

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**SISTEMAS COMPUESTOS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON
FIBRA PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO MECÁNICO DE
ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE CONCRETO**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTADO POR:

Bach. BOTONERO BARRIENTOS, CHRISTIAN DIEGO ALONSO

Bach. ROJAS LIBIA, CARLOS ALONZO

ASESORA: Mg. Ing. CHAVARRÍA REYES, LILIANA JANET

LIMA-PERÚ

2020

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, abuelos, hermanos y compañeros quienes me brindaron consejos, apoyo y conocimiento a lo largo de mis estudios.

CHRISTIAN DIEGO ALONSO
BOTONERO BARRIENTOS

Esta tesis está dedicada a todos mis seres amados; quienes, en conjunto, han sido el soporte perfecto para nunca decaer y siempre mantenerme firme en cada etapa del proceso del desarrollo de esta tesis.

CARLOS ALONZO
ROJAS LIBIA

AGRADECIMIENTO

Un gran agradecimiento a la **Ing. Mg. Liliana Chavarría Reyes** por la constante orientación y asesoría en el área de tecnología de concreto.

A nuestro metodólogo **Dr. Ing. Carlos Magno Chavarry Vallejos** por sus recomendaciones y asesorías hacia nuestro trabajo.

Al **Ing. Mg. Christian Vera**, Gerente BU Mining de Sika Perú quién nos brindó su apoyo para el desarrollo de esta investigación.

Al **Ing. Mg. Néstor Alegría**, Ing. Estructural por parte de la empresa Sika Perú, quien nos brindó y apoyo con sus amplios conocimientos en el tema.

Al **Ing. Mg. Luis Lázaro Apolaya**, Ing. Civil e Supervisor de obras Civiles en TOP CONSULT INGENIERIA SAC, quien nos brindó y apoyo con sus amplios conocimientos en el tema.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------------|
| RESUMEN | xiv |
| ABSTRACT | xv |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 3 |
| 1.1. Descripción del problema | 3 |
| 1.2. Contextualización y delimitación del problema | 3 |
| 1.3. Formulación del problema..... | 4 |
| 1.3.1. Problema general..... | 4 |
| 1.3.2. Problemas específicos | 4 |
| 1.4. Objetivos de la investigación..... | 5 |
| 1.4.1. Objetivo general..... | 5 |
| 1.4.2. Objetivos específicos..... | 5 |
| 1.5. Justificación | 5 |
| 1.5.1. Conveniencia | 6 |
| 1.5.2. Relevancia social..... | 7 |
| 1.5.3. Aplicaciones prácticas..... | 7 |
| 1.5.4. Utilidad metodológica | 8 |
| 1.5.5. Valor teórico | 8 |
| 1.6. Importancia | 8 |
| 1.7. Limitaciones..... | 8 |
| 1.8. Delimitación..... | 9 |
| 1.8.1. Delimitación geográfica | 9 |
| 1.8.2. Delimitación temporal..... | 9 |
| 1.8.3. Delimitación temática | 9 |
| 1.8.4. Delimitación muestral | 9 |
| 1.9. Alcance | 9 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 1.10. | Viabilidad del estudio | 9 |
| CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO | | 10 |
| 2.1. | Antecedentes | 10 |
| 2.2. | Investigaciones relacionadas con el tema | 14 |
| 2.2.1. | Investigaciones nacionales | 14 |
| 2.2.2. | Investigaciones internacionales | 18 |
| 2.3. | Estructura teórica y científica que sustenta el estudio..... | 26 |
| 2.3.1. | Casos en los que se aplica el reforzamiento de estructuras | 26 |
| 2.3.2. | Tipos de reforzamiento..... | 27 |
| 2.3.3. | Reforzamiento por fisuras en los elementos estructurales | 27 |
| 2.3.4. | Tipos de fibra | 27 |
| 2.3.5. | La fibra de carbono | 28 |
| 2.3.6. | Tela de fibra de carbono | 28 |
| 2.3.7. | Componentes de la fibra de carbono | 28 |
| 2.3.8. | Criterios de producción | 29 |
| 2.3.9. | Ventajas del uso de fibras de carbono en estructuras..... | 30 |
| 2.4. | Definición de términos básicos | 33 |
| 2.4.1. | Reforzamiento..... | 33 |
| 2.4.2. | Reparación estructural..... | 33 |
| 2.4.3. | Restauración | 33 |
| 2.4.4. | Rehabilitación | 33 |
| 2.4.5. | Resistencia | 33 |
| 2.4.6. | Rigidez..... | 34 |
| 2.4.7. | Ductilidad | 35 |
| 2.4.8. | Materiales compuestos de polímeros | 35 |
| 2.4.9. | Control de calidad | 36 |
| 2.4.10. | Ensayo no destructivo | 36 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 2.4.11. | Adherencia | 36 |
| 2.4.12. | Ensayos Pull-off | 37 |
| 2.4.13. | Ensayos de ultrasonidos | 37 |
| CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS | | 38 |
| 3.1. | Hipótesis | 38 |
| 3.1.1. | Hipótesis principal | 38 |
| 3.1.2. | Hipótesis secundarias | 38 |
| 3.2. | Variables | 39 |
| 3.2.1. | Variable independiente | 39 |
| 3.2.2. | Variable dependiente | 39 |
| 3.3. | Sistema de variables | 39 |
| 3.3.1. | Definición conceptual | 39 |
| 3.3.2. | Definición operacional | 39 |
| 3.3.3. | Operacionalización de las variables | 40 |
| CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN | | 41 |
| 4.1. | Tipología y método de estudio | 41 |
| 4.2. | Tipología y método de estudio | 42 |
| 4.3. | Población y muestra | 42 |
| 4.3.1. | Población | 42 |
| 4.3.2. | Muestra | 42 |
| 4.3.3. | Unidad de análisis | 43 |
| 4.4. | Técnicas e instrumentos de recolección de datos | 43 |
| 4.4.1. | Técnica de investigación | 43 |
| 4.4.2. | Instrumentos de recolección | 43 |
| 4.5. | Descripción de procedimientos de análisis | 43 |
| CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN | | 44 |

| | |
|---|-----------|
| 5.1. Presentación de resultados..... | 44 |
| 5.1.1. Desempeño mecánico de la aplicación CFRP | 44 |
| 5.1.1.1. Ensayos a compresión..... | 44 |
| 5.1.1.2. Análisis computacional..... | 56 |
| 5.1.2. Tratamiento de superficies..... | 59 |
| 5.1.3. Ensayos no destructivos | 67 |
| 5.2. Contrastación de resultados | 77 |
| 5.2.1. Contrastación de la primera hipótesis | 77 |
| 5.2.2. Contrastación de la segunda hipótesis..... | 79 |
| 5.2.3. Contrastación de la tercera hipótesis..... | 80 |
| 5.3. Discusiones | 85 |
| CONCLUSIONES | 87 |
| RECOMENDACIONES | 89 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 90 |
| ANEXOS..... | 97 |
| Anexo 1: Matriz de consistencia | 97 |
| Anexo 2: Operacionalización de las variables | 98 |
| Anexo 3: M1 - Selección documental: Referencias - Resúmenes - Subtemas identificados (Artículos) | 99 |
| Anexo 4: M1 - Selección documental: Referencias - Resúmenes - Subtemas identificados (Tesis) | 100 |
| Anexo 5: M2 - Subtemas – Justificación – Objetivos específicos | 101 |
| Anexo 6: M3 – Síntesis por Subtema | 102 |
| Anexo 7: M4 - Matriz de Relaciones Jerarquía/comparación /desarrollo - Subtema | 103 |
| Anexo 8: M4 – Subtema 2 | 104 |
| Anexo 9: M4 - Subtemas 3 | 105 |

| | |
|---|-----|
| Anexo 10: Factor de reducción ambiental para diversas fibras y condiciones de exposición. | 106 |
| Anexo 11: Comparativo económico de la viga VT-07A (continua) | 106 |
| Anexo 12: Comparativo económico de la viga VT-07A (continua) | 107 |
| Anexo 13: Sistema empleado para la colocación del FRP y caras de tratamiento. Cotas en cm. | 107 |
| Anexo 14: Tipos de ductilidad, gráficas y definiciones | 108 |
| Anexo 15: Propiedades e idoneidad de fibras para FRP | 108 |
| Anexo 16: Resistencias promedio de probetas de concreto..... | 109 |
| Anexo 17: Nomenclatura de las muestras de prueba..... | 109 |
| Anexo 18: Resultados de la inspección visual para laminados expuestos a una exposición media al calor | 110 |
| Anexo 19: Resultados de la inspección visual para laminados expuestos a diferentes exposiciones al calor..... | 110 |
| Anexo 20: Datos tabulados de la prueba de carga promedio en tres puntos | 111 |
| Anexo 21: Cargas de falla basadas en las diferentes relaciones de ancho..... | 111 |
| Anexo 22: Vida útil típica (tiempo de trabajo) del epóxico a diversas temperaturas | 111 |
| Anexo 23: Tipos de modo de falla para cada muestra..... | 112 |
| Anexo 24: Temperatura de ambiente respecto a la vida útil del epóxico preparado | 113 |
| Anexo 25: Temperatura actual respecto a la humedad relativa en su lugar de trabajo para hallar el punto de rocío..... | 113 |
| Anexo 26: Anclajes tipo “pajarita” (izquierda) y abanico único (derecha) | 114 |
| Anexo 27: Orientación de anclajes “pajarita” y abanico respecto a carga. | 114 |
| Anexo 28: Efecto de la temperatura en reforzamientos con fibras de carbono | 114 |
| Anexo 29: Especificaciones técnicas de las resinas epóxicas saturantes | 115 |
| Anexo 30: Especificaciones técnicas de las resinas adhesivas | 115 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Especificaciones de una lámina de carbono según fabricantes. | 31 |
| Tabla 2 Tabla Proceso de Control de Calidad..... | 36 |
| Tabla 3 Operacionalización de las variables..... | 40 |
| Tabla 4 Resumen de probetas analizadas | 44 |
| Tabla 5 Resumen de los resultados a compresión..... | 45 |
| Tabla 6 Porcentaje de aumento de resistencia teóricos según distintos modelos para probetas con refuerzo del 100% | 47 |
| Tabla 7 Porcentajes de aumento de resistencia teóricos según distintos modelos para probetas con refuerzo del 50%..... | 48 |
| Tabla 8 Verificación de resultados de laboratorio con la norma ACI 440 2R 17..... | 49 |
| Tabla 9 Ensayos de confinamiento con FRP: Programa de ensayos..... | 50 |
| Tabla 10 Resultados de los ensayos de hormigón confinado con FRP | 51 |
| Tabla 11 Verificación de resultados de laboratorio con la norma ACI 440 2R 17 | 51 |
| Tabla 12 Detalle de las muestras reforzadas con fibra de carbono. | 53 |
| Tabla 13 Ensayo de muestras cilíndricas de concreto reforzadas con fibra de carbono CFRP. | 54 |
| Tabla 14 Verificación de resultados de laboratorio con la norma ACI 440 2R 17 | 54 |
| Tabla 15 Verificación de aumento de resistencias Norma ACI 440 2R 17..... | 56 |
| Tabla 16 Períodos de vibración, estructura sin reforzar (modo 1)..... | 57 |
| Tabla 17 Períodos de vibración, estructuras reforzadas (modo 1)..... | 57 |
| Tabla 18 Especificaciones de las vigas con CFRP a diferentes tratamientos de superficies. | 61 |
| Tabla 19 Resultado de fuerza de arranque a diferentes superficies tratadas en losas reforzadas con CFRP..... | 64 |
| Tabla 20 Tratamientos superficiales..... | 67 |
| Tabla 21 Resumen del número de probetas utilizadas y número de ensayos ejecutados..... | 68 |
| Tabla 22 Resultados de los ensayos tipo Pull-off. | 69 |
| Tabla 23 Diferentes ensayos no destructivos aplicados en CFRP. | 74 |
| Tabla 24 Técnicas no destructivas aplicadas a ensayos con CFRP..... | 75 |
| Tabla 25 Descripción de diferentes ensayos no destructivos para CFRP..... | 76 |
| Tabla 26 Comparativa del análisis porcentual por número de capas | 77 |

| | |
|---|----|
| Tabla 27 Comparativa del análisis porcentual de resistencias de f_{cc} ' según ACI 440 2R-17..... | 78 |
| Tabla 28 Cuadro resumen de ensayos no destructivos (NDT) | 83 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Polímero reforzado con fibra de carbono | 11 |
| Figura 2 Estructura del avión fabricado con fibra de carbono..... | 11 |
| Figura 3 Fibra de carbono aplicada en partes la mecánica automotriz | 12 |
| Figura 4 Tipos de fibra para reforzar elementos estructurales de concreto..... | 27 |
| Figura 5 Curvas esfuerzo - deformación de materiales FRP y acero..... | 30 |
| Figura 6 Resistencia de cálculo de materiales FRP y acero..... | 31 |
| Figura 7 Proceso de instalación de la aplicación de CFRP..... | 32 |
| Figura 8 Tipología y método de estudio..... | 41 |
| Figura 9 Tensión de rotura promedio para probetas H-12..... | 45 |
| Figura 10 Tensión de rotura promedio para probetas H-35..... | 46 |
| Figura 11 Línea representativa de los periodos de vibración..... | 57 |
| Figura 12 Línea representativa de los factores de participación modal..... | 58 |
| Figura 13 Curva de capacidad..... | 59 |
| Figura 14 Prueba de extracción y monitorización de emisiones acústicas..... | 63 |
| Figura 15 Fuerza máxima de la señal vs fuerza de arranque promedio..... | 65 |
| Figura 16 Amplitud máxima vs fuerza de arranque promedio | 66 |
| Figura 17 Tensión de arrancamiento media del ensayo tipo Pull-Off según tratamiento superficial y tipo de concreto..... | 70 |
| Figura 18 Resultados de ensayos de ultrasonidos antes y después de colocar el refuerzo..... | 71 |
| Figura 19 Resultados de ensayos de ultrasonidos antes y después de colocar el refuerzo..... | 71 |
| Figura 20 Resultados medios ultrasonidos según tratamiento superficial y tipo de Concreto..... | 72 |
| Figura 21 Resultados de ensayos a flexión realizados..... | 72 |
| Figura 22 Valores medios de los ensayos a flexión según tipo de hormigón y tratamiento superficial..... | 73 |
| Figura 23 Diferencia porcentual de las resistencias a compresión..... | 78 |
| Figura 24 Comparación de resistencias a la compresión de vigas reforzadas con CFRP a diferentes tratamientos de superficie | 79 |
| Figura 25 Fuerza de arranque en diferentes superficies de losas reforzadas con CFRP | 80 |

| | |
|---|----|
| Figura 26 Pull Off en muestras H25..... | 81 |
| Figura 27 Pull Off en muestras H40..... | 81 |
| Figura 28 Ultrasonidos en muestras H40 | 82 |
| Figura 29 Ultrasonidos en muestras H25 | 82 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|---|----|
| Ecuación 1: Módulo de elasticidad. | 34 |
| Ecuación 2: Concreto reforzado..... | 49 |
| Ecuación 3: Máxima resistencia del concreto reforzado | 49 |
| Ecuación 4: Deformación máxima del CFRP..... | 49 |
| Ecuación 5: Concreto reforzado..... | 52 |
| Ecuación 6: Máxima resistencia del concreto reforzado | 52 |
| Ecuación 7: Deformación máxima del CFRP | 52 |
| Ecuación 8: Concreto reforzado..... | 55 |
| Ecuación 9: Máxima resistencia del concreto reforzado..... | 55 |
| Ecuación 10: Deformación máxima del CFRP..... | 55 |

