57%	111.84%	**200.00**
	V6	P8	21/08/2025	18/09/2025	28	175.00	10.09	10.03	9.93	9.80	10.06	20.52	20.53	20.53	79.49	3,7245	15874.0	**199.71**	114.12%		78.54	**202.00**	115.43%		**202.00**
	V6	P9	21/08/2025	18/09/2025	28	176.00	10.09	10.02	9.92	9.78	10.06	20.63	20.73	20.68	79.41	3,7690	15459.0	**194.68**	110.62%		78.54	**196.00**	111.36%		**213.00**
	V6	P10	21/08/2025	18/09/2025	28	175.00	10.13	10.05	9.96	9.84	10.00	20.67	20.75	20.71	78.46	3,8055	14913.0	**190.07**	108.61%		78.54	**189.00**	108.00%		**213.00**

PROCEDIMIENTO PARA EL REFORZAMIENTO A FLEXIÓN DE UNA VIGA DE CONCRETO ARMADO CON CFRP

PASO 1:	***CÁLCULO***

Cálculo de las Propiedades de diseño del sistema FRP.

La viga por ensayar estará situada en un espacio abierto, por lo que el factor de reducción debido a las condiciones de exposición es:

Factores de reducción ambiental para diversos sistemas de FRP y condiciones de exposición

Condiciones de exposición	Tipo de fibra	Factor de reducción ambiental
Exposición interior	Carbono	0.95
	Vidrio	0.75
	Aramida	0.85
Exposición exterior (puentes, muelles y estacionamientos no cerrados)	**Carbono**	**0.85**
	Vidrio	0.65
	Aramida	0.75
Entorno agresivo (plantas químicas y plantas para el tratamiento de aguas residuales)	Carbono	0.85
	Vidrio	0.50
	Aramida	0.70

$$f_{fu} = C_E * f_{fu}{}^*$$

$f_{fu} = Resistencia\ a\ la\ tracción\ última$

$C_E = Factor\ de\ reducción\ ambiental$

$f_{fu}{}^* = Resistencia\ a\ la\ tracción\ última$

$$\varepsilon_{fu} = C_E * \varepsilon_{fu}{}^*$$

$\varepsilon_{fu} = Deformación\ de\ ruptura\ de\ diseño\ de\ la\ fibra\ de\ carbono$

$\varepsilon_{fu}{}^* = Deformación\ de\ ruptura$

$$C_E = 0.85$$

$$f_{fu}{}^* = 0.96\ \frac{kN}{mm^2}$$

$$f_{fu} = C_E * f_{fu}$$

$$f_{fu} = 0.85 * 0.96\ \frac{kN}{mm^2}$$

$$f_{fu} = 0.816\ \frac{kN}{mm^2}$$

$$\varepsilon_{fu}{}^* = 0.0133\ \frac{mm}{mm}$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E * \varepsilon_{fu}{}^*$$

$$\varepsilon_{fu} = 0.85 * 0.0133\ \frac{mm}{mm}$$

$$\varepsilon_{fu} = 0.0113\ \frac{mm}{mm}$$

PASO 2:

Cálculo preliminar de las Propiedades del concreto

$$\beta_1 = 0.85$$

$$E_c = 15100 * \sqrt{f'c}$$

$$E_c = 15100 * \sqrt{175}$$

$$E_c = 199754.22\ \frac{Kgf}{cm^2}$$

$$A_s = 1.01\ cm^2$$

$$A_f = 50\ mm^2$$

PASO 3:

Estado de deformación existente en cara inferior

$M_{DL} = 2400$ kg-cm

$d_f = 20$ cm

En este paso, se calcula suponiendo que la viga está agrietada y que las cargas muertas que actúan sobre ella son las que aparecen al instalar la fibra de carbono. $$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL} * (d_f - k * d)}{I_{cr} * E_c}$$	k = 0.32981 d = 17.60 cm $I_{cr} = 2287.58\ cm^4$ $E_c = 218819.79\ kg/cm^2$ $\varepsilon_{bi} = 0.000082$
$\varepsilon_{bi} =$ *Deformación en el concreto al momento de colocar el CFRP* $M_{DL} =$ *Momento de carga muerta* $d_f =$ *Altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión* $k =$ *Proporción entre la profundidad del eje neutro de la viga y de la profundidad del refuerzo medido desde la fibra extrema a compresión.* $d =$ *Distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo CFRP* $I_{cr} =$ *Momento de inercia de la viga reforzada* $E_c =$ *Modulo de elasticidad del concreto*	
PASO 4: ***Coeficiente dependiente de adherencia del sistema de la fibra de carbono*** *Se calcula mediante la siguiente ecuación:* $$K_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}}\left(1 - \frac{nE_f t_f}{360000}\right) \le 0.90 & nE_f t_f \le 180000\ N/mm \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}}\left(\frac{90000}{nE_f t_f}\right) \le 0.90 & nE_f t_f > 180000\ N/mm \end{cases}$$ $n =$ *número de capas* $\varepsilon_{fu} =$ *Deformación de ruptura de diseño del refuerzo CFRP* $E_f =$ *Modulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP* $t_f =$ *Espesor nominal de una capa de fibra de carbono*	$n = 1\ capa$ $\varepsilon_{fu} = 0.0113\ mm/mm$ $E_f = 73.10\ kN/mm^2$ $t_f = 1.0\ mm$ $nE_f t_f = 73100000\ N/mm$ **$K_m = 0.001815112$**
PASO 5: ***Profundidad del eje neutro / Estimación de "C"*** *Una estimación razonable para empezar a iterar es C=0.20*d y este será ajustado hasta comprobar el equilibrio*	*C=0.20*d* ***C=3.52 cm… Valor recomendado para empezar iteración***
PASO 6: ***Determinar el nivel efectivo de deformación en el refuerzo de la fibra de carbono*** *Este paso identifica la deformación que alcanza la fibra de carbono, identificándose el modo de falla gobernante (aplastamiento del concreto o el desprendimiento de la fibra de carbono). Como el FRP suele gobernar la falla, el concreto no siempre llega a la deformación máxima de 0.003.*	$d_f = 20\ cm$ **c = 5.63 cm** $\varepsilon_{bi} = 0.000082$ $K_m = 0.001815112$ $\varepsilon_{fu} = 0.0113\ mm/mm$ $\varepsilon_{fe} = 0.00757 \le 0.00002$ **Sí cumple**

$$\varepsilon_{fe} = 0.003\left(\frac{d_f - c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq K_m \varepsilon_{fu}$$ $c =$ *Profundidad del eje neutro* $d_f =$ *Altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión* $\varepsilon_{bi} =$ *Deformación en el concreto al momento de colocar la fibra de carbo* $\varepsilon_{fu} =$ *Deformación de ruptura de diseño del refuerzo de la fibra de carbono* $K_m =$ *Coeficiente de adherencia* $$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_{bi})\left(\frac{c}{d_f - c}\right)$$	$\varepsilon_c = (0.01017 +$ $0.000069)\left(\frac{7.82\ cm.}{20\ cm. - 7.82\ c}\right.$ $\varepsilon_c = 0.0066$
PASO 7: ***Deformación en el acero de refuerzo existente*** *Se puede calcular utilizando triángulos similares, de acuerdo con la siguiente ecuación:* $$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi})\left(\frac{d - c}{d_f - c}\right)$$ $\varepsilon_{fe} =$ *Deformación efectiva del refuerzo de la fibra de carbono* $\varepsilon_{bi} =$ *Deformación inicial en el concreto al momento de colocar la fibra de carbono* $d =$ *Distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo CFRP* $c =$ *Profundidad del eje neutro* $d_f =$ *Altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión*	$\varepsilon_{fe} = 0.00757$ $\varepsilon_{bi} = 0.000082$ $c = 5.63$ cm d = 17.60 cm $d_f = 20\ cm$ $\varepsilon_s = 0.00637$
PASO 8: ***Nivel de resistencia en el refuerzo del acero estructural y la fibra de carbono*** *Se calculan utilizando las siguientes ecuaciones:* $$f_s = E_s\varepsilon_s \leq f_y$$ $$f_{fe} = E_f\varepsilon_{fe}$$ $E_s =$ *Modulo de elasticidad del acero* $\varepsilon_s =$ *Deformación del acero de refuerzo* $f_y =$ *Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo* $E_f =$ *Modulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP* $\varepsilon_{fe} =$ *Deformación efectiva del refuerzo CFRP alcanzada en la falla*	$E_s = 2039000\ kg/\text{cm}^2$ $\varepsilon_s = 0.00637$ $f_y = 4280\ kg/\text{cm}^2$ $E_f = 745412.55\ kg/\text{cm}^2$ $\varepsilon_{fe} = 0.00757$ $f_s = 12991.83919 \geq 4280\ kg/\text{cm}^2$ $f_{fe} = E_f\varepsilon_{fe}$ $f_{fe} = 5641.00 kg/\text{cm}^2$
PASO 9: ***Cálculo de las fuerzas internas y comprobar equilibrio*** *Se calculan utilizando la siguiente ecuación:*	$A_s = 1.005\ \text{cm}^2$ $A_f = 0.50\ \text{cm}^2$ $f_{fe} = 5641\ kg/\text{cm}^2$