RESUMEN

Cada vez es más frecuente la rehabilitación de obras deterioradas para la adecuación a nuevos usos, corregir fallas de diseño o de mal proceso constructivo. Dada esta condición, se requiere no solo rehabilitar sino también readecuar las estructuras tomando en cuenta que dicha intervención deberá satisfacer las mejoras mecánicas, y así mismo un correcto control de la aplicación. Esta investigación pretende dar a conocer los beneficios que aportan los sistemas compuestos de polímeros reforzados con fibra de carbono para mejorar el desempeño mecánico de elementos estructurales de concreto. La investigación fue documental bibliográfico, en donde los estudios revisados utilizaron el método deductivo, enfoque cuantitativo y orientación aplicada, de nivel descriptivo, tipo descriptivo, correlacional y explicativo. El diseño experimental, longitudinal, retrospectivo y de estudio de cohorte (causa-efecto). Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión a los 28 días de las probetas sin reforzar fueron de 12 MPa, al ser comparadas con las probetas de concreto reforzadas con CFRP al 100%, experimentó un incremento de 2.67 veces su resistencia (32.04 MPa), mientras que las probetas reforzadas al 50%, incrementan su resistencia en 1.57 veces (18.84 MPa). Se concluye que la aplicación de CFRP, aumenta considerablemente la resistencia a compresión y la deformación del concreto, siendo una opción viable como método de reforzamiento; así mismo, se identificó que el óptimo tratamiento para la aplicación de CFRP en la superficie estructural es el arenado y perforado ya que se obtuvo una resistencia a compresión y arranque de 55 y 2.8 MPa respectivamente.

Palabras clave: fibra de carbono, elementos estructurales de concreto, desempeño mecánico, ensayos no destructivos

ABSTRACT

The rehabilitation of deteriorated works to adapt to new uses, correct design flaws or poor construction process is increasingly frequent. Given this condition, it is required not only to rehabilitate but also to readjust the structures taking into account that said intervention must satisfy the mechanical improvements, and likewise a correct control of the application. This research aims to show the benefits of carbon fiber reinforced polymer composite systems to improve the mechanical performance of concrete structural elements. The research was bibliographic documentary, where the reviewed studies used the deductive method, quantitative approach and applied orientation, descriptive level, descriptive type, correlational and explanatory. The experimental, longitudinal, retrospective and cohort study design (cause-effect). The results of the compressive strength tests at 28 days of the unreinforced specimens were 12 MPa, when compared with the concrete specimens reinforced with 100% CFRP, it experienced an increase of 2.67 times its resistance (32.04 MPa), while the 50% reinforced specimens increase their strength by 1.57 times (18.84 MPa). It is concluded that the application of CFRP considerably increases the compressive strength and deformation of concrete, being a viable option as a reinforcement method; Likewise, it was identified that the optimal treatment for the application of CFRP on the structural surface is sandblasting and drilling, since a resistance to compression and tear of 55 and 2.8 MPa respectively was obtained.

Key words: carbon fiber, concrete structural elements, mechanical performance, non-destructive testing

INTRODUCCIÓN

Una estructura de concreto armado debe satisfacer durante su vida útil, los requisitos para los que fue diseñada. Sin embargo, las condiciones de la misma pueden cambiar a lo largo de su vida útil por lo que, pasado cierto tiempo, la estructura puede precisar operaciones de acondicionamiento y refuerzo que le permitan hacer frente a la nueva situación de servicio. Uno de los sistemas más eficaces para estas operaciones es el refuerzo mediante materiales compuestos, y estratégicos para el desarrollo sostenible Escobar, W., Barrera, H. & Amarís, H. En la actualidad, Carbon Fiber Reinforced Polymer - CFRP es una solución muy utilizada para los elementos estructurales de concreto armado. Estos presentan indudables ventajas reconocidas en el ámbito profesional, pero también algunas desventajas que en ocasiones hacen dudar de su eficacia. Una de las principales ventajas de emplear materiales compuestos como elementos de refuerzo se basa en sus excelentes propiedades mecánicas y en su anisotropía. El refuerzo puede ser ajustado a voluntad, orientando las fibras de acuerdo a las direcciones en las que se originan los mayores esfuerzos, lo que permite optimizar el material y reducir los costos. Dos cuestiones de suma importancia en la ejecución del refuerzo son la calidad y el estado del soporte, y la adecuada colocación de la fibra. El conocimiento en mayor profundidad de las condiciones de la superficie, y del estado de la adherencia entre el concreto y los polímeros armados con fibra optimiza el refuerzo. La estructura y propiedades de las uniones entre materiales, por una parte, fibra-matriz, y por otra Fiber Reinforced Polymer FRP con el concreto, juegan un papel muy importante en las propiedades físicas y mecánicas finales del refuerzo. Los ensayos semidestructivos tipo Pull-Off aportan suficiente información a este respecto, tal y como se recoge en el presente trabajo. En 1997 Horiguchi y Saeki realizaron estudios sobre la idoneidad de los ensayos y la influencia de la calidad del concreto en probetas reforzadas con laminados de fibra de carbono. Analizaron tres tipos de ensayos: ensayos de corte, ensayos de flexión y ensayos de tracción directa Pull-Off. G., & Atadero, R. A. empleó también este ensayo para valorar el comportamiento del FRP a largo plazo.

El objetivo de la investigación es dar a conocer los beneficios que aportan los sistemas compuestos de polímeros reforzados con fibra de carbono para mejorar el desempeño mecánico de elementos estructurales de concreto y evaluar la adherencia para una correcta aplicación del sistema CFRP en estructuras mediante técnicas no destructivas y semidestructivas, como parte de un protocolo de control de calidad del refuerzo que

permita valorar su eficacia. Para la valoración de la efectividad de la unión entre la fibra de carbono y los elementos estructurales se mostrarán los diversos tratamientos a la superficie que garantizan una correcta adherencia del sistema, así como los diversos ensayos no destructivos y de calidad a utilizar que contemplan la unión del sustrato y el elemento. La singularidad de la investigación reside en el estudio de un método no destructivo, como es el ensayo de ultrasonidos, como prueba válida de control de calidad. Basándose en la unión entre el refuerzo de FRP y el soporte. Es una técnica de fácil empleo en obra, en zonas de difícil acceso y de rápida ejecución, a partir de la cual se han podido establecer correlaciones cuantificables con otras técnicas semidestructivas como son el tipo Pull -Off y destructivas como los ensayos a flexión. (Fernández, Barrios, Molina, 2018, p. 2)

La presente investigación se desarrolla en cinco capítulos, el capítulo I viene a ser el planteamiento del problema donde se describen el problema, los objetivos, la justificación y viabilidad de la investigación; en el capítulo II vemos el marco teórico donde se encontrará los antecedentes de la investigación, bases teóricas, marco conceptual; en el capítulo III identificamos el sistema de hipótesis donde se definen las hipótesis planteadas, y las variables a estudiar; en el capítulo IV encontramos la metodología de la investigación, tipo de investigación, nivel de investigación, diseño de investigación, variables, población, muestra, técnicas de investigación e instrumentos de recolección de datos; en el capítulo V se desarrollan los resultados, interpretación de resultados y contrastación de hipótesis de la investigación; finalmente tenemos el desarrollo de la discusión, conclusiones y recomendaciones de la investigación. Todos estos capítulos implican el correcto desarrollo de esta investigación.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

Muchas veces las estructuras de concreto pueden presentar insuficiencias, ya sean de construcciones deficientes, fallas en la resistencia y rendimiento, deterioro del concreto, corrosión del acero de refuerzo, cambio de la funcionalidad de una edificación o un incremento en las cargas de diseño original, sumados a innumerables efectos ambientales. Por consiguiente, es de vital importancia el análisis de la estructura a lo largo de su vida útil y en caso de ser necesario, la aplicación de elementos de refuerzo.

En el Perú, históricamente el reforzamiento se ha hecho de manera convencional, ya sea agrandando las secciones de los elementos estructurales o colocando elementos metálicos que ayuden a soportar las cargas. Actualmente una de las técnicas que se viene empleando para realizar el reforzamiento de estructuras sujetas a flexión y cortante es el uso de las fibras de carbono, que trabajan adheridas a los elementos estructurales, a este sistema es denominado Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP).

En la actualidad, el Instituto Americano del Concreto (ACI), comité 440 ya cuenta con un documento (ACI440.1R-17, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars) (2017) que brinda recomendaciones de diseño y técnicas de construcción para el uso de CFRP para el reforzamiento de concreto.

La presente investigación se enfocará en fomentar el uso del sistema CFRP y sus beneficios en proyectos de reforzamiento como una alternativa a considerar ya que, frente a los sistemas convencionales de refuerzo, tienen un costo muy competitivo, tiempo de instalación corta y un comportamiento estructural muy bueno.

1.2. Contextualización y delimitación del problema

Las estructuras de concreto reforzado con el paso del tiempo requieren una modificación en su diseño inicial por cambios en las cargas, por desgaste de los miembros estructurales, a causa de sismos, alteraciones arquitectónicas, lo que conlleva a realizar un reforzamiento de la misma.

Estos reforzamientos son las acciones necesarias para aumentar la capacidad resistente de una estructura o miembro estructural existente, en aquellas edificaciones que presenten deficiencias en la estructura a nivel de resistencia, flexibilidad y ductilidad. Así mismo un reforzamiento busca descargar la estructura existente de las deformaciones y esfuerzos a que originalmente estaba sujeta la misma para que sean absorbidos por el reforzamiento implantado en dicha estructura.

El presente estudio se enfocará en dar a conocer los beneficios y ventajas de los sistemas compuestos de polímeros reforzados con fibra de carbono, así mismo la investigación dará mayor relevancia al control de calidad donde se emplean reforzamientos con CFRP para asegurar la optimización integral del sistema, presentaremos las causas y fallas comunes que suelen presentar las estructuras en nuestro país así como además datos recopilados de ensayos ya evaluados a probetas en laboratorio y reforzamientos aplicados a elementos estructurales.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿En qué medida el sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra influye en las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto?

1.3.2. Problemas específicos

- a) ¿En qué medida los resultados en ensayos de laboratorio con el sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra de carbono influyen en las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto?
- b) ¿En qué medida el tratamiento de la superficie influye en las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto?
- c) ¿En qué medida el control del refuerzo mediante ensayos no destructivos influye en las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto?

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Aplicar el sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra para mejorar las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto.

1.4.2. Objetivos específicos

- a) Analizar los resultados en ensayos de laboratorio con el sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra de carbono para mejorar las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto.
- b) Determinar el tratamiento de la superficie para mejorar las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto.
- c) Analizar el control del refuerzo mediante ensayos no destructivos para mejorar las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto.

1.5. Justificación

En el pasado, el alto costo y la falta de información técnica adecuada limitaron el uso de dichos materiales en la industria de la construcción; sin embargo, con el transcurso de los años, mediante una amplia variedad de proyectos de investigación y construcción se ha ampliado el conocimiento básico dirigido al uso de materiales compuestos con polímeros en el sector de la construcción.

Los métodos convencionales para el aumento de resistencia en las estructuras existentes de concreto, tales como el incremento de sección de los elementos, la unión de secciones mediante la inyección de adhesivos y la fijación de conectores metálicos, han sido empleados durante años. Sin embargo, estos procedimientos pueden ser costosos y prolongados y, en algunos casos, son imposibles de ejecutar al no poder acomodar la carga muerta, contar con espacios reducidos, y sin afectar el flujo de tránsito del área a reforzar.

Según las normativas internacionales para la aplicación del sistema BASF Construction Chemicals Latin America, (2006), La facilidad de instalación de las fibras de carbono puede ahorrar en la mano de obra entre un 25 y 50 %,

compensando con creces un coste superior del material. Los compuestos de fibra de carbono tienen un coeficiente de carga unitaria que es compatible con la armadura de acero (y el concreto) y presentan bajos valores de fluencia y elongación. Además de ser más ligeras y delgadas que el acero, las láminas de fibras de carbono tienen como ventaja adicional el no sufrir corrosión. Entre los beneficios que tiene el CFRP se pueden resumir en:

- Peso muy liviano (mínima carga muerta adicional).
- Alta durabilidad, anticorrosivo y bajo mantenimiento.
- Rápida instalación, con el consiguiente ahorro de dinero y tiempo de espera.
- Mínimo incremento de espesor en la geometría del elemento.
- Muy flexible, adaptable a todas las formas de todos los elementos.