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f_c \beta_1 b}$$ $c =$ *Profundidad del eje neutro* $A_s =$ *Área de acero de refuerzo* $f_s =$ *Esfuerzo del acero de refuerzo* $A_f =$ *Área del refuerzo de la fibra de carbono* $f_{fe} =$ *Esfuerzo efectivo del refuerzo de la fibra de carbono en la seccion de la falla* $\alpha_1 =$ *Factor de la resistencia de concreto* $(f'c)$ *asociado con el bloque de esfuerzos* $f'_c =$ *Resistencia a la compresión del concreto* $\beta_1 =$ *Relación entre la altura del bloque equivalente de compresión y la altura del eje neutro* $b =$ *Ancho de la cara a compresión de la sección a estudiar* ***Los pasos de 6 a 9 se repitieron con diferentes valores de "c" hasta alcanzar el equilibrio. Por lo tanto, el valor definitivo es 5.63 cm***	$\alpha_1 = 0.85$ $f'_c = 175\ kg/\text{cm}^2$ $\beta_1 = 0.85$ $b = 10\ cm$ $$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f_c \beta_1 b}$$ $c = 5.63\ cm.$
PASO 10: ***Cálculo de los componentes de la resistencia de diseño a flexión de la viga*** *La resistencia a la flexión de diseño se calcula de acuerdo con la ecuación que veremos a continuación. Además, se aplica un factor de reducción al sistema de la fibra de carbono.* *Momento nominal resistente que proporciona el acero estructural* $$M_{ns} = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2}\right)$$ $A_s =$ *Área de acero de refuerzo* $f_s =$ *Esfuerzo del acero de refuerzo* $d =$ *Distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo CFRP* $\beta_1 =$ *Relación entre la altura del bloque equivalente de compresión y la altura del eje neutro* $c =$ *Profundidad del eje neutro* *Momento nominal resistente que proporciona la fibra de carbo* $$M_{nf} = A_s f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2}\right)$$ $A_s =$ *Área de acero de refuerzo* $f_{fe} =$ *Esfuerzo efectivo del refuerzo de la fibra de carbono en la seccion de la falla* $d_f =$ *Altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión* $\beta_1 =$ *Relación entre la altura del bloque equivalente de compresión y la altura del eje neutro* $c =$ *Profundidad del eje neutro*	$A_s = 1.005\ \text{cm}^2$ $f_{fe} = 3431.24\ kg/\text{cm}^2$ $d = 17.60\ cm$ $d_f = 20\ cm$ $\beta_1 = 0.85$ $c = 5.63\ cm$ $M_{ns} = 65425.69\ kg - cm$ $M_{nf} = 49656.67 kg - cm$

PASO 11: ***Cálculo de la resistencia a la flexión de la viga (Momento nominal resistente del sistema FRP)*** *Se calcula mediante la siguiente expresión, tomando en cuenta el factor de reducción de resistencia.* $Momento\ nominal\ resistente\ que\ proporciona\ el\ sistema\ FRP$ $\varphi M_n = \varphi[M_{ns} + \psi_f M_{nf}]$ $\varphi =$ $Factor\ de\ reducción\ de\ resistencia$ $del\ elemento\ estructural$ $\psi_f =$ $Factor\ de\ reducción\ de\ resistencia$ $del\ refuerzo\ de\ la\ fibra\ de\ carbono\ para\ flexión$ $M_{ns} =$ $Momento\ nominal\ resistente\ que\ proporciona\ el\ acero\ estructural$ $M_{nf} = Momento\ nominal\ resistente\ que\ proporciona\ la\ fibra\ de\ carbono$ $Factor\ de\ reducción\ de\ resistencia\ del\ elemento\ estructural$ $\varphi = \begin{cases} 0.90\ para\ \varepsilon_s \geq 0.005 \\ 0.65 + \frac{0.25(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}}\ para\ \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0.005 \\ 0.65\ para\ \varepsilon_s < \varepsilon_{sy} \end{cases}$ $Diseño\ de\ resistencia\ a\ la\ flexión$ $\varphi M_n \geq M_u$ $\varphi M_n = Resistencia\ nominal\ a\ la\ flexión\ multiplicada\ por\ el\ factor\ de\ reducción$ $M_u = Momento\ calculado\ a\ partir\ de\ cargas\ amplificadas$	$\varphi = 0.90$ $\psi_f = 0.85$ $M_{ns} = 138024.35\ kg - cm$ $M_{nf} = 28610.92\ kg - cm$ $\boldsymbol{\varphi M_n}$ $\mathbf{968.70}\ kg - m$ $\boldsymbol{\varphi M_n} \geq M_u$ $\mathbf{968.70}\ kg - m \geq 695.05\ kg - m$ ... ***Si resiste***
PASO 12: ***Verificación de los esfuerzos de servicio en el refuerzo del acero y la fibra de carbono*** *Calculamos la profundidad elástica hasta el E.N. agrietado:* $k = \sqrt{(\rho_s n_s + \rho_f n_f)^2 + 2(\rho_s n_s + \rho_f n_f * \left(\frac{d_f}{d}\right))} - \rho_s n_s + \rho_f n_f$ $k * d$	$\rho_s = 0.0084$ $n_s = 10.21$ $\rho_f = 0.002841$ $n_f = 3.73$ $d_f = 20\ cm$ $d = 17.60\ cm$ $k = 0.35657$

$\rho_s =$ *Cuantía del acero estructural* $n_s =$ *Relación entre el módulo de elasticidad del acero y del concreto* $\rho_f =$ *Cuantía de la fibra de carbono* $n_f =$ *Relación entre el módulo de elasticidad de las fibra de carbono y del concreto* $d_f =$ *Altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión* $d =$ *Distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo CFRP* *Calculamos el nivel de esfuerzo en el acero, utilizando la ecuación:* $$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3}\right)\right](d - kd)E_s}{A_s E_s(d - \frac{kd}{3})(d - kd) + A_f E_f (d_f - \frac{kd}{3})(d_f - kd)}$$ $M_s =$ *Momento de servicio* $\varepsilon_{bi} =$ *Deformación unitaria inicial en el concreto al momento de colocar el CFRP* $A_f =$ *Área del refuerzo de la fibra de carbono* $E_f =$ *Módulo de elasticidad a tensión de refuerzo CFRP* $d_f =$ *Altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión* $k =$ *Proporción entre la profundidad del refuerzo desde la fibra extrema a compresión y la profundidad del eje neutro* $d =$ *Distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo CFRP* $E_s =$ *Modulo de elasticidad del acero* $A_s =$ *Área de acero de refuerzo* $f_{s,s} \leq 0.80\, f_y$	$k * d = 6.28\ cm.$ $f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \right.}{A_s E_s(d - \frac{kd}{3})(d - kd)}$ $f_{s,s} = 3192.03$ $f_{s,s} \leq 0.80\, f_y$ $f_{s,s} \leq 0.80 * 4280\ kg/\text{cm}^2$ $3192.03\ kg/\text{cm}^2 \leq 3424.00\ kg/\text{cm}^2$ ***El nivel de esfuerzo en el acero está dentro del limite***
PASO 13: ***Verificación del límite de ruptura por fluencia en servicio de la fibra de carbono.*** *Se aplica la ecuación y se verifica que el valor sea inferior al límite de tensión de ruptura por fluencia:*	$f_{f,s} = 1868.11 kg/\text{cm}^2$ *Límite de carga sostenida mas cíclica* $= 4576.49\ kg/\text{cm}^2$

$$f_{f,s} = f_{s,s}\left(\frac{E_f}{E_s}\right)\left(\frac{d_f - kd}{d - kd}\right) - \varepsilon_{bi}E_f$$

Para el sistema de la fibra de carbono, el límite de esfuerzo (suma de carga sostenida y cíclica)

$$Límite\ de\ carga\ sostenida\ mas\ cíclica = 0.55 * f_{fu}$$

El esfuerzo en la fibra de carbono está dentro del límite permisible.

DETALLE DEL REFUERZO DE LA FIBRA DE CARBONO

La capacidad de adherencia de la fibra de carbono se desarrolla a lo largo de una longitud critica. La longitud de anclaje de la fibra de carbono debe superar el valor dado por la siguiente ecuación:

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n\,E_f\,t_f}{\sqrt{f'_c}}}$$

$n = 1\ capa$
$f'_c = 175\ kg/\text{cm}^2$
$E_f = 7454.126\ kg/\text{cm}^2$
$t_f = 1.00\ mm$

$l_{df} = 75.07\ mm$
$l_{df} = 7.51\ cm$

Para vigas simplemente apoyada, la fibra de carbono será colocada a lo largo de la luz de la viga en estudio, procurando que los extremos de la fibra de carbono finalicen lo más cercano posible a los apoyos

CARGA DE FALLA CON REFORZAMIENTO - teórico:

Momento nominal resistente del sistema FRP:

ΦMn	968.70	kg-m
Φ	0.9	
Mn	1076.34	kg-m

Cálculo de la carga de agrietamiento, despejando P de la ecuación anterior

l	2.00	m
w	48	kg/m

$$M = \frac{Pfalla * L}{4} + \frac{wL^2}{8}$$

Despejamos P:

Carga de agrietamiento de falla (P falla)

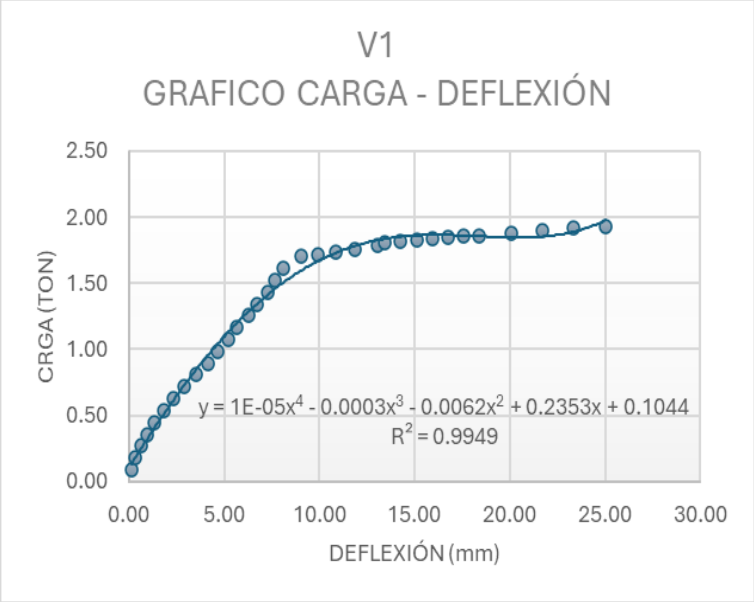
2105 **Kg**

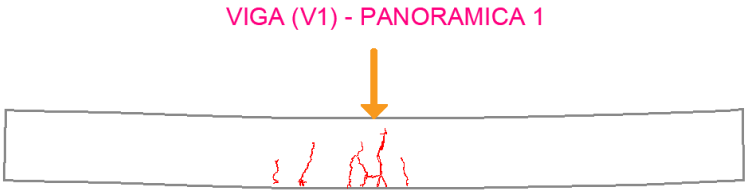
2.10 Tn

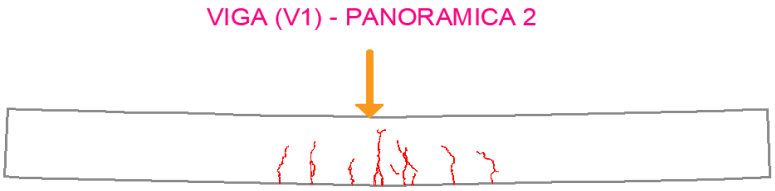
Nota: El procedimiento de cálculo mostrado corresponde a una resistencia específica del concreto. El mismo procedimiento fue aplicado para cada una de las resistencias obtenidas mediante el ensayo de ultrasonido.

Anexo L Registro de Deformaciones y Carga de Rotura

V1 / VIGA SIN REFUERZO CFRP			
PSI	Carga (TON)	DEFLEXIÓN (MM)	MOMENTO FLECTOR (TON-M)
50	0.09	0.113	0.069
100	0.18	0.316	0.114
150	0.27	0.616	0.159
200	0.36	0.923	0.204
250	0.45	1.325	0.249
300	0.54	1.832	0.294
350	0.63	2.353	0.339
400	0.72	2.915	0.384
450	0.81	3.517	0.429
500	0.90	4.114	0.474
550	0.99	4.622	0.519
600	1.07	5.213	0.559
650	1.16	5.658	0.604
700	1.25	6.308	0.649
750	1.34	6.737	0.694
800	1.43	7.309	0.739
850	1.52	7.654	0.784
900	1.61	8.096	0.829
950	1.70	9.058	0.874
960	1.72	9.905	0.884
970	1.74	10.867	0.894
980	1.76	11.865	0.904
1000	1.79	13.058	0.919
1010	1.81	13.449	0.929
1015	1.82	14.274	0.934
1020	1.83	15.099	0.939
1025	1.84	15.924	0.944
1030	1.84	16.749	0.944
1035	1.85	17.574	0.949
1040	1.86	18.399	0.954
1050	1.88	20.050	0.964
1060	1.90	21.700	0.974
1070	1.92	23.350	0.984
1080	1.93	25.000	0.989