Sus aplicaciones más usuales vienen determinadas por:

- Cambio en el uso o cargas en las edificaciones.
- Defecto en el diseño o construcción.
- Cambios en las normas de diseño.
- Daños sísmicos.
- Deflexiones excesivas, etc. (p. 3)

La presente investigación busca dar un aporte a los profesionales de Ingeniería civil en difundir los beneficios y ventajas que vienen ofreciendo los Polímeros Reforzados con Fibra de Carbono (CFRP) en reforzamientos estructurales realizados en nuestro país en los últimos años en grandes proyectos como edificaciones comerciales y proyectos a reforzar, como base de información tendremos la Guía para el diseño y construcción de concreto estructural reforzado con barras de polímero con fibra (ACI440.1R – 15), FIB Bulletin 14:Externally Bonded FRP, Reinforcement for RC Structures, Manual de Control de Calidad de Fyfe Company LLC, Manual de Entrenamiento para Aplicadores Certificados del sistema Tyfo® Fibrwrap®, data actualizada de la empresa Sika Perú y Top Consult representante para el Perú del Grupo FYFE Company LLC y TYFO® que forman parte del Grupo Aegion corporación americana líder en protección de infraestructuras.

1.5.1. Conveniencia

La presente investigación permitirá demostrar que cuando se utilizan los sistemas compuestos de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) llevando el

adecuado control de calidad se garantiza el adecuado comportamiento del refuerzo, que optimiza y pone en valor este sistema, así mismo abordar las soluciones requeridas para diferentes estructuras donde sea necesario este tipo de sistema teniendo como características un peso liviano lo cual lo hace eficaz en reducciones de costos, tiempos cortos de instalación, siendo no corrosivo ya que es un material sintético, no alterando la arquitectura inicial y con la posibilidad de instalación en áreas de acceso limitado.

A sí mismo, este tipo de sistema es muy usado cuando se desea aumentar las cargas de servicio de cualquier tipo de estructura y por otra parte cuando la estructura requiere un reforzamiento ya sea por efectos de tipo estructural, deficiencias en diseño o de envejecimiento.

1.5.2. Relevancia social

Este trabajo contribuye de manera positiva al desarrollo investigativo de este sistema de reforzamiento, para dejarlo como guía y alternativa de estudio a los estudiantes de la Facultad Profesional de Ingeniería Civil.

Por ello, se tendrá en cuenta investigaciones realizadas anteriormente por tesis y papers, revistas de tipo ingenieril, como guía data realizada en nuestro país y manuales internacionales para el desarrollo de la presente investigación.

1.5.3. Aplicaciones prácticas

En el Perú existen estructuras con varios años de antigüedad, algunas presentando desgates por agentes externos como la corrosión o productos de un mal proceso constructivo ocasionando fallas en el concreto, otras sufriendo el desgaste del mal uso o sobre carga del diseño inicial y aquellas en las que por antigüedad ya presentan fallas propias de los años.

Con lo antes mencionado, está investigación busca difundir a los ingenieros civiles las ventajas y beneficios que ofrece optar por este sistema en un reforzamiento de una estructura y promover un correcto proceso de calidad antes, durante y después de la instalación del sistema para un funcionamiento óptimo del CFRP.

1.5.4. Utilidad metodológica

Esta investigación servirá de guía a los ingenieros civiles para llevar un mejor control de calidad, programación de actividades y procedimientos a seguir para el uso de CFRP en mantenimientos y reforzamientos de elementos estructurales evitando mayores deterioros, mayores costos de mantenimiento y/o rehabilitación. Además, del uso de instrumentos de medición para la calidad y recolección de datos obtenidos mediante equipos debidamente calibrados.

1.5.5. Valor teórico

Con la presente investigación se busca incentivar e incrementar el conocimiento científico sobre el uso del CFRP en estructuras que presenten deterioro o fallas. Tener conocimiento de las condiciones de las estructuras en cualquier momento desde su construcción, periodo de servicio o en cualquier momento de la vida útil, será de suma importancia para la generación futuras de políticas, mejoras en el sistema o innovaciones que ayuden a optimizar el sistema CFRP basándose en futuras nuevas normativas.

1.6. Importancia

La presente investigación se desarrolla para mostrar los beneficios de este tipo de reforzamiento usados para mejorar las propiedades de flexión, corte, torsión y confinamiento de cualquier elemento estructural (vigas, losas, columnas, muros), como también el restablecimiento de capacidades de estructuras de concreto deterioradas, reemplazo del acero de refuerzo corroído, confinamientos de reparaciones de concreto, reemplazo de aceros de refuerzo faltantes entre otras correcciones de errores por diseño o construcción.

1.7. Limitaciones

La presente investigación cuenta con limitaciones dadas a la presente coyuntura mundial que es el COVID -19, ya que para su realización no se tuvo acceso a un laboratorio de ensayo de materiales, recursos económicos necesarios para poder realizar pruebas y el confinamiento decretado.

1.8. Delimitación

1.8.1. Delimitación geográfica

Geográficamente se investigará dentro de Lima metropolitana.

1.8.2. Delimitación temporal

La investigación se realizará en el presente año 2020.

1.8.3. Delimitación temática

La temática es el sistema reforzado con polímeros aplicados al concreto.

1.8.4. Delimitación muestral

La unidad de análisis de la investigación serán las vigas de edificaciones comerciales.

1.9. Alcance

El alcance de la presente investigación es proponer y fomentar el uso de los sistemas compuestos de polímeros reforzados con fibra de carbono para mantenimientos y/o reforzamientos enfocados a controles y ensayos de calidad para garantizar la mejora de sus propiedades mecánicas en elementos estructurales con ausencias de acero, proceso constructivo malo o debido a desgastes de los años de vida del elemento.

1.10. Viabilidad del estudio

El desarrollo de la presente tesis es factible ya que al ser descriptiva se cuenta con una variedad de tesis, artículos, guías y manuales para poder investigar. Además, se cuenta con data de empresas nacionales que aplican el sistema reforzado con fibra de carbono a elementos estructurales para elaboración de la investigación, teniendo el permiso adecuado para hacer uso de la misma.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

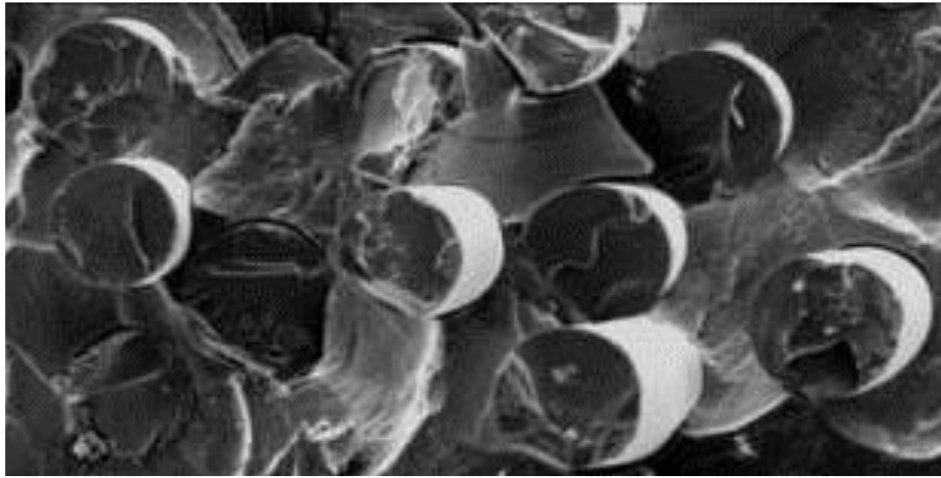
La fibra de carbono se utilizó por primera vez en 1879. Thomas Alba Edison lo patentó para utilizarlo como filamento para la bombilla eléctrica.

En 1958, Robert Bacon generó una investigación sobre fibras de alto rendimiento en el Centro Técnico de Unión Carbide en Parma en Cleveland, Ohio, lamentablemente este procedimiento fue muy poco efectivo ya que provocaba la acumulación de solamente el 20% del carbono. En 1960, en Japón, Akio Shindo de la Agencia de la Ciencia Industrial Avanzada y Tecnología, utilizó por primera vez el poliacrilonitrilo (PAN) y se obtuvo una muestra de fibra de carbono con pureza de 55 %. El proceso se ha mejorado y hoy en día es posible producir hilos con purezas del 95 al 99 % de carbono. (Moncayo Theurer & Rodriguez, 2016, págs. 59,60)

Según Alegre Gago (2017), en sus inicios, la fabricación de la fibra de carbono era utilizado principalmente en aplicaciones militares, debido a su gran resistencia al calor y propiedades anticorrosivas. Sin embargo, entre los años 70's y 80's, la empresa japonesa Toray transformó la fibra de carbono en un producto que tuviera aplicaciones comerciales más generales. La industria aeroespacial comercial se aprovechó de las ventajas de las fibras de carbono. El uso de fibras de carbono basadas en poliacrilonitrilo (PAN) se desarrolló en mayor escala y empezó a comercializarse en productos como chalecos antibalas, cuerdas de pescar, aros de bicicletas, neumáticos de autos, guantes de protección, etc. (Organización Mundial de la Propiedad Intelectual, s/f). Por ejemplo, en la Figura 3 se muestra los filamentos fabricados de fibra de carbono utilizados en la fabricación de los autos BMW en su planta automotriz Moses Lake (EEUU). Por otro lado, en la industria aeronáutica y espacial, la demanda en el uso de fibras de carbono se ha incrementado principalmente debido a la necesidad de aumentar la eficiencia en la utilización del combustible, reducción del peso de los aviones, reducción en el ruido de los motores, lo cual mejora el desempeño aerodinámico de los aviones, por lo que los diseñadores han buscado alternativas diferentes del uso tradicional de aluminio en el diseño de los aviones. (p. 11)

Figura 1

Polímero reforzado con fibra de carbono



Nota: Cabello humano ($D=0,08mm$), Fibra de carbono ($D=0,007mm$). Adaptado de “Refuerzo de estructuras de concreto”, por Alegría, N. (2016)

Se comercializa principalmente para la industria automotriz y de aviación debido a que resiste muy bien los altos esfuerzos y tiene bajo peso.

La fibra de carbono se compone de hilos de carbono entrenzados sobre una matriz, normalmente epóxica la que se le adiciona un agente endurecedor. (Moncayo Theurer & Rodriguez, 2016, pág. 60)

Figura 2

Estructura del avión fabricado con fibra de carbono



Fuente: Airbus, (2013)

Figura 3

Fibra de carbono aplicada en partes la mecánica automotriz.



Fuente: Automotriz cART's Arte, (2020)

Como menciona Pinero (2016), En Europa, los refuerzos FRP fueron desarrollados como alternativa a los refuerzos con platabandas de acero adheridas. La adhesión de éstas mediante resinas adhesivas era una técnica viable para aumentar a resistencia a flexión (Fleming and King 1967). Esta técnica se ha usado para reforzar muchos puentes y edificios por todo el mundo. Como las platabandas de acero pueden ser atacadas por la corrosión, lo que conduce a una pérdida de adherencia entre el acero y el concreto, y como son difíciles de instalar, porque requieren el uso de equipos pesados; los investigadores encontraron las fibras FRP como alternativa al acero.

Los primeros ensayos usando materiales FRP para adaptar estructuras de concreto se hicieron en 1978 en Alemania (Wolf and Miessler 1989). La investigación en Suiza llevó a las primeras aplicaciones de refuerzos FRP adheridos al concreto armado de puentes para aumentar la resistencia a flexión (Meier 1987; Rostasy 1987).

Los refuerzos con FRP se usaron por primera vez en confinamiento de pilares en Japón en los años 80 (Fardis and Khalili 1981; Katsumata et al. 1987). Se disparó el uso de estos refuerzos tras el terremoto Hyogoken-Nanbu en 1995 (Nanni 1995).

En Estados Unidos, los investigadores habían tenido siempre especial interés en el refuerzo mediante fibras en estructuras de concreto desde los años 30. El desarrollo y la investigación en el uso de estos materiales para adaptar estructuras de concreto empezó en los años 80, gracias a las iniciativas de la Fundación Nacional para la

Ciencia (NSF) y la Administración Federal de Autopistas (FHWA). Los trabajos de investigación llevaron a la construcción de muchos proyectos que incluían una gran variedad de condiciones ambientales. Otros trabajos de investigación y aplicaciones anteriores de refuerzos con FRP están descritos en ACI 440R (Neale 2000; Dolan et al. 1999; Sheheta et al. 1999; Saadatmanesh and Ehsani 1998; Benmokrane and Rahman 1998; Neale and Labossière 1997; Hassan and Rizkalla 2002; Shield et al. 2005).

El desarrollo de códigos y estándares para refuerzos de fibras adheridas al concreto se está llevando a cabo en Europa, Japón, Canadá y Estados Unidos. Durante los últimos 10 años, la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE), el Instituto Japonés del Concreto (JCI) y el Instituto Técnico de Investigación de Vías Ferreoviarias (RTRI), han publicado muchos documentos relativos al uso de materiales FRP en estructuras de concreto.

En Europa, el grupo de tareas de la Federación Internacional del Concreto Estructural (FIB) publicó una guía de diseño de refuerzos FRP para estructuras de concreto armado (Federación Internacional del Concreto Estructural 2001).

La Asociación Canadiense de Estándares (CSA) y la ISIS han desarrollado también guías para refuerzos FRP. La sección 16 de “Estructuras reforzadas con fibras”, del Código Canadiense de diseño de autopistas y puentes fue completado en 2006 (CAN/CSA-S6-06), y la CSA aprobó CSA S806-00.

En Estados Unidos, los criterios de evaluación de refuerzos FRP están disponibles para la industria de la construcción (ICBO ACI125; CALTRANS División de estructuras 1996; Hawkins et al.1998). (p. 13)

Actualmente se cuenta con una Guía de diseño brindada por la ACI (ACI440.2R-17)

2.2. Investigaciones relacionadas con el tema

2.2.1. Investigaciones nacionales

Baca Escobar, W., & Espinoza, E. (2016)., sostienen en su artículo que:

El uso del sistema CFRP en proyectos importantes y la necesidad de verificar el comportamiento de los elementos reforzados considerando los aspectos de resistencia, ductilidad, efectos de la longitud de adherencia, el efecto del número de capas de refuerzo, los efectos del sistema de puente de adherencia, entre otros, nos llevaron a realizar un programa de ensayos por flexión a escala natural realizados en el laboratorio de estructuras del CISMID.

Todo diseñador debe tener muy claro las propiedades de los diferentes sistemas de refuerzo de fibra de carbono, las que son proporcionadas por los fabricantes, además deben distinguir si las propiedades reportadas son únicamente de las fibras de carbono o son las propiedades del sistema compuesto o sea fibras compuestas con las resinas saturantes.

Como resultados los ensayos reportaron dos tipos de fallas: Por delaminación extrema: este tipo de falla se presentó en 6 de los especímenes ensayados, MB-02, MB-03, MB-04, MB-05 y SK-01 y SK-06 y por Fractura del Sistema FRP en la zona central: Este tipo de falla se presentó en los dos especímenes a los que se añadió un refuerzo tipo U en los extremos para mejorar el anclaje y evitar la falla por delaminación en los extremos.

Flores Tantaleán, L. (2016), en su artículo expone que:

Estos sistemas CFRP cada vez en el Perú son más usados por muchos factores: tienen un costo muy competitivo frente a los sistemas convencionales de refuerzo y un comportamiento estructural muy bueno. Aunque en el Perú son pocas las empresas especialistas en su diseño y aplicación, normado por el American Concrete Institute (ACI) y por los fabricantes de la fibra, este sistema ha terminado convenciendo a todos los componentes de círculo constructivo: los propietarios están conformes por la versatilidad que ofrece el sistema y su capacidad para modificar el uso de estructuras, los proyectistas aún siguen intrigados en las maravillosas propiedades de estos materiales y los contratistas están satisfechos con su rápida aplicación y adecuación a las estructuras.

Como conclusiones tenemos que las aplicaciones de este sistema son tantas como las necesidades de reforzamiento de una estructura. Y en el campo del reforzamiento estructural, en un País altamente sísmico como el nuestro y con muchas edificaciones que han sido construidas por mano de obra sin experiencia, con escasa dirección técnica y sin respeto alguno de normas o reglamentos, como profesionales debemos estar atentos al uso de estas nuevas tecnologías que nos simplifican la vida con una buena relación beneficio-costos en comparación a los métodos tradicionales.

Baca Escobar, W. (2016), sostiene en su artículo que:

Se han realizado una serie de ensayos a escala natural de vigas reforzadas con el sistema CFRP de diferentes patentes, para verificar su comportamiento y resistencia hasta la falla. En base a estos resultados se proponen técnicas de reforzamiento y recomendaciones de diseño que permitirán mejorar el comportamiento de los elementos sujetos a cortante y flexión.

Los resultados obtenidos en estos ensayos son muy interesantes e ilustran lo complejo del comportamiento real, se ha determinado, que algunos especímenes ensayados no alcanzaron la resistencia nominal teórica de diseño, fallando prematuramente por delaminación del sistema y por desprendimiento del recubrimiento del concreto.

Como conclusión, el reforzamiento con CFRP incrementará la resistencia de cualquier sección por flexión, sin embargo, la falla final será del tipo frágil, debido a la pérdida de ductilidad de la sección. Por ello es importante determinar qué tipo de elementos pueden ser reforzados mediante esta técnica.

Los efectos estudiados de las variables “ancho de la capa” de refuerzo y el “número” de capas se reflejan en los ensayos, por regla se tiene que: A menor ancho de capa, mayor esfuerzo de adherencia, por lo que la delaminación ocurrirá a valores menores de flexión. Del mismo modo la resistencia disminuye con el incremento del número de capas de refuerzo.

Alegre Gago (2017), en su tesis expone que:

Estudiar el comportamiento elástico e inelástico de vigas de concreto armado reforzadas con fibras de carbono sometidas a flexión. Para lo cual se analizarán vigas de concreto armado reforzadas con acero y con fibras de carbono (CFRP), empleando diferentes cuantías de cada una. Se estudiará el comportamiento de cada caso mediante diagramas momento – curvatura y se comparará el aporte del uso de fibra de carbono tanto para la ductilidad como resistencia de las vigas de concreto armado sometidas a flexión. Se realizará el análisis comparativo para determinar las ventajas y desventajas del uso de este método de reforzamiento. Finalmente se presentarán las principales conclusiones y recomendaciones obtenidas del análisis empleado, brindando las consideraciones básicas para el uso de CFRP como reforzamiento de elementos estructurales.

La Torre & Tupac Yupanqui, (2019), en su tesis sostiene que:

En la evaluación técnico-económica de dos tipos de reforzamiento estructurales, tales como el polímero reforzado con fibra de carbono y el encamisado de concreto reforzado en los elementos estructurales de vigas y columnas. Con el objetivo de determinar la alternativa de solución óptima, teniendo en cuenta que la opción de encamisado de concreto reforzado es comúnmente la más empleada en el sector. En cuanto al proyecto, este corresponde a un edificio de hotel en el cual se requiere hacer cambio de uso en los pisos 3 y 4 incorporando una sala de gimnasio en los pisos ya mencionados. Respecto al diseño de las alternativas de reforzamiento, estas se rigen bajo las exigencias del Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú (E020 – Cargas, E030 - Diseño Sismorresistente, E060 – Concreto Armado) y de normas internacionales como la ACI (ACI440.2R – Fibra de carbono, ACI369 - Rehabilitación sísmica de edificios con estructuras de concreto existente, ACI318 – 14 Requisitos de reglamento para concreto estructural). Asimismo, se utilizó el programa Etabs para complementar el análisis del comportamiento estructural de las vigas y columnas. Posterior al diseño, se realizó la evaluación técnico-económica, proponiendo un plan de ejecución (cronograma) acorde con las características y contexto del proyecto, y un presupuesto económico para cada caso. Finalmente, mediante un análisis

comparativo que contrasta ambos criterios, se concluye la alternativa de reforzamiento óptima para la edificación de hotel analizada es el CFRP.

Estrada Santos & Yoplac Carhuatanta (2019), sostienen en su investigación que:

Las fibras de carbono aumentan la resistencia a la tensión, mejora el confinamiento y aumenta la capacidad de cargas. Con la aplicación del reforzamiento con fibra de carbono los elementos estructurales aumentaron sus momentos resistentes, sin que los efectos de fisura y el desprendimiento de la fibra de carbono se den según lo estipulado en la ACI 440 2R17, se usó vigas de acero estructural para solucionar las fallas de corte de las viguetas por la sobrecarga de los equipos. Los plazos de ejecución se vieron reducidos en un 20.48% comparado a un método tradicional a costa de un aumento de los costos de instalación.

Manrique Siles & Paucar Berrocal (2019), sostienen en su investigación que:

La importancia de realizar una correcta evaluación estructural dando a conocer a las fibras de carbono como la mejor alternativa de reforzamiento estructural en vigas de concreto armado en el Edificio Multifamiliar Huaraz, además obteniendo con ellas la mejor propuesta económica de reforzamiento moderno en comparación con lo convencional (encamisado de vigas) cuidando los intereses del cliente sin alterar el bien inicial.

2.2.2. Investigaciones internacionales

Fernández, Barrios Padura, & Molina Huelva (2018), sostienen en su artículo que:

Son numerosas las incógnitas respecto a su comportamiento a largo plazo, siendo fundamental el control de la unión entre el concreto y el refuerzo para asegurar su calidad. Es un sistema de refuerzo que se realiza por adhesión, y como consecuencia de la incertidumbre sobre la tensión de adherencia, en la práctica se resuelve con anclajes que encarecen la obra y que resultan inviables en grandes superficies de refuerzo. Una correcta puesta en obra y con garantías del adecuado comportamiento del refuerzo optimiza y pone en valor este sistema.

La implantación de un plan de control de calidad apropiado garantizará la optimización del refuerzo, y permitirá establecer los criterios de mantenimiento adecuados. En la investigación que se presenta se ha desarrollado un plan experimental para el control de calidad de la puesta en obra, basado en el estudio de la unión entre concreto y las bandas de refuerzo, teniendo en cuenta diferentes tipos de concreto y sistemas de preparación superficial. Un plan de control de calidad in situ con ensayos semidestructivos tipo Pull-Off y no destructivos tipo ultrasonidos, permite verificar la efectividad del refuerzo.

Como conclusiones, tenemos que, el control de calidad de las obras de refuerzo de estructuras de concreto armado con materiales compuestos FRP, debe incluir ensayos para evaluar la ejecución, como son los ensayos tipo Pull-Off y ultrasonidos. Se confirma que es posible efectuar un control de calidad del refuerzo de estructuras de concreto armado mediante FRP con ensayos no destructivos como ultrasonidos y Pull-Off, recomendándose su inclusión en los protocolos de inspección.

Chapple C. (2010), en su artículo expone que:

En base a la experiencia recogida tras el sismo sucedido en Chile, el uso de la fibra de carbono es una tecnología que debiera aprovecharse para el momento que vive el país. Entre sus ventajas destaca su rápida instalación y aplicación para la gran variedad de daños y obras. A pesar de que los sistemas FRP tienen diferencias, en general las fibras de carbono poseen una densidad de 1,700 kg/m³, representando alrededor de un 20% de la densidad del acero. Esto entrega ventajas

en transporte e instalación y una resistencia de cerca de 40 000 kg/cm², representando 9,5 veces la resistencia de las barras de refuerzo de acero.

Como conclusiones, tenemos que, el proyecto de refuerzo o reparación se define por la aplicación de criterios básicos: Evaluación de la estructura, Identificación y diagnóstico de las causas del deterioro. Determinar las opciones y objetivos de reparación o refuerzo, Selección de métodos y materiales apropiados para la recuperación y mantenimiento futuro. El desarrollo nacional y tecnología extranjera son las técnicas que pueden aplicarse en un proyecto de recuperación estructural de concreto.

Concrelab. (2020), sostiene en su artículo que:

El ensayo de adherencia Pull Off, te ayudará en tu proyecto u obra para que puedas validar fácilmente la resistencia de la unión (zona de interfaz) entre el material o pegamento de prueba y el concreto. Realizados bajo la norma ASTM D – 7234. El ensayo de adherencia Pull Off, te permite transmitir la tensión triaxial directa con un equipo portátil, a un disco previamente adherido al concreto; siempre después de transcurrido un tiempo suficiente para que se haya curado la resina o material adhesivo usado en la fijación del disco.

Como conclusión, el ensayo de “Pull off”, es uno de los métodos de ensayo a tensión, que, a diferencia de otros métodos para ensayar la adherencia, puede realizarse tanto en laboratorio, como “in situ”; basta solamente disponer de una cara expuesta del elemento a ensayar, siendo aplicable a vigas, losas u otro elemento.

Li, Z., & Meng, Z. (2016), en su artículo expone que:

El propósito de este artículo es realizar una investigación sobre las aplicaciones de las técnicas de ensayos no destructivos (NDT) existentes, especialmente NDT de radiofrecuencia (RF), para compuestos plásticos reforzados con fibra de carbono (CFRP). Se aplicó la guía de ondas de extremo abierto para detectar las desuniones y delaminaciones entre el laminado compuesto de CFRP y el sustrato de concreto. Señalaron que la frecuencia de operación y la distancia de separación deben elegirse de manera óptima (o casi óptima) para que la medición pueda ser

sensible a la presencia de un desprendimiento. Las regiones desunidas más pequeñas que se pudieron detectar a 10 y 24 GHz fueron de 20 mm por 5 mm.

Luego se empleó la guía de ondas para detectar la rotura de la fibra y determinar la orientación de la fibra en los parches de CFRP. Se sugirió que la orientación paralela de la polarización del campo eléctrico en la guía de ondas con respecto a la orientación de la fibra era óptima para la detección de rotura de fibra. En la prueba, se detectó una pequeña rotura con dimensiones de 0,2 mm por 1 mm. La determinación de la orientación de la fibra se investigó variando el ángulo entre la dirección de la fibra y la polarización de la señal.

En donde concluye que, se presentó una descripción general del progreso realizado en la aplicación de métodos RF NDT para compuestos de fibra de carbono. Primero, se ha revelado la característica anisotrópica del tenor de conductividad de los compuestos de fibra de carbono.

Se debe prestar especial atención a la relación entre la frecuencia de operación y la profundidad de penetración de la señal de RF. La profundidad es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia. Los métodos existentes de RF NDT para compuestos de fibra de carbono se han resumido en cuatro categorías principales, que son métodos de inducción electromagnética, métodos de resonancia, termografía basada en RF y métodos de propagación de ondas de RF. El mecanismo, las aplicaciones y las limitaciones de cada método se han presentado en detalle, lo que ofrece una guía completa para la selección de un método RF NDT adecuado. Se ha demostrado un ejemplo de detección de daños por impacto utilizando la formación de imágenes de guía de ondas de extremo abierto, inductores espirales acoplados y microscopía de microondas de campo cercano.

Syed Mohamad Syahir, S. & col. (2017), sostienen en su artículo que:

Dentro de las ventajas de los compuestos de FRP, incluida la alta resistencia a la tracción, el peso ligero y la facilidad de aplicación, han llevado a los ingenieros de todo el mundo a utilizar el FRP como una alternativa fácil de usar en comparación con los materiales convencionales para fortalecer las estructuras de concreto armado. Casi todas las técnicas de refuerzo por flexión o cizallamiento con CFRP se basan en la unión del material compuesto al sustrato de concreto. La

efectividad del sistema de refuerzo de FRP depende principalmente de la longitud efectiva debido a la unión de la fibra en la zona efectiva. Sin embargo, la sensibilidad a la temperatura, la calidad del concreto, la preparación de la superficie, el ancho del FRP y la longitud de la unión son algunos de los factores que afectan la resistencia última de la muestra entre el concreto y el CFRP.

En estudios anteriores, se destacó que el ancho de fibra juega un papel importante al influir en la falla de desprendimiento de CFRP. Una relación de ancho mayor de la placa de CFRP dará mayor pendiente de deformación elástica del deslizamiento global pero una menor ductilidad de fibra al concreto. Cuando el valor de la relación de ancho está cerca de 1, dará el mejor rendimiento. Aparte de eso, cada relación de ancho formará diferentes tipos de modos de falla. Por lo tanto, a partir de estudios anteriores, el resultado del concreto reforzado con CFRP producirá resultados diferentes según los tipos de preparación, como diferentes tipos de fibra, número de capas, longitud de unión y ancho de FRP.

Este estudio se centra en el efecto de la fibra con diferentes relaciones de ancho para mejorar la resistencia del concreto y los tipos de modos de falla producidos. Donde concluyen que, la carga última para prismas de concreto reforzado con CFRP aumentó a medida que aumentaba la relación del ancho de la fibra. Se logra una mejora significativa de la carga a más del 80% cuando el concreto se refuerza con una relación 0,5 o superior en ancho de CFRP. El aumento en la relación de ancho conduce a un aumento en la rigidez de la muestra, lo que resulta en una carga de rotura más alta.