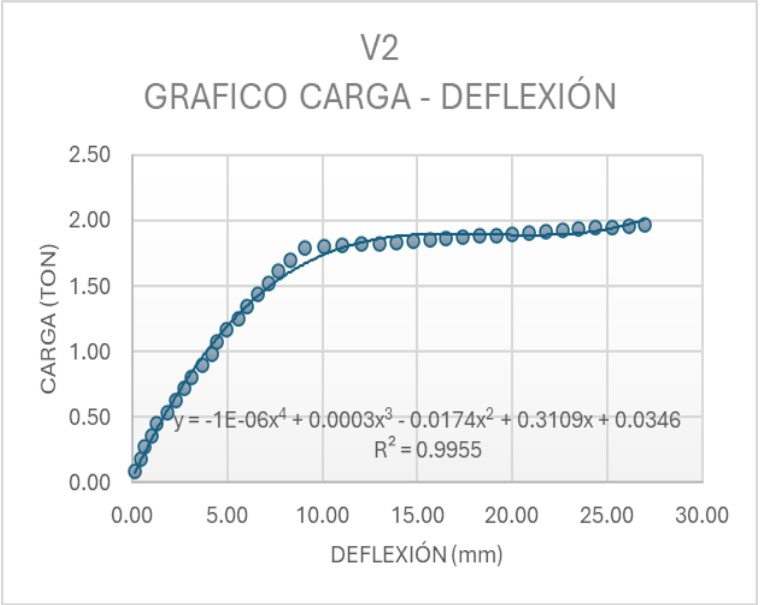


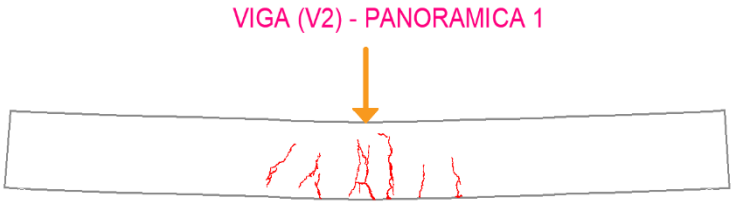


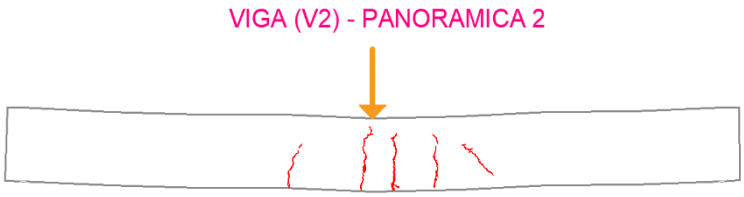




V2 / VIGA SIN REFUERZO CFRP			
PSI	Carga (TON)	DEFLEXIÓN (MM)	MOMENTO FLECTOR (TON-M)
50	0.09	0.121	0.069
100	0.18	0.427	0.114
150	0.27	0.655	0.159
200	0.36	1.032	0.204
250	0.45	1.302	0.249
300	0.54	1.841	0.294
350	0.63	2.273	0.339
400	0.72	2.709	0.384
450	0.81	3.089	0.429
500	0.90	3.669	0.474
550	0.99	4.171	0.519
600	1.07	4.429	0.559
650	1.16	4.982	0.604
700	1.25	5.577	0.649
750	1.34	6.021	0.694
800	1.43	6.634	0.739
850	1.52	7.156	0.784
900	1.61	7.699	0.829
950	1.70	8.325	0.874
1000	1.79	9.095	0.919
1005	1.80	10.080	0.924
1010	1.81	11.065	0.929
1015	1.82	12.050	0.934
1020	1.83	13.035	0.939
1025	1.84	13.908	0.944
1030	1.84	14.781	0.944
1035	1.85	15.653	0.949
1040	1.86	16.526	0.954
1045	1.87	17.399	0.959
1050	1.88	18.272	0.964
1055	1.89	19.145	0.969
1060	1.90	20.018	0.974
1065	1.91	20.890	0.979
1070	1.92	21.763	0.984
1075	1.93	22.636	0.989
1080	1.93	23.509	0.989
1085	1.94	24.382	0.994
1090	1.95	25.254	0.999
1095	1.96	26.127	1.004
1100	1.97	27.000	1.009

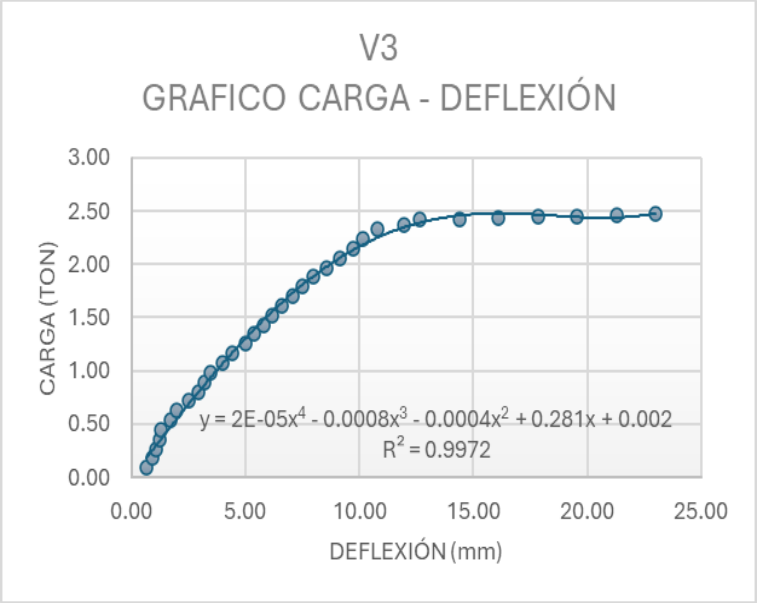


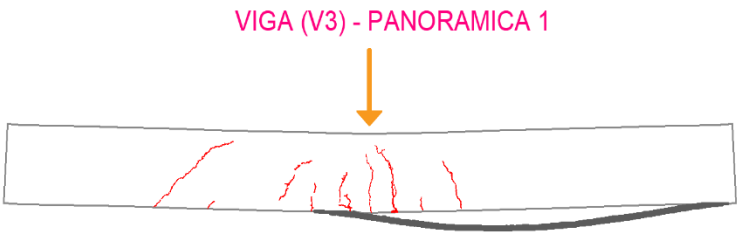


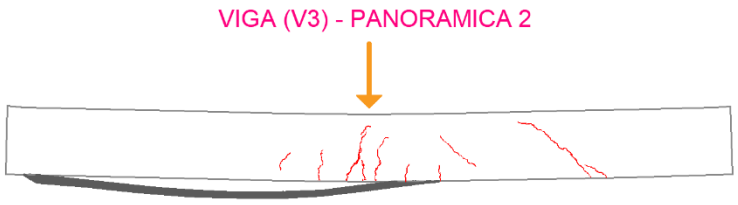


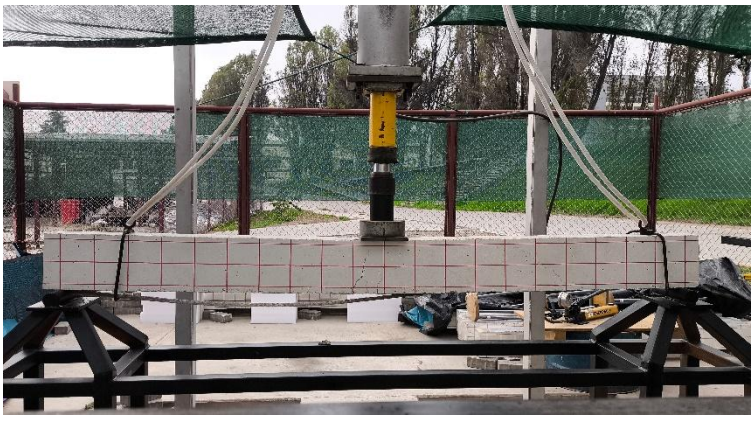


V3 / REFORZADA CON CFRP (LÁMINA LONGITUDINAL)			
PSI	Carga (TON)	DEFLEXIÓN (MM)	MOMENTO FLECTOR (TON-M)
50	0.09	0.640	0.069
100	0.18	0.890	0.114
150	0.27	1.056	0.159
200	0.36	1.236	0.204
250	0.45	1.298	0.249
300	0.54	1.703	0.294
350	0.63	1.994	0.339
400	0.72	2.476	0.384
450	0.81	2.939	0.429
500	0.90	3.173	0.474
550	0.99	3.481	0.519
600	1.07	3.975	0.559
650	1.16	4.399	0.604
700	1.25	4.983	0.649
750	1.34	5.352	0.694
800	1.43	5.812	0.739
850	1.52	6.173	0.784
900	1.61	6.600	0.829
950	1.70	7.055	0.874
1000	1.79	7.479	0.919
1050	1.88	7.989	0.964
1100	1.97	8.548	1.009
1150	2.06	9.119	1.054
1200	2.15	9.721	1.099
1250	2.24	10.159	1.144
1300	2.33	10.783	1.189
1320	2.36	11.956	1.204
1350	2.42	12.643	1.234
1355	2.43	14.369	1.239
1360	2.44	16.095	1.244
1365	2.44	17.822	1.244
1370	2.45	19.548	1.249
1375	2.46	21.274	1.254
1380	2.47	23.000	1.259