Zhuang, N., Dong, H., Chen, D., & Ma, Y. (2018), en su investigación expone que:

Los productos de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP), tienen una serie de ventajas (como resistencia a la corrosión, una relación resistencia – peso favorable, durabilidad en entornos adversos y facilidad de aplicación), han sido ampliamente aceptados como nuevas tecnologías, eficaces para restaurar o mejorar el rendimiento de estructuras RC.

El objetivo principal de este artículo fue examinar la efectividad de diferentes arreglos de láminas de CFRP y anclajes finales para mejorar el desempeño de vigas de concreto armado (RC) envejecidas y seriamente dañadas reforzadas con diferentes disposiciones de laminados externos de polímero reforzado con fibra

de carbono (CFRP) y anclajes finales. Siete vigas RC de un puente viejo, de $250 \times 200 \times 2300$ mm, fueron probados. Todas las muestras se cargaron para ceder la carga para evaluar las propiedades mecánicas iniciales.

Además, estos especímenes seriamente dañados fueron reparados usando diferentes esquemas de refuerzo con CFRP y recargados hasta fallar. El crecimiento de la carga de rendimiento debido al refuerzo de CFRP osciló entre 5% y el 36%. Se investigaron diferentes parámetros que incluían la dimensión y posición de CFRP, la longitud de unión y el anclaje de los extremos, y se obtuvieron conclusiones sobre la ductilidad de la viga, la respuesta a la deflexión en la mitad de la carga y el modo de falla.

En donde concluyen que, las vigas de RC envejecidas y gravemente dañadas reforzadas con la lámina de CFRP fallan en una variedad de modos que incluyen grietas por flexión, grietas por cizallamiento, desprendimiento, grietas por flexión y desprendimiento y división de la unión en las barras. Los resultados de este estudio, y las conclusiones que respaldan, se pueden aplicar en la práctica de la ingeniería y la construcción para guiar la reparación de vigas RC envejecidas y gravemente dañadas.

Como refuerzo las láminas de CFRP deben extenderse sobre el tramo de cortante para prevenir o restringir la formación de grietas por cortante. Las caras laterales de la viga también deben reforzarse con la lámina de CFRP para evitar la propagación de grietas. Las disposiciones de los laminados externos de CFRP y anclajes en los extremos tienen un efecto significativo en el comportamiento de flexión en la viga. Para tener un buen efecto de refuerzo, la longitud de unión con CFRP debe ser mayor que la longitud de unión efectiva. La tensión se concentra en el extremo del laminado CFRP y disminuye rápidamente en la dirección de la mitad del tramo.

Las envolturas en U y los anclajes CF pueden prevenir eficazmente el desprendimiento prematuro del extremo de la hoja de CFRP, y los anclajes CF mejoran la rigidez de la viga más Efectivamente en comparación con las envolturas en U, especialmente en la etapa posterior al rendimiento. Las vigas reforzadas con anclajes CF pueden aumentar la ductilidad en la etapa de deformación en comparación con las vigas sin anclajes.

Villanueva, P. (2017), sostiene en su tesis que:

Las fibras naturales han sido tradicionalmente un recurso económico para obtención de resistencias medias a tracción. Su principal problema ha sido de durabilidad, contra restada por su fácil renovación y bajo coste. Con respecto al uso de fibras naturales FRP Codispoti et al. (2013) ha estudiado las propiedades mecánicas de diversas fibras incluyendo sisal, yute, cáñamo y lino; sus estudios concluyen la viabilidad del uso de estas fibras para refuerzo de estructuras con estados tensionales no muy elevados, como suele ser el caso de las fábricas. Junto con la degradación por agresión ambiental, los FRP de fibras naturales presentan una menor interacción fibra-matriz que otros compuestos.

Las fibras de nueva generación permiten la fabricación de fibras con muy elevada resistencia a tracción a igual modulo elástico que la fibra de carbono. Destaca el PBO (Poloparafenil benzobisoxasol), empleado hasta la fecha para matrices inorgánicas y no para FRP; Loreto et al (2013) destacan de esta fibra su resistencia a altas temperaturas y su buena interacción fibras soporte. A modo de resumen se presenta en la tabla 4 los principales criterios de selección que pueden aplicarse en función de propiedades a las distintas fibras que pueden emplearse en materiales compuestos FRP. En este caso, considerando refuerzos de estructuras en concreto armado, se han penalizado los módulos elásticos bajos (recomendables para estructuras deformables fabricadas con ladrillo, de madera, entre otras).

Silva Vera, P. (2016), sostiene en su tesis que:

El comportamiento del material compuesto en estas condiciones y así saber con precisión si el reforzamiento va a ser útil para las cargas que debe resistir. Adicionalmente, se ensayan los materiales por separado para tener un dato exacto de la resistencia de cada uno y poder comparar los resultados con mayor exactitud. Para reforzamientos de estructuras por lo general se emplean técnicas de recrecido en concreto, o con la adhesión de placas metálicas, tejidos de materiales compuestos. Este estudio intenta verificar la posibilidad de realizar reforzamientos a estructuras de acero mediante el pegado de tejidos con fibra de carbono. Especial atención se da al estudio del comportamiento a tracción, en consideración que no existe código vigente para el uso del CFRP en acero y

además no existe una información abundante sobre este tema. (Galahad, y otros, 2012).

Rescalvo Fernández, F. (2014), sostiene en su investigación que:

El uso de polímeros reforzados con fibras (FRP) como una alternativa al acero para el refuerzo de elementos con madera. En los últimos años el auge en el uso de los materiales compuestos en construcción está incrementando su popularidad. Sin embargo, actualmente la aplicación de estos refuerzos presenta algunos puntos oscuros, como es el desconocimiento en el comportamiento mecánico de la estructura y el material reforzado, sus mecanismos de fallo (en particular la deslaminación madera-FRP), la falta de normativas, de soluciones constructivas y guías de aplicación. En este contexto, evalúa experimentalmente diferentes configuraciones de refuerzo con fibra de carbono (CFRP) sobre vigas de pino de más de 200 años en servicio, extraídas de la Facultad de Derecho de la Universidad de Granada en 2015 por la empresa Dávila Restauración de Monumentos S.L.

Moncayo Theurer, M., & Rodríguez, J. (2016), sostiene en su artículo que:

La razón de uso de las estructuras es para dar soporte, pero frente a situaciones durante su vida útil o condiciones de uso extremas, puede ponerse en peligro su estabilidad, donde la fibra de carbono se ha vuelto una alternativa de material de reforzamiento, definimos su producción, conformación, descubrimientos y en qué se puede utilizar.

Donde concluye que, muchas estructuras por haber superado su vida útil o haber sobrepasado un evento catastrófico requieren de una intervención para restaurar su capacidad. El objetivo es dar seguridad para que la estructura pueda superar con solvencia cualquier demanda de fuerza excepcional que se pueda provocar. Una forma muy moderna y práctica de restaurar la capacidad de una estructura es

Crawford, K. C. (2016), sostiene en su artículo que:

El objetivo de este trabajo es presentar un método de prueba no destructivo (NDT) diseñado para evaluar la condición de la unión y la durabilidad a largo plazo de los sistemas de laminado (placa) CFRP aplicados a los puentes de carreteras RC.

La durabilidad a largo plazo de los sistemas estructurales de CFRP aplicados a puentes de carreteras de hormigón armado (RC) es una función del comportamiento de unión del sistema a lo largo del tiempo, donde es necesario realizar pruebas periódicas de la condición de unión CFRP-concreto para mantener el rendimiento de la carga.

Donde concluye que, las pruebas de laboratorio de la máquina de eco de impacto con el análisis de señal asociada muestran una correlación entre la frecuencia de la señal y la condición de enlace laminado CFRP.

El método de eco de impacto presentado puede ser un medio eficaz para evaluar rápidamente la condición de unión de grandes longitudes de placas CFRP aplicadas a grandes cantidades de puentes de carreteras.

Calla Deza, L. (2018), expone en su tesis que:

En la superestructura del puente, La Capilla – Moquegua, Se realizó la patología del puente La Capilla teniendo como diagnostico final, fallas con repercusiones estructurales en la superestructura, se hizo el análisis con la norma vigente de manera analógica y se verificó los resultados con el programa de análisis y diseño de puente CsiBridge.

Donde se concluye que, con la utilización de la fibra de carbono se pudo verificar que el reforzamiento a flexión y corte con fibra de carbono FRP es una alternativa muy eficiente y fácil de instalar, resultando económico con respecto a otras alternativas de reforzamiento.

2.3. Estructura teórica y científica que sustenta el estudio

2.3.1. Casos en los que se aplica el reforzamiento de estructuras

Según Alegría, N. (2016), En las estructuras las fallas se ponen de manifiesto con la aparición de una serie de señales, que se engloban dentro de la sintomatología estructural. Ante estos síntomas y previa investigación de sus causas el técnico especialista, debe establecer un diagnóstico de la enfermedad que sufre la estructura.

Estructuras sin respaldo técnico

Cuando una estructura fue construida de manera no técnica, sin respaldo y sin cumplir la norma sísmica, debe ser inmediatamente analizada y reforzada.

Cambio en el uso de la edificación

Cuando una estructura fue diseñada para un propósito y el mismo se cambia a lo largo de su vida útil, debe de considerarse un rediseño y un reforzamiento. Un ejemplo sencillo es cuando el edificio fue diseñado para vivienda y ahora se utiliza para almacén o bodega y requiere de una carga mayor.

Fallas en la fase diseño

Cuando se sospecha de vicios o fallas estructurales en la etapa de diseño, especialmente en lo que concierne al área donde se asumen errores. Estos errores normalmente se identifican por fisuras, hundimientos, o fallas localizadas.

Fallas en la fase construcción

Cuando se sospeche de vicios o fallas estructurales en la etapa de construcción. Debe realizarse un chequeo, especialmente en el sector donde se observan fallas y deterioros.

Deterioro de los materiales

Cuando se sospeche o se haya recabado suficiente información sobre el deterioro de los materiales constitutivos de la estructura, como el concreto o el acero. Cuando se produzcan daños a la edificación debido a cargas accidentales como explosiones, fuego, impacto, cargas sísmicas o de viento.

Vida útil de la edificación

Cuando se conozca que pasó con la vida útil de la estructura, debe realizarse un chequeo completo, con un modelo de análisis y chequeo de las características de los materiales de la edificación.

2.3.2. Tipos de reforzamiento

Reforzamiento por aumento de secciones

Se aplica cuando se ha determinado que las secciones de la estructura no son suficientes frente a las cargas que deberá resistir.

Reforzamiento por deterioro de varillas de acero

Cuando se determina que, debido a ataques químicos o ambientales, los aceros de la estructura están muy desgastados. La estructura tiene un déficit de capacidad de resistencia ante esfuerzos tensionales, ya que el concreto no es capaz de resistir solvemente este tipo de esfuerzos, poniendo en peligro la estabilidad de la estructura.










2.3.3. Reforzamiento por fisuras en los elementos estructurales

En el caso de producirse fisuras de los elementos estructurales, debe hacerse un estudio profundo de la razón de estas fisuras. Deben analizarse la dimensión de las fisuras, su ubicación y su ángulo para identificar la razón de las mismas. Debe estudiarse la posibilidad de reemplazar elementos o porciones de elementos dañados o en el reforzamiento de elementos a través de fibras de carbono.

2.3.4. Tipos de fibra

Figura 4

Tipos de fibra para reforzar elementos estructurales de concreto

| | | | |
|---|---------------|--|----------|
|  | Polipropileno |  | Vidrio |
|  | Poliétileno |  | PVA |
|  | Kevlar |  | Acrílica |
|  | Metálica |  | Nylon |
|  | Carbon | | |

Fuente: Elaboración propia

2.3.5. La fibra de carbono

El nombre de fibra de carbono es otorgado porque contiene hilos compuestos de mini filamentos de carbono, con diámetros entre 5 y 10 μm (Llano, 2009). Su composición atómica es cercana al grafito. En el grafito los microfilamentos o placas de carbono se colocan ordenadamente unas sobre otras y se entrelazan con fuerzas débiles, por lo que el grafito es blando y muchas veces transparente. En el caso de la fibra de carbono, miles de microfilamentos se apilan de manera desordenada y densa, lo que le da gran resistencia al material. Se considera que la fibra de carbono tiene mejores características que el acero ya su resistencia mecánica es 10 veces mayor. Adicionalmente es un material muy liviano, como el plástico, con una densidad de 1.750 kg/m³.

La fibra de carbono es un elemento que puede aportar refuerzo a tensión, siendo de alta resistencia, de fácil colocación y además con una capacidad mayor inclusive que el mismo acero para resistir esfuerzos tensionantes. También la fibra de carbono puede aportar confinamiento al material. (Moncayo Theurer & Rodriguez, 2016, pág. 59)

2.3.6. Tela de fibra de carbono

La fibra de carbono se comercializa en forma de tela con diferentes espesores. Sus características principales son las siguientes: Elevada resistencia a la tensión y compresión.

Elevado precio.

Muy liviano y con una alta relación resistencia/peso.

Estable ante ataque de agentes externos.

Elevado módulo de elasticidad.

(Moncayo Theurer & Rodriguez, 2016, pág. 59)

2.3.7. Componentes de la fibra de carbono

El componente más importante de la fibra de carbono es el PAN (poliacrilonitrilo). Los hilos de PAN entrelazados conforman la fibra de carbono. El petróleo está constituido principalmente de carbono, el cual procede de una fuente de fósiles orgánicos, por lo que, la mayoría de los componentes de la fibra de carbono provienen del petróleo. (Moncayo Theurer & Rodriguez, 2016, pág. 59)

2.3.8. Criterios de producción

A través de un proceso de calentamiento del PAN, las moléculas diferentes al carbono salen del compuesto, mientras las moléculas de carbono se reordenan, conformando una unión hexagonal fuerte. Así, la fibra de carbono resulta de la quema del elemento precursor que elimina los compuestos químicos extraños.

El procedimiento más utilizado para producir la fibra de carbono es el siguiente: A una temperatura de 300 °C el material es estirado en un horno especial, provocando el alineamiento de las moléculas para su estabilización. Después de 1000 °C se queman los rastros de nitrógeno o hidrógeno y las moléculas de carbono se orientan de forma hexagonal a lo largo de la fibra. Adicionando un nuevo periodo de calentamiento a 2000 °C, se le aplica finalmente un catalizador que provee de adherencia a la fibra.

El resultado obtenido son filamentos de carbono con una pureza del 95 al 99 %. Este material es trefilado a diámetros de 5 a 10 μm , 5 veces más fino que un cabello humano. Los hilos trefilados de carbono se les conocen como “mechas de carbono”, estas mechas se trenzan en ambas direcciones de manera que se forme una tela.

Existen varios tipos de trenzado según el uso del material. Existe el trenzado llamado roving donde intervienen 12,000 filamentos. Un trenzado más fuerte es llamado heavy roving o trenzado pesado que incluye hasta 400,000 filamentos y produce un material mucho más resistente. Una vez realizado el trenzado, la tela resultante se somete a un proceso donde se le aplica la resina epóxica y el catalizador. De acuerdo con el tipo de trenzado se puede especificar que la resistencia del tejido sea mayor en una dirección que en otra. La resistencia de la fibra de carbono se puede observar en el momento de un impacto, donde la fuerza del objeto que impacta se distribuye entre miles de hilos de carbono. Ello provoca que en muchos casos el material ni se deforme.

El segundo componente es la resina, un agente que se endurece en presencia de un catalizador. La resina más utilizada es un tipo epóxica, llamada diglicidileter de bisfenol o BADGE (López F et al., 2000) que supera la resistencia de otras resinas como el poliéster, además de resistir temperaturas superiores a 200 °C y la corrosión y ataque de varios agentes químicos.

Dependiendo del producto utilizado, una fibra conocida en el mercado como UHM puede alcanzar una resistencia a la tracción de 2400 MPa. De forma similar

la fibra tipo IM, podría llegar a tener una resistencia a la tracción de 6200 MPa con un módulo de elasticidad de 234.4 GPa. (Bernal, 2009)

2.3.9. Ventajas del uso de fibras de carbono en estructuras

Entre las ventajas de usar la fibra de carbono como estructura de refuerzo están: mayor resistencia a los impactos, mayor resistencia al fuego y mejor aislamiento térmico. El aumento de la resistencia aporta mayor capacidad a esfuerzos de tensión y confinamiento de los elementos compuestos. (Moncayo Theurer & Rodriguez, 2016, págs. 59,60)

Entre las ventajas más resaltantes tenemos: la seguridad estructural y el costo reducido frente a otros tipos de reforzamiento.

Para la fase de instalación:

- No se necesitan equipos o medios pesados/costosos.
- Se puede instalar en caso de plazos de ejecución reducidos.
- Se puede instalar con acceso o espacio de trabajo limitado.

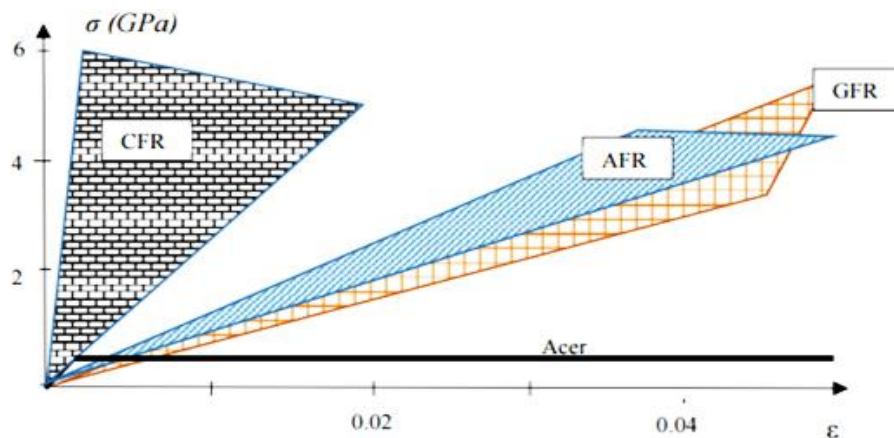
Para la Fase de servicio:

- No hay interferencias con los elementos existentes.
- No necesita de mantenimiento.
- Mantiene la geometría y estética.

2.3.10. Desempeño mecánico de la aplicación CFRP

Figura 5

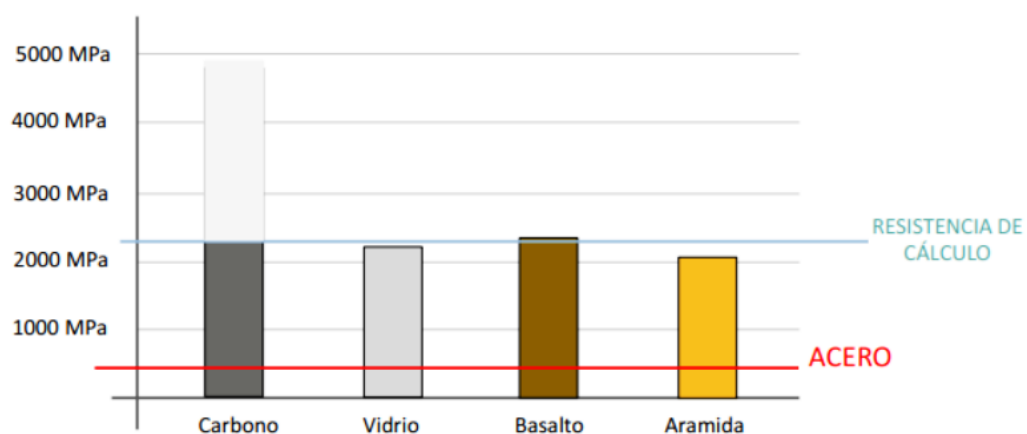
Curvas esfuerzo - deformación de materiales FRP y acero



Fuente: FIB (2019)

Figura 6

Resistencia de cálculo de materiales FRP y acero



Fuente: Sika Perú

2.3.11. Materiales compuestos CFRP

Son materiales ligeros, fuertes que se usan en la fabricación de numerosos productos utilizados en nuestra vida diaria. Es un término utilizado para describir un reforzado con fibra de material compuesto que utiliza fibra de carbono como el componente estructural primario.

Tabla 1

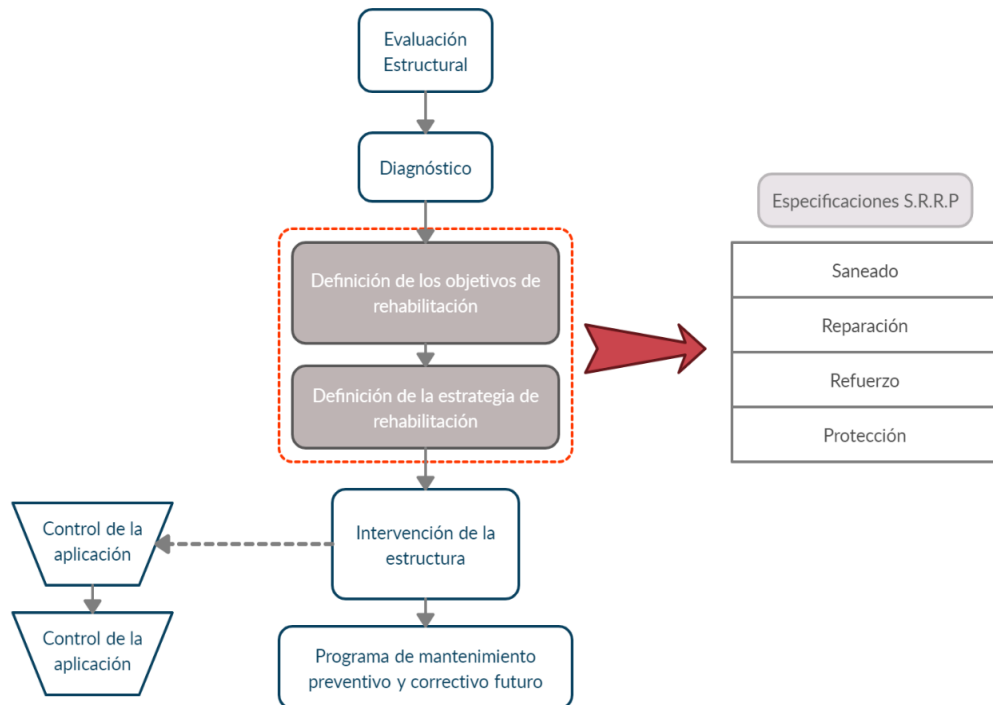
Especificaciones de una lámina de carbono según fabricantes

| Fabricante | Modelo | Módulo tensión ($E_{cf} * t_{cf}$) (kN/mm) | Módulo elasticidad (E_{cf}) (kN/mm ²) | Espesor (t_f) (mm) | Resistencia última a tensión ($f * f_u$) (kN/mm ²) |
|------------|--------------|--|--|------------------------------|--|
| FyFE | Tyfo SCH-41 | 103,52 | 281 | 0,368 | 2.300,00 |
| BASF | MBrace CF160 | 74,91 | 227 | 0,33 | 3.800,00 |
| FOREVA | 700SC | 115,2 | 240 | 0,48 | No indicado |
| Mitsubishi | REPLARK | 91,52 | 640 | 0,143 | 1.900,00 |
| SYKA | 600C | 80,88 | 240 | 0,337 | 4.300,00 |
| Simpson | CSS-UCF20 | 75,9 | 230 | 0,33 | 4.800,00 |
| Olympus | Tex 640 BI | 96,64 | 640 | 0,151 | 2.511,00 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 7

Proceso de instalación de la aplicación de CFRP



Fuente: Elaboración propia

2.3.12. Normas vigentes utilizadas

Se tienen las guías de diseño internacionales:

- FIB Bulletin 14: Externally Bonded FRP, Reinforcement for RC Structures.
- ACI 440.2R: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures.

Se tienen Códigos ACI utilizados:

- ACI 318-14, Concreto Estructural.
- ACI 216.1-14, Resistencia al Fuego.
- ACI 440.2R-17, Refuerzos FRP.

2.4. Definición de términos básicos

2.4.1. Reforzamiento

Aumento de secciones o adición de materiales nuevos que aumenten la capacidad resistente de los elementos estructurales y de la estructura en su conjunto.

2.4.2. Reparación estructural

Intervención sobre fallas y fisuras que intenta restituir las características iniciales de resistencia de la estructura, luego de un evento extraordinario que le provocó daños.

2.4.3. Restauración

Intervención sobre la edificación orientada a recuperar las características arquitectónicas, pero sin restituir las características estructurales de resistencia mecánica.

2.4.4. Rehabilitación

Intervención en una estructura para ponerla en funcionamiento, luego de ser afectada por un evento muy fuerte. (Moncayo Theurer & Rodriguez, 2016, pág. 60)

2.4.5. Resistencia

Dentro de la ingeniería la resistencia de un elemento cualquiera se define como la capacidad para soportar esfuerzos y fuerzas aplicadas sin llegar al estado de rotura, adquiriendo deformaciones temporales o permanentes. (Ottazzi Pasino, 2004). Sin embargo, para el diseño de elementos de concreto armado se encuentra varias definiciones de acuerdo con el tipo de carga aplicada, al tipo de ensayo realizado, tipo de diseño, etc. Por lo tanto, como parte del alcance de nuestra investigación, consideraremos las siguientes definiciones:

a) Resistencia requerida

La resistencia requerida es aquello que un elemento o sección transversal debe tener para resistir las cargas amplificadas, los momentos, fuerzas internas y combinaciones de cargas correspondientes según lo estipulado en la Normativa Vigente (Norma peruana E.060 Concreto Armado y Norma ACI 318 14). (Alegre Gago, 2017)

b) Resistencia nominal

La resistencia nominal es la resistencia de un elemento o una sección transversal calculada con las disposiciones, los límites e hipótesis del método de diseño por resistencia según lo estipulado en la Normativa Vigente (Norma peruana E.060

Concreto Armado y Norma ACI 318 14), antes de aplicar cualquier factor de reducción de resistencia. (Alegre Gago, 2017)

c) Resistencia de diseño

La resistencia de diseño es la resistencia nominal multiplicada por el factor de reducción de resistencia ϕ que corresponda, según lo estipulado en la Normativa Vigente (Norma peruana E.060 Concreto Armado y Norma ACI 318 14). El factor de reducción a la resistencia (ϕ) es un factor menor en la unidad que reduce la resistencia para considerar las incertidumbres en los materiales y en dimensiones (Norma peruana E.060 Concreto Armado y Norma ACI 318 14). La determinación de los factores de reducción a resistencia, debiéndose tener en cuenta lo siguiente:

- La probabilidad de existencia en miembros con una resistencia baja debida a variaciones en la resistencia de los materiales y las dimensiones.
- Las inexactitudes en las ecuaciones de diseño.
- Reflejar la ductilidad disponible y la confiabilidad requerida para el elemento sometido a los efectos de carga en consideración
- Reflejar la importancia del elemento en la estructura.

(Alegre Gago, 2017, pág. 16)

2.4.6. Rigidez

Para Ottazi Pasino (2004), La rigidez se puede definir como la propiedad que tiene un material para oponerse a la deformación. La rigidez del material se cuantifica mediante el módulo de elasticidad o de Young (E). Ante un mismo esfuerzo, el material con mayor E se deforma menos, obedeciendo la Ley de Hooke

Ecuación 1: Módulo de elasticidad.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

La Norma permite adoptar cualquier suposición razonable para la estimación de la rigidez en flexión (EI) y en torsión (GJ) de las columnas, vigas, muros, etc. Las suposiciones que se hagan deberán ser consistentes a lo largo de todo el análisis. Las rigideces EI y GJ que se adopten para el análisis estructural, idealmente deberían reflejar lo siguiente:

- El grado de fisuración y acción inelástica a lo largo de cada elemento antes de la fluencia.
- El efecto de la duración a la carga. Cargas de corta duración y cargas sostenidas que producen fluencia plástica en el concreto comprimido. (Alegre Gago, 2017, pág. 17)

2.4.7. Ductilidad

La ductilidad se define como la propiedad de la estructura de soportar deformaciones una vez alcanzado su límite elástico; es decir, la capacidad de deformarse en el rango inelástico sin colapsar. (Ottazzi Pasino, 2004)

La principal fuente de ductilidad de las estructuras de concreto armado reside en la gran capacidad del acero para resistir ciclos repetitivos de cargas, sin una disminución significativa de su resistencia, aun cuando se encuentra en niveles muy altos de deformación. (Bonett Díaz, 2003)

Los tipos de ductilidad que se utilizan son los siguientes: (Gioncu, 2000)

- Ductilidad del material o ductilidad axial, que caracteriza a las deformaciones plásticas del propio material.
- Ductilidad de la sección transversal, o ductilidad de curvatura, que se refiere a las deformaciones plásticas de la sección transversal, teniendo en cuenta la interacción entre las partes que componen la sección transversal en sí.
- Ductilidad del elemento, o la ductilidad de rotación, cuando se consideran las propiedades del elemento.
- Ductilidad de la estructura, o ductilidad de desplazamiento, que considera el comportamiento de toda la estructura.