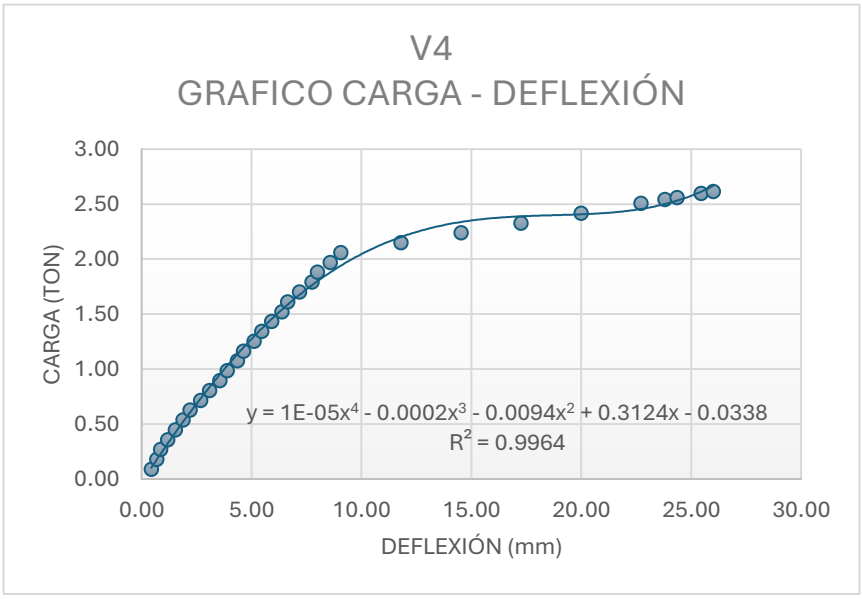




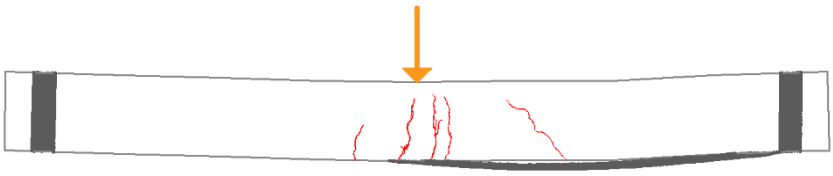




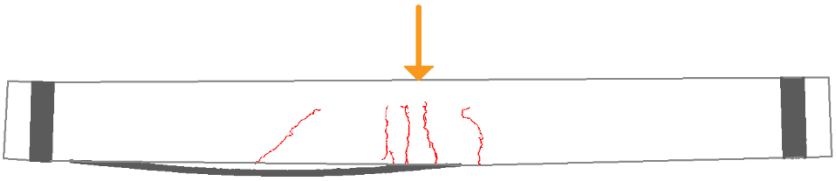
V4 / REFORZADA CON CFRP (LÁMINA LONGITUDINAL + 2U)			
PSI	Carga (TON)	DEFLEXIÓN (MM)	MOMENTO FLECTOR (TON-M)
50	0.09	0.442	0.069
100	0.18	0.685	0.114
150	0.27	0.869	0.159
200	0.36	1.188	0.204
250	0.45	1.542	0.249
300	0.54	1.883	0.294
350	0.63	2.209	0.339
400	0.72	2.682	0.384
450	0.81	3.093	0.429
500	0.90	3.558	0.474
550	0.99	3.895	0.519
600	1.07	4.353	0.559
650	1.16	4.629	0.604
700	1.25	5.112	0.649
750	1.34	5.459	0.694
800	1.43	5.923	0.739
850	1.52	6.378	0.784
900	1.61	6.647	0.829
950	1.70	7.179	0.874
1000	1.79	7.752	0.919
1050	1.88	8.004	0.964
1100	1.97	8.588	1.009
1150	2.06	9.065	1.054
1200	2.15	11.796	1.099
1250	2.24	14.528	1.144
1300	2.33	17.259	1.189
1350	2.42	19.991	1.234
1400	2.51	22.722	1.279
1420	2.54	23.815	1.294
1430	2.56	24.361	1.304
1450	2.60	25.454	1.324
1460	2.61	26.000	1.329



VIGA (V4) - PANORAMICA 1

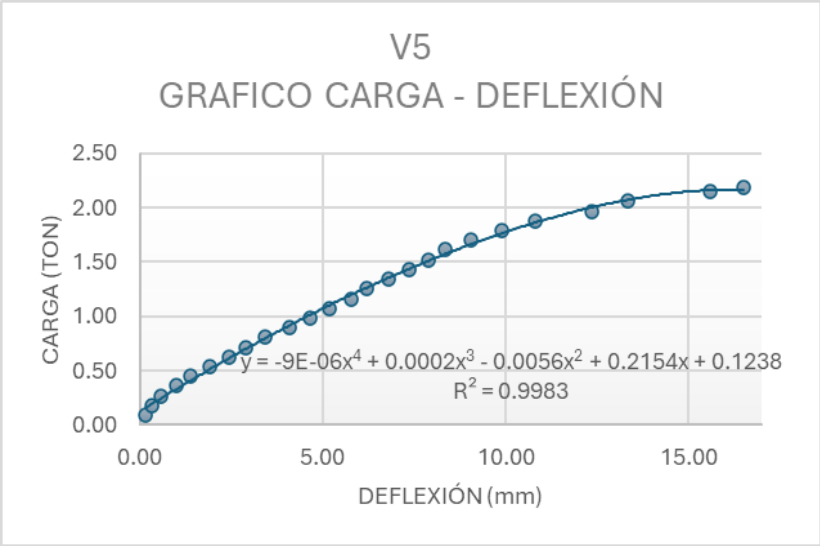


VIGA (V4) - PANORAMICA 2

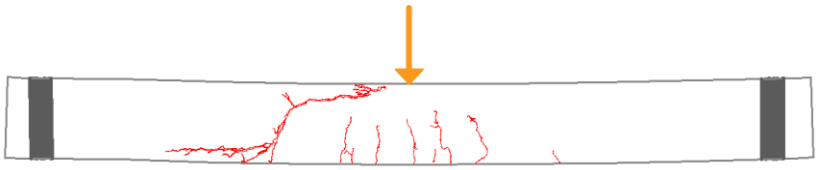




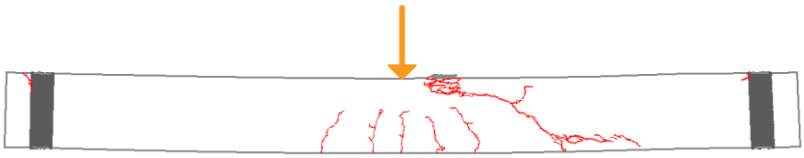
V5 / REFORZADA CON CFRP (LÁMINA LONGITUDINAL + 2U)			
PSI	Carga (TON)	DEFLEXIÓN (MM)	MOMENTO FLECTOR (TON-M)
50	0.09	0.141	0.069
100	0.18	0.308	0.114
150	0.27	0.555	0.159
200	0.36	0.992	0.204
250	0.45	1.386	0.249
300	0.54	1.891	0.294
350	0.63	2.445	0.339
400	0.72	2.899	0.384
450	0.81	3.405	0.429
500	0.90	4.082	0.474
550	0.99	4.632	0.519
600	1.07	5.179	0.559
650	1.16	5.773	0.604
700	1.25	6.203	0.649
750	1.34	6.794	0.694
800	1.43	7.369	0.739
850	1.52	7.883	0.784
900	1.61	8.351	0.829
950	1.70	9.044	0.874
1000	1.79	9.903	0.919
1050	1.88	10.816	0.964
1100	1.97	12.364	1.009
1150	2.06	13.351	1.054
1200	2.15	15.600	1.099
1220	2.18	16.500	1.114