2.4.8. Materiales compuestos de polímeros

Como cualquier molécula, los materiales poliméricos están formados en su mayoría por átomos de elementos no metálicos unidos entre sí por enlaces covalentes adquiriendo el nombre genérico de polímeros (o macromoléculas) porque son moléculas gigantescas compuestas de unidades repetitivas. Hay casos en los que el polímero está formado por átomos de elementos no metálicos y semimetálicos.

2.4.9. Control de calidad

Es el engranaje que se encargara de planear, ejecutar, coordinar y controlar todas las actividades que tiene como objetivo entregar al cliente un producto con la calidad requerida por él; uno de sus aspectos principales es el establecimiento de políticas claras de calidad, que perfilen los lineamientos por seguir.

Tabla 2

Tabla Proceso de Control de Calidad

| Diseño | Propiedades del producto | Pruebas y Certificación | Aplicación | Especificación |
|---|--|---|---|--|
| Trabajando juntos como un equipo, los ingenieros son capaces de proporcionar un diseño preliminar | Existe una amplia gama de productos certificados que están disponibles a elección. Esto ayuda a optimizar los requisitos de su proyecto. | Al proporcionar reacondicionamiento estructural, necesita una solución confiable. El sistema Fibrwrap cumple con el Servicio de Evaluación de la CPI bajo las secciones ICC AC 125 y 178, proporcionando pruebas de que nuestro sistema FRP cumple con las cláusulas pertinentes del Código de Construcción de Nueva Zelanda (NZBC). ⑧⑧ | Tener productos de los que puede confiar proporciona tranquilidad. Tener una empresa de aplicación precalificada y auditada anualmente garantiza que la aplicación se lleva a cabo correctamente. | Reúne colectivamente los criterios de los pasos 1, 2, 3 y 4 para proporcionar garantía de calidad. |

Fuente: Elaboración propia

2.4.10. Ensayo no destructivo

Son aquellos ensayos que no alteran la forma ni las propiedades de un objeto. No producen ningún tipo de daño o es prácticamente imperceptible. Este tipo de ensayos sirven para estudiar propiedades físicas, químicas o mecánicas de algunos materiales. (SCI, 2020)

2.4.11. Adherencia

Es un concepto que hace mención de la aglutinación o el pegamiento físico de distintos elementos; en este caso entre el concreto y los polímeros armados con fibra optimiza el refuerzo. (SCI, 2020)

2.4.12. Ensayos Pull-off

El ensayo de adherencia Pull Off, te permite transmitir la tensión triaxial directa con un equipo portátil, a un disco previamente adherido al concreto; siempre después de transcurrido un tiempo suficiente para que se haya curado la resina o material adhesivo usado en la fijación del disco. (Concrelab, 2020)

2.4.13. Ensayos de ultrasonidos

Es un método de inspección que pertenece al tipo de ensayos no destructivos. Se basa en el fenómeno que provoca la reflexión de las ondas acústicas en un objeto. Mide las diferentes reflexiones que se producen cuando las ondas acústicas encuentran discontinuidades en su propagación. (SCI, 2020)

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis principal

La aplicación del sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra mejora las propiedades mecánicas de los elementos estructurales.

3.1.2. Hipótesis secundarias

- a) Al analizar los resultados en ensayos de laboratorio con el sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra de carbono se mejoran las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto.
- b) Al determinar el tratamiento de la superficie se mejora las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto.
- c) Al verificar el control del refuerzo mediante ensayos no destructivos se mejora las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto.

3.2. Variables

3.2.1. Variable independiente

Sistemas compuestos de polímeros reforzados con fibra

3.2.2. Variable dependiente

Elementos estructurales de concreto

3.3. Sistema de variables

3.3.1. Definición conceptual

- Sistemas compuestos de polímeros reforzados con fibra

Está compuesto en base a dos materiales, un tejido de microfibras de carbono (95% de carbono y un 5% por otros componentes, generalmente poliacrilonitrilo) y por una resina epóxica.

- Elementos estructurales de concreto

Los materiales componentes de este tipo de estructuras son el concreto y la armadura de acero. El principal componente de las estructuras de concreto armado; es una mezcla de cemento, arena, piedra y agua en medidas proporcionales y establecidas de acuerdo al grado de resistencia que se requiere.

3.3.2. Definición operacional

- Sistemas compuestos de polímeros reforzados con fibra

Es un tejido de microfibras que puede ser cortado y moldeado en diferentes formas según las estructuras a trabajar que será adherido con una resina epóxica, que actúa como un agente cohesivo para mantener la malla como un todo y que además protege a las fibras de la corrosión

- Elementos estructurales de concreto

Son elementos horizontales y verticales de concreto armado que se emplean en las modernas construcciones que requieren una construcción rápida y económica con el fin de ahorrar costos en materiales, mano de obra y tiempo de determinación

3.3.3. Operacionalización de las variables

Tabla 3

Operacionalización de las variables

| Variables | Clasificación de la variable | Dimensiones | Indicadores | Indices | Unidad de medida | Escala | Instrumento | Herramientas | Items |
|---|------------------------------|--------------------------|---|--|-----------------------|--|--------------------------------------|---|--|
| V.I. SISTEMAS COMPUESTOS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA | Interviniente | Instalación del sistema | Resultados de ensayos en laboratorio | Ensayos a compresión / computacionales | kg/cm ² | Cuantitativa Continua | Guías Manuales Fichas técnicas | Normas ASTM C-39: Método de ensayo estándar para compresión de especímenes de cilindro de concreto | Indicado en los formatos |
| | Continua | | | | | | | | |
| | Ordinal | Pruebas de adherencia | Ensayo de Pull off | N/mm ² | Cuantitativa Continua | ACI 440.1R-15 Guía de diseño y construcción sistemas de FRP para el fortalecimiento de estructuras de concreto | | | |
| | Dependiente | | Ensayo de ultrasonido | μs | | | | | |
| V.D. ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE CONCRETO | Discreta | Resistencia del concreto | Desempeño mecánico de los elementos estructurales de concreto | Chorro de arena a presión | l/cm ² | Cuantitativa Continua | Formato de Laboratorio | Manual de aplicación certificada del sistema TYFO® FYBRWRAP® | |
| | Ordinal | | | Micro perforaciones | und | | | Cuantitativa Continua | Norma E0.60 ASTM 400.037 fichas técnicas |
| | | | | | Ensayo de compresión | | | | N/mm ² |

Fuente: Elaboración propia

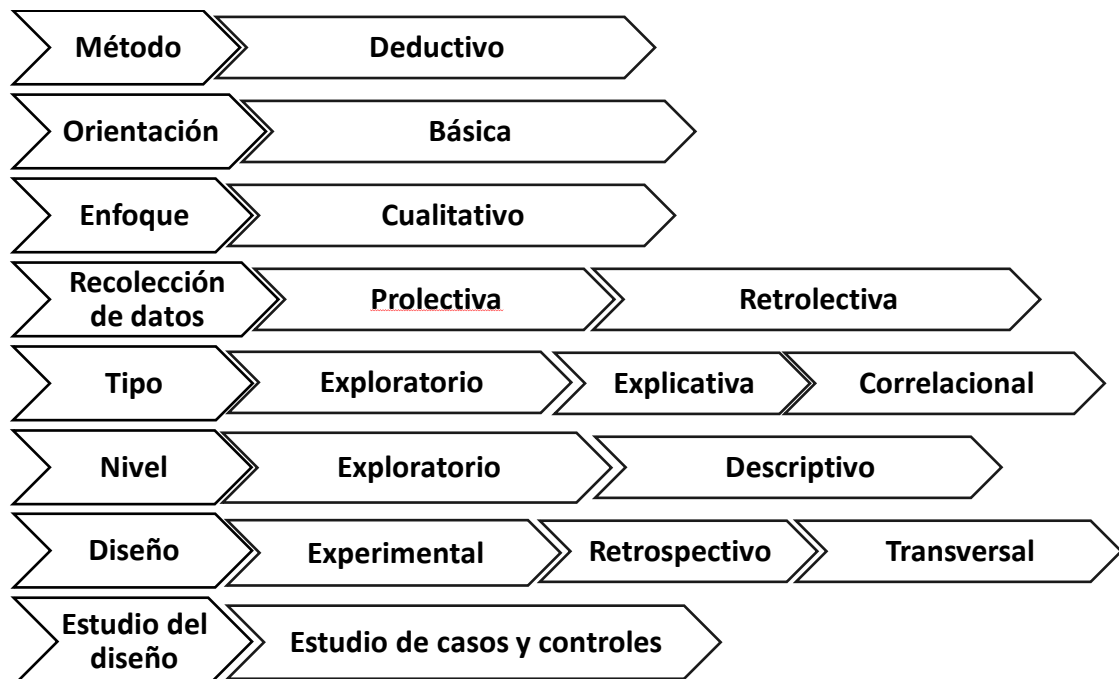
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Las investigaciones revisadas siguieron la metodología empleada por Chavarry, C; Chavarría, L; Valencia, A; Pereyra, E; Arieta, J; Rengifo, C. (2020), En concreto reforzado con vidrio molido para controlar grietas y fisuras por contracción plástica. El método empleado fue el deductivo, orientación básica, enfoque cualitativo y como instrumento de recolección de datos retrolectivo, de tipo de investigación descriptivo, correlacional y explicativo. El diseño experimental, longitudinal, retrospectivo y el estudio de cohorte (causa-efecto). Esta investigación es documental, bibliográfica y descriptiva; es documental porque se han utilizado diversas investigaciones basándonos en las conclusiones de los investigadores, bibliográfica porque se utilizaron datos secundarios como fuente de información y descriptiva porque se ha descrito el tema de investigación.

4.1. Tipología y método de estudio

Figura 8

Tipología y método de estudio



Fuente: Elaboración propia

El presente trabajo es una investigación EXPLICATIVA, EXPLORATORIA Y CORRELACIONAL, ya que, al ser una solución poco introducida en el Perú, requiere una descripción de las características más significativa de los Polímeros de las Fibras de Carbono, como reforzamiento en el Concreto Armado, juntamente con una matriz epóxido adhesivo, para unir las fibras de carbono al elemento estructural. Es el estudio y análisis de la investigación a problemas concretos, en circunstancias y características reales.

El método de investigación es DEDUCTIVO, consiste en realizar actividades con la finalidad de comprobar, demostrar o reproducir ciertos hechos de forma natural o artificial, de tal manera que permita establecer experiencias para formular hipótesis a través del proceso científico y conducir a generalizaciones científicas que puedan verificarse en hechos concretos en la vida diaria.

4.2. Tipología y método de estudio

DISEÑO CUASI EXPERIMENTAL, RETROSPECTIVO Y TRANSVERSAL:

Se diseño dos grupos, uno recibe el tratamiento experimental y el otro no. Los grupos son comparados en el post test para analizar si el tratamiento experimental tuvo un efecto sobre la variable dependiente.

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

Al ser una tesis descriptiva, se considera como población a las investigaciones recopiladas en base a las normas internacionales establecidas para la aplicación del sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra de carbono.

4.3.2. Muestra

Se considera como muestra a los resultados obtenidos en los ensayos realizados en probetas que nos permitan describir el comportamiento de la aplicación, ensayos no destructivos para evaluar la correcta adherencia, distinguir el tipo de fallo e identificar el tratamiento en la superficie de los elementos estructurales de concreto. Entre los ensayos resaltados en la investigación tenemos: ensayo a la compresión, flexión, ensayos no destructivos (Pull Off, Ultrasonidos).

4.3.3. Unidad de análisis

Se considera como muestra a los resultados obtenidos en los ensayos realizados de acuerdo a las guías de diseño internacionales:

- FIB Bulletin 14: Externally Bonded FRP, Reinforcement for RC Structures.
- ACI 440.2R: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures.

De acuerdo a los códigos ACI:

- ACI 318-14, Concreto Estructural.
- ACI 216.1-14, Resistencia al Fuego.
- ACI 440.2R-08, Refuerzos FRP.

4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.4.1. Técnica de investigación

La técnica para el estudio, son las pruebas y ensayos utilizados por los autores en cada una de las investigaciones citadas en la presente tesis, ya que, de esta manera, se puede medir la mejora de las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto en las unidades de análisis en base a las normas y especificaciones.

4.4.2. Instrumentos de recolección

Los instrumentos de recolección para los datos utilizados en esta investigación son los formatos de resultados en ensayos brindados por los autores citados, basándonos en las especificaciones técnicas correspondientes ya mencionadas.

4.5. Descripción de procedimientos de análisis

Nos basaremos en la experiencia que han obtenido otros investigadores para hacer comparaciones, contrastar resultados y verificar así, en qué medida aporta al desempeño mecánico de la estructura. Después de una correcta verificación, utilizaremos los datos para su análisis estadístico con un rango de confiabilidad.

Las herramientas utilizadas para el procesamiento de datos y posterior análisis son: Microsoft Excel 2019, el cual permite una correcta representación de gráficos que nos permiten demostrar la relación entre las variables.

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1. Presentación de resultados

5.1.1. Desempeño mecánico de la aplicación CFRP

5.1.1.1. Ensayos a compresión

Piñero (2016), en su investigación analiza un estudio experimental con probetas cilíndricas de concreto a resistencias medias y bajas, confinado con fibras de carbono simulando defectos de ejecución, donde:

Se tienen 5 probetas de concreto diseñadas para una resistencia aproximada de 35 MPa y 12 MPa. Para ello se realizan dos amasadas denominadas “Amasada 1” y “Amasada 2” respectivamente. La dosificación empleada en ambas amasadas consta de 12,50 kg de cemento, 33,50 kg de arena, 32 kg de grava y 6,88 kg de agua. Tras la realización de la amasada se procede a extraer el hormigón de la cubeta para introducirlo en los moldes cilíndricos de las probetas con dimensiones normalizadas 15x30 cm.