VIGA (V5) - PANORAMICA 1

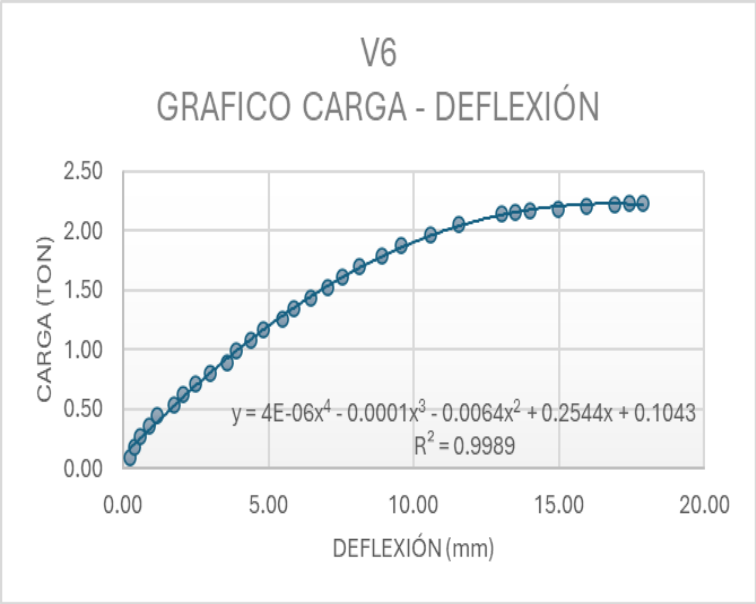


VIGA (V5) - PANORAMICA 2

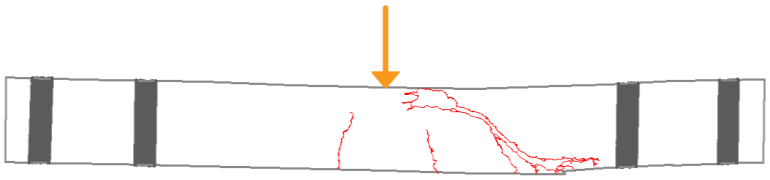




V6 / REFORZADA CON CFRP (LÁMINA LONGITUDINAL + 4U)			
PSI	Carga (TON)	DEFLEXIÓN (MM)	MOMENTO FLECTOR (TON-M)
50	0.09	0.226	0.069
100	0.18	0.393	0.114
150	0.27	0.577	0.159
200	0.36	0.895	0.204
250	0.45	1.166	0.249
300	0.54	1.747	0.294
350	0.63	2.072	0.339
400	0.72	2.481	0.384
450	0.81	3.004	0.429
500	0.90	3.563	0.474
550	0.99	3.88	0.519
600	1.07	4.384	0.559
650	1.16	4.828	0.604
700	1.25	5.472	0.649
750	1.34	5.89	0.694
800	1.43	6.472	0.739
850	1.52	7.041	0.784
900	1.61	7.539	0.829
950	1.70	8.12	0.874
1000	1.79	8.896	0.919
1050	1.88	9.564	0.964
1100	1.97	10.594	1.009
1150	2.06	11.533	1.054
1200	2.15	13.015	1.099
1205	2.16	13.504	1.104
1210	2.17	13.992	1.109
1220	2.18	14.969	1.114
1230	2.20	15.946	1.124
1240	2.22	16.923	1.134
1245	2.23	17.412	1.139
1250	2.24	17.900	1.144



VIGA (V6) - PANORAMICA 1

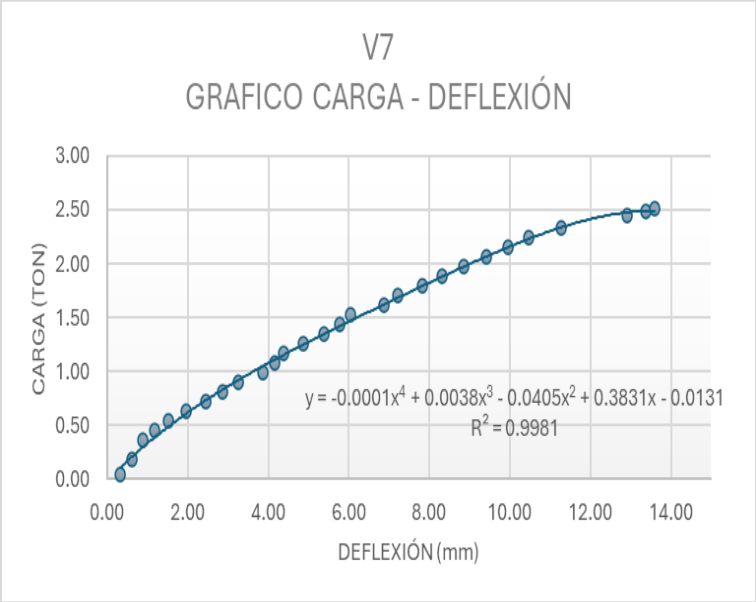


VIGA (V6) - PANORAMICA 2





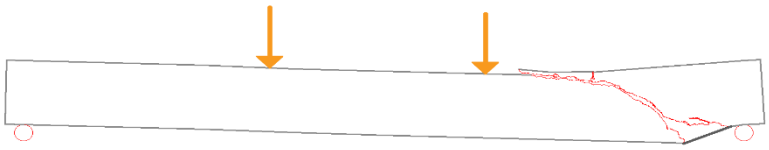
V7 / REFORZADA CON CFRP (LÁMINA LONGITUDINAL)			
PSI	Carga (TON)	DEFLEXIÓN (MM)	MOMENTO FLECTOR (TON-M)
20	0.04	0.329	0.038
100	0.18	0.625	0.087
200	0.36	0.885	0.150
250	0.45	1.165	0.182
300	0.54	1.526	0.213
350	0.63	1.947	0.245
400	0.72	2.443	0.276
450	0.81	2.853	0.308
500	0.90	3.258	0.339
550	0.99	3.871	0.371
600	1.07	4.169	0.399
650	1.16	4.389	0.430
700	1.25	4.865	0.462
750	1.34	5.371	0.493
800	1.43	5.778	0.525
850	1.52	6.032	0.556
900	1.61	6.864	0.588
950	1.70	7.214	0.619
1000	1.79	7.825	0.651
1050	1.88	8.312	0.682
1100	1.97	8.851	0.714
1150	2.06	9.405	0.745
1200	2.15	9.950	0.777
1250	2.24	10.465	0.808
1300	2.33	11.284	0.840
1370	2.45	12.905	0.882
1390	2.49	13.368	0.896
1400	2.51	13.600	0.903



VIGA (V7) - PANORAMICA 1

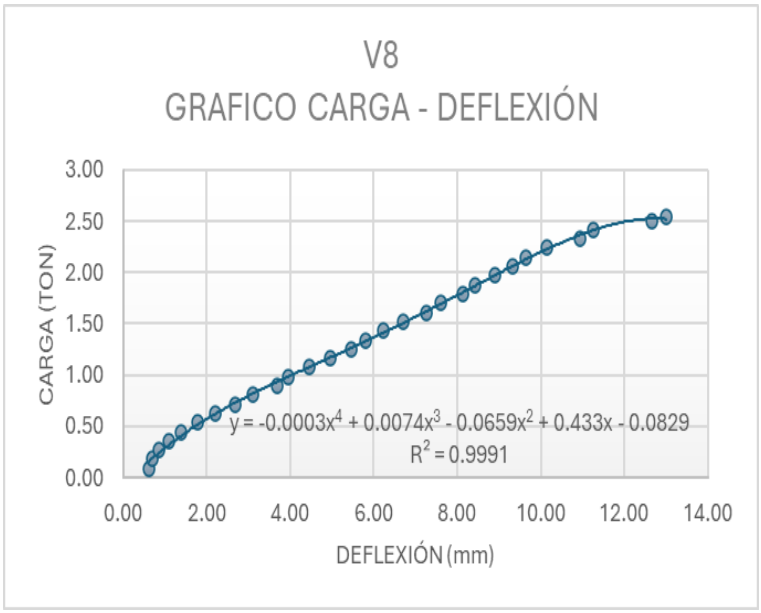


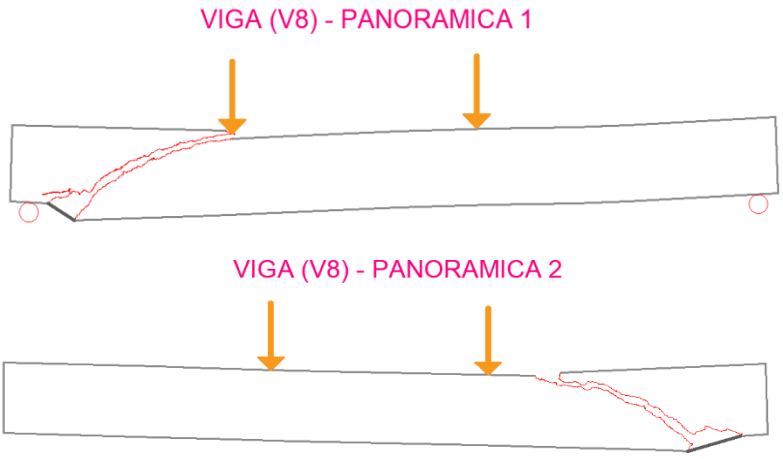
VIGA (V7) - PANORAMICA 2

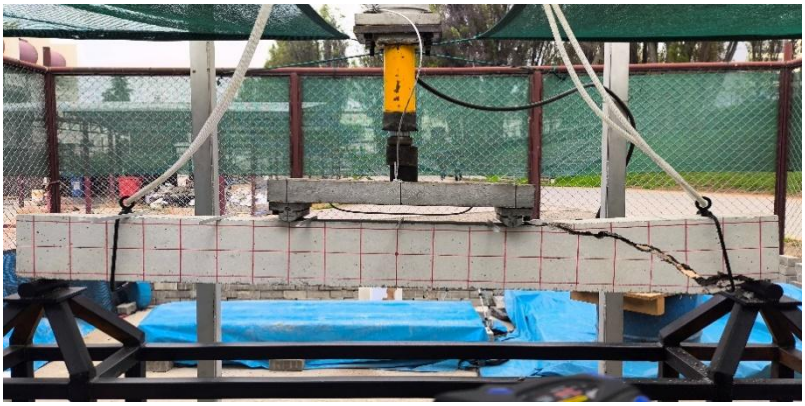




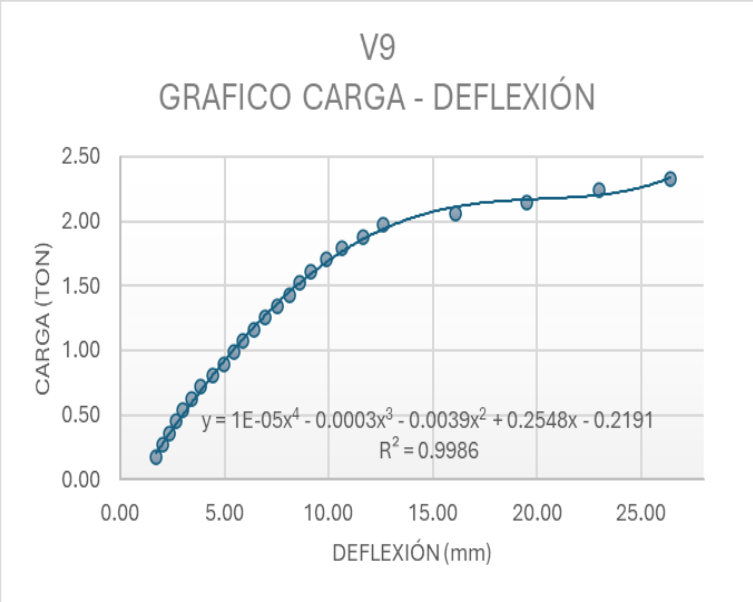
V8 / REFORZADA CON CFRP (LÁMINA LONGITUDINAL)			
PSI	Carga (TON)	DEFLEXIÓN (MM)	MOMENTO FLECTOR (TON-M)
50	0.09	0.603	0.056
100	0.18	0.698	0.087
150	0.27	0.861	0.119
200	0.36	1.097	0.150
250	0.45	1.369	0.182
300	0.54	1.781	0.213
350	0.63	2.198	0.245
400	0.72	2.677	0.276
450	0.81	3.101	0.308
500	0.90	3.682	0.339
550	0.99	3.956	0.371
600	1.07	4.445	0.399
650	1.16	4.967	0.430
700	1.25	5.445	0.462
750	1.34	5.802	0.493
800	1.43	6.220	0.525
850	1.52	6.699	0.556
900	1.61	7.252	0.588
950	1.70	7.614	0.619
1000	1.79	8.128	0.651
1050	1.88	8.419	0.682
1100	1.97	8.908	0.714
1150	2.06	9.312	0.745
1200	2.15	9.642	0.777
1250	2.24	10.156	0.808
1300	2.33	10.932	0.840
1350	2.42	11.249	0.871
1400	2.51	12.671	0.903
1420	2.54	13.000	0.913



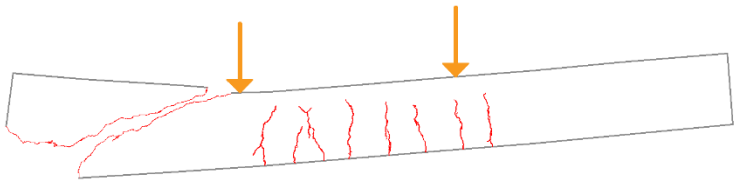




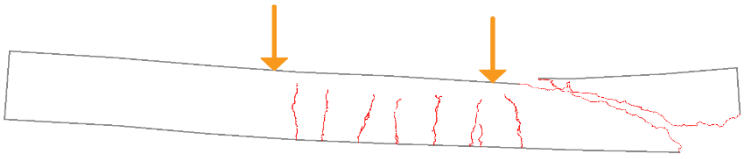
V9 / VIGA SIN REFUERZO CFRP			
PSI	Carga (TON)	DEFLEXIÓN (MM)	MOMENTO FLECTOR (TON-M)
100	0.18	1.737	0.087
150	0.27	2.050	0.119
200	0.36	2.362	0.15
250	0.45	2.675	0.182
300	0.54	2.987	0.213
350	0.63	3.427	0.245
400	0.72	3.866	0.276
450	0.81	4.433	0.308
500	0.90	4.999	0.339
550	0.99	5.451	0.371
600	1.07	5.902	0.399
650	1.16	6.418	0.43
700	1.25	6.933	0.462
750	1.34	7.527	0.493
800	1.43	8.120	0.525
850	1.52	8.622	0.556
900	1.61	9.123	0.588
950	1.70	9.885	0.619
1000	1.79	10.646	0.651
1050	1.88	11.637	0.682
1100	1.97	12.627	0.714
1150	2.06	16.070	0.745
1200	2.15	19.514	0.777
1250	2.24	22.957	0.808
1300	2.33	26.400	0.840



VIGA (V9) - PANORAMICA 1

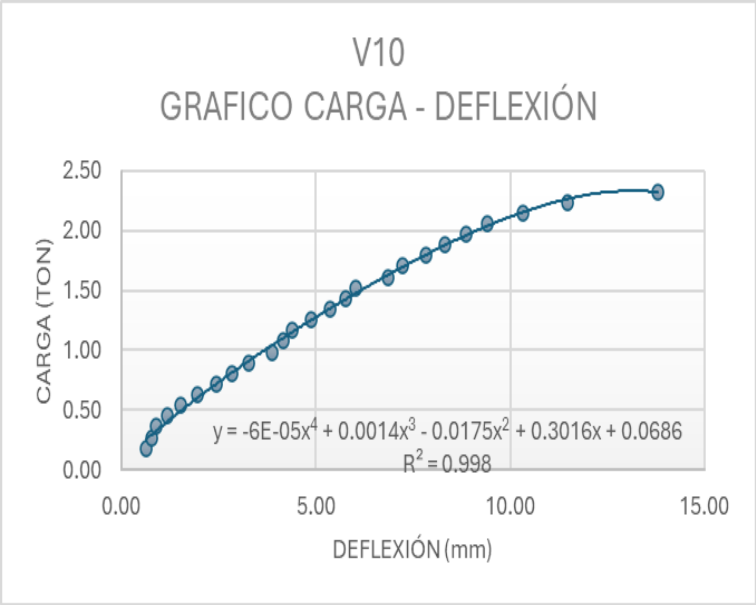


VIGA (V9) - PANORAMICA 2





V10 / REFORZADA CON CFRP (LÁMINA LONGITUDINAL)			
PSI	Carga (TON)	DEFLEXIÓN (MM)	MOMENTO FLECTOR (TON-M)
100	0.18	0.625	0.087
150	0.27	0.785	0.119
200	0.36	0.885	0.150
250	0.45	1.165	0.182
300	0.54	1.526	0.213
350	0.63	1.947	0.245
400	0.72	2.443	0.276
450	0.81	2.853	0.308
500	0.90	3.258	0.339
550	0.99	3.871	0.371
600	1.07	4.169	0.399
650	1.16	4.389	0.43
700	1.25	4.865	0.462
750	1.34	5.371	0.493
800	1.43	5.778	0.525
850	1.52	6.032	0.556
900	1.61	6.864	0.588
950	1.70	7.214	0.619
1000	1.79	7.825	0.651
1050	1.88	8.312	0.682
1100	1.97	8.851	0.714
1150	2.06	9.405	0.745
1200	2.15	10.315	0.777
1250	2.24	11.465	0.808
1300	2.33	13.800	0.840



VIGA (V10) - PANORAMICA 1

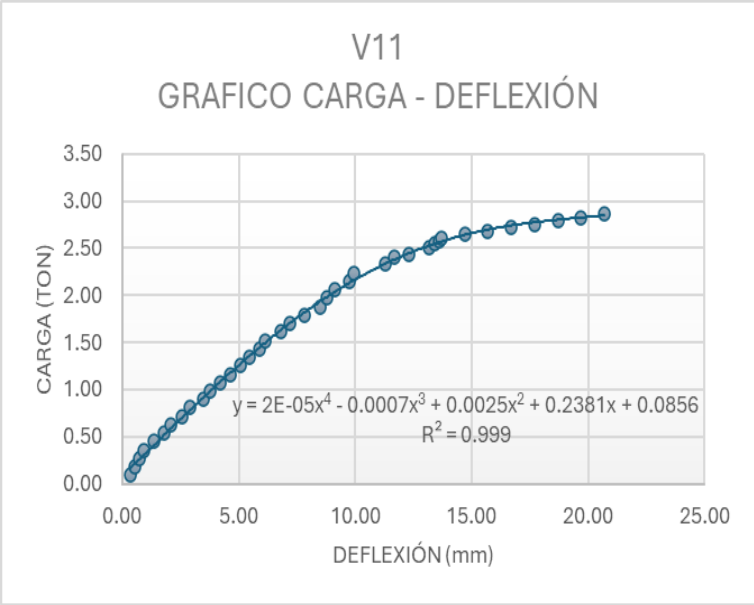


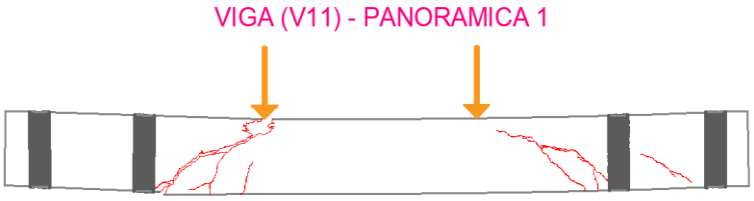
VIGA (V10) - PANORAMICA 2

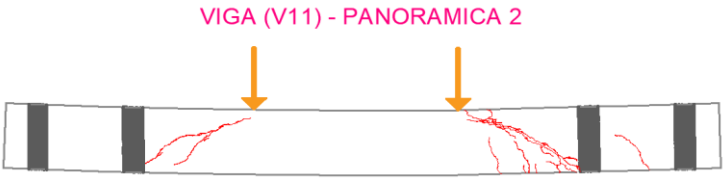




V11 / REFORZADA CON CFRP (LÁMINA LONGITUDINAL + 4U)			
PSI	Carga (TON)	DEFLEXIÓN (MM)	MOMENTO FLECTOR (TON-M)
50	0.09	0.324	0.056
100	0.18	0.536	0.087
150	0.27	0.735	0.119
200	0.36	0.933	0.150
250	0.45	1.378	0.182
300	0.54	1.769	0.213
350	0.63	2.085	0.245
400	0.72	2.561	0.276
450	0.81	2.913	0.308
500	0.90	3.46	0.339
550	0.99	3.773	0.371
600	1.07	4.218	0.399
650	1.16	4.618	0.430
700	1.25	5.073	0.462
750	1.34	5.462	0.493
800	1.43	5.901	0.525
850	1.52	6.125	0.556
900	1.61	6.823	0.588
950	1.70	7.208	0.619
1000	1.79	7.811	0.651
1050	1.88	8.471	0.682
1100	1.97	8.768	0.714
1150	2.06	9.111	0.745
1200	2.15	9.755	0.777
1250	2.24	9.951	0.808
1300	2.33	11.276	0.840
1340	2.40	11.651	0.864
1360	2.44	12.304	0.878
1400	2.51	13.157	0.903
1420	2.54	13.425	0.913
1440	2.58	13.626	0.927
1460	2.61	13.698	0.938
1480	2.65	14.698	0.952
1500	2.69	15.699	0.966
1520	2.72	16.699	0.977
1540	2.76	17.699	0.990
1560	2.79	18.699	1.001
1580	2.83	19.700	1.015
1600	2.87	20.7	1.029









V12 / REFORZADA CON CFRP (LÁMINA LONGITUDINAL + 2U)			
PSI	Carga (TON)	DEFLEXIÓN (MM)	MOMENTO FLECTOR (TON-M)
50	0.09	0.253	0.056
100	0.18	0.433	0.087
150	0.27	0.632	0.119
200	0.36	0.945	0.15
250	0.45	1.155	0.182
300	0.54	1.559	0.213
350	0.63	1.928	0.245
400	0.72	2.519	0.276
450	0.81	2.916	0.308
500	0.90	3.396	0.339
550	0.99	3.795	0.371
600	1.07	4.198	0.399
650	1.16	4.629	0.43
700	1.25	5.099	0.462
750	1.34	5.434	0.493
800	1.43	6.123	0.525
850	1.52	6.450	0.556
900	1.61	6.862	0.588
950	1.70	7.277	0.619
1000	1.79	7.940	0.651
1050	1.88	8.301	0.682
1100	1.97	8.942	0.714
1150	2.06	9.330	0.745
1200	2.15	9.981	0.777
1250	2.24	10.449	0.808
1290	2.31	11.400	0.833