Tabla 4

Resumen de probetas analizadas

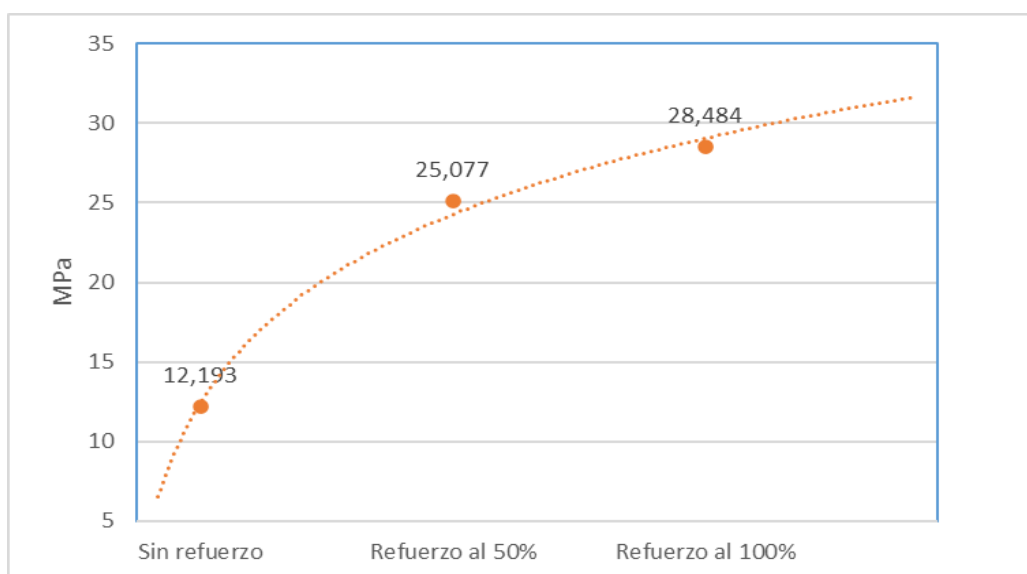
| Resistencia característica del concreto (N/mm ²) | Número de amasada | Denominación de la probeta | Refuerzo de fibras de carbono |
|--|-------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 35 | A1 | A1 | Refuerzo al 50% |
| | | A2 | Sin Refuerzo |
| | | A3 | Refuerzo al 50% |
| | | A4 | Refuerzo al 100% |
| | | A5 | Sin Refuerzo |
| | A2 | B1 | Refuerzo al 100% |
| | | B2 | Sin Refuerzo |
| | | B3 | Refuerzo al 100% |
| | | B4 | Refuerzo al 50% |
| | | C1 | Refuerzo al 100% |
| 12 | A1 | C2 | Sin Refuerzo |
| | | C3 | Refuerzo al 50% |
| | | C4 | Sin Refuerzo |
| | | C5 | Refuerzo al 50% |
| | A2 | D1 | Refuerzo al 100% |
| | | D2 | Refuerzo al 100% |
| | | D3 | Sin Refuerzo |
| | | D4 | Refuerzo al 50% |

Dónde para el análisis de los resultados se calcularon las resistencias promedio de las probetas, organizadas según su refuerzo y la resistencia característica del concreto usado en la amasada.

Tabla 5*Resumen de los resultados a compresión*

| Refuerzo | Resistencia característica (MPa) | Probeta | Tensión de rotura individual (MPa) | Tensión de rotura promedio (MPa) |
|------------------|----------------------------------|---------|------------------------------------|----------------------------------|
| Sin refuerzo | 12 | C2 | 8,822 | 12,193 |
| | | C4 | 12,252 | |
| | | D3 | 15,504 | |
| | | A2 | 35,973 | |
| | | A5 | 36,793 | |
| Refuerzo al 50% | 35 | B2 | 33,777 | 35,514 |
| | | C3 | 19,716 | |
| | | C5 | 27,145 | |
| | | D4 | 28,371 | |
| | | A1 | 52,137 | |
| Refuerzo al 100% | 35 | A3 | 52,295 | 57,919 |
| | | B4 | 56,951 | |
| | | D1 | 35,483 | |
| | | D2 | 28,217 | |
| | | C1 | 21,751 | |
| | 12 | A4 | 50,210 | |
| | 35 | B1 | 57,374 | |
| | | B3 | 62,952 | |

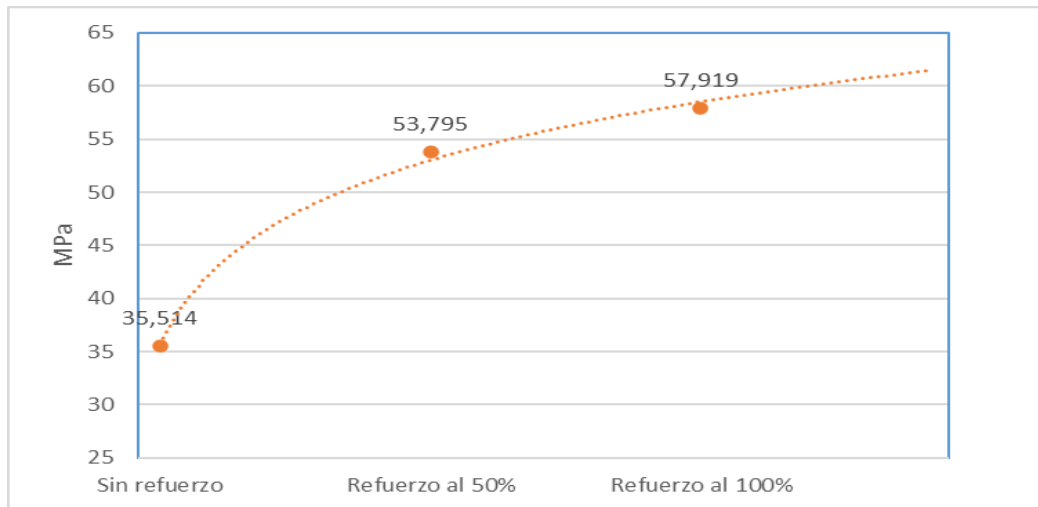
Nota: Análisis a la probeta A4 por recubrimiento de refuerzo del autor. Adaptado de “Estudio experimental del comportamiento a compresión de probetas de hormigón de resistencias bajas y medias confinadas con tejidos de fibras de carbono y con defectos muy importantes de ejecución”, Piñero (2016)

Figura 9*Tensión de rotura promedio para probetas H-12*

Fuente: Elaboración propia

Figura 10

Tensión de rotura promedio para probetas H-35



Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados, verificamos que las propiedades mecánicas de las probetas aumentan de acuerdo con el porcentaje de refuerzo aplicado.

Así mismo se analizó los resultados obtenidos a partir de la formulación existente de otros autores (Tabla 6) que se han podido recopilar de diversos ensayos en el laboratorio de materiales de Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid. Los resultados calculados se expresan en la Tabla 6 para probetas totalmente reforzadas y en la Tabla 7 para probetas reforzadas al 50%. Se entienden como:

Tabla 6

Porcentaje de aumento de resistencia teóricos según distintos modelos para probetas con refuerzo del 100%

| Autor de modelo | Porcentaje teórico de mejora de resistencia | |
|--|---|---------------|
| | H-12 (95.43%) | H-35 (45.07%) |
| Fardis y Khalili (1982) | 52,28 % | 31,37 % |
| Saadatmanesh, Ehsani y Li (1994) | 62,94 % | 40,57 % |
| Miyauchi, Nishibayashi e Inoue (1997) | 68,85 % | 45,07 % |
| Miyouchi, Nishibayashi e Inoue (1997) | 44,43 % | 26,66 % |
| Kono, Inazumi y Kaku (1998) | 10,08 % | 10,08 % |
| Samaan, Mimiran y Shahawy (1998) | 62,98 % | 37,79 % |
| Toutanji (1999) | 60,78 % | 39,37 % |
| Saafi M, Toutanji HA, Li Z. (1999) | 39,00 % | 25,39 % |
| Spoelstra y Monti (1999) | 27,12 % | 2,98 % |
| Karabinis y Rousakis (2001) | 35,00 % | 22,44 % |
| Lam y Teng (2001) | 35,5 % | 15,3 % |
| Shehata y Cameiro (2002) | 30,83 % | 13,36 % |
| Matthys Toutanji Audenaert y Taerwe (2005) | 39,94 % | 25,87 % |
| Kumutha Vaidyanathan y Palanichamy (2007) | 68,8 % | 7,11 % |
| Drizoro (2010) | 68,85 % | 45,07 % |

Nota: Análisis detallado de mejora de resistencia al 100% para distintos autores. Adaptado de “*Estudio experimental del comportamiento a compresión de probetas de hormigón de resistencias bajas y medias confinadas con tejidos de fibras de carbono y con defectos muy importantes de ejecución*”, Piñero (2016)

Para las probetas de concreto H-12 totalmente reforzadas recordemos que el aumento de resistencia resultaba del 133,61%. Si aplicamos el coeficiente de seguridad $\gamma_s = 1,40$ el aumento de resistencia se reduce hasta el 95,43% con el que vamos a comparar los porcentajes teóricos calculados mediante los distintos modelos de la tabla 3.16. Igual que para las anteriores, en las probetas de concreto H-35 totalmente reforzadas conviene recordar que el aumento de resistencia resultaba del 63,1%. Si aplicamos el coeficiente de seguridad $\gamma_s = 1,40$ el aumento de resistencia se reduce hasta el 45,07%.

Tabla 7

Porcentajes de aumento de resistencia teóricos según distintos modelos para probetas con refuerzo del 50%

| Autor de modelo | Porcentaje teórico de mejora de resistencia | |
|--|---|---------------|
| | H-12 (105.68%) | H-35 (51.47%) |
| Fardis y Khalili (1982) | 41,82 % | 25,09 % |
| Saadatmanesh, Ehsani y Li (1994) | 51,95 % | 33,48 % |
| Miyauchi, Nishibayashi e Inoue (1997) | 57,44 % | 37,12 % |
| Kono, Inazumi y Kaku (1998) | 35,55 % | 21,33 % |
| Kono, Inazumi y Kaku (1998) | 8,07 % | 8,07 % |
| Samaan, Mimiran y Shahawy (1998) | 53,87 % | 32,32 % |
| Toutanji (1999) | 50,28 % | 32,57 % |
| Saafi M, Toutanji HA, Li Z. (1999) | 32,33 % | 21,05 % |
| Spoelstra y Monti (1999) | 15,81 % | -5,78 % |
| Karabinis y Rousakis (2001) | 28,82 % | 18,48 % |
| Lam y Teng (2001) | 20,4 % | 12,24 % |
| Shehata y Cameiro (2002) | 17,16 % | 11 % |
| Matthys Toutanji Audenaert y Taerwe (2005) | 33,04 % | 24,4 % |
| Kumutha Vaidyanathan y Palanichamy (2007) | 9,49 % | 5,69 % |
| Drizoro (2010) | 57,44 % | 37,12 % |

Nota: Análisis detallado de mejora de resistencia al 50% para distintos autores. Adaptado de “*Estudio experimental del comportamiento a compresión de probetas de hormigón de resistencias bajas y medias confinadas con tejidos de fibras de carbono y con defectos muy importantes de ejecución*”, (2016)

Para las probetas de concreto H-12 totalmente reforzadas recordemos que el aumento de resistencia resultaba del 105,68%. Si aplicamos el coeficiente de seguridad $\gamma_s = 1,40$ el aumento de resistencia se reduce hasta el 95,43% con el que vamos a comparar los porcentajes teóricos calculados mediante los distintos modelos de la tabla 7. Igual que para las anteriores, en las probetas de concreto H-35 totalmente reforzadas conviene recordar que el aumento de resistencia resultaba del 51,47%. Si aplicamos el coeficiente de seguridad $\gamma_s = 1,40$ el aumento de resistencia se reduce hasta el 45,07%.

Finalmente, para el autor el porcentaje teórico de mejora de resistencia en probetas con refuerzo del 50%, es un 200% más efectivo que en el promedio para las muestras H-12, y un 162% para las muestras H-35, mientras que para las probetas con un refuerzo del 100%, es un 308% más efectivo que en el promedio para las muestras H-12, y un 245% para las muestras H-35.

Tabla 8

Verificación de resultados de laboratorio con la norma ACI 440 2R 17

| Datos de la muestra de concreto: | | Datos de la Fibra de Carbono: | |
|----------------------------------|------------------------|-----------------------------------|---|
| Diámetro (D): | 15 cm | *Módulo de elasticidad (Ef): | 230 000 N/mm ² = 2 345 347.29 kg/cm ² |
| Altura (h): | 30 cm | Número de capas (n): | 1 |
| f'c: | 357 kg/cm ² | Espesor de la capa (tf): | 0.167 mm = 0.0167cm |
| | | Tensión de ruptura (E*fu): | 0.0167mm/mm |
| | | Resistencia a la tracción (f*fm): | 3 400 N/mm ² = 34 670.35 Kg/cm ² |

Fuente: Elaboración propia

Cálculo de la resistencia del concreto reforzado f'_{cc} con CFRP según la siguiente ecuación:

Ecuación 2: Concreto reforzado

$$f'_{cc} = f'_c + \psi_f 3.3 K_a f_t$$

Ecuación 3: Máxima resistencia del concreto reforzado

$$f_t = \frac{2 E_f n t_f \varepsilon_{fe}}{D}$$

Ecuación 4: Deformación máxima del CFRP

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

Fuente: ACI 440 2R 17 (2017)

Dónde:

$$f'_c = 357 \text{ kg/cm}^2$$

$$\psi_f = 1$$

$$K_a = 1 \text{ (sección circular)}$$

$$K_\varepsilon = 0.55,$$

Reemplazando valores, se obtiene la máxima resistencia del concreto reforzado:

$$f_t = \frac{2 \left(2\,345\,347.29 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \times 1 \times 0.0167 \text{ cm} \times (0.55 \times 0.0167 \frac{\text{mm}}{\text{mm}})}{15 \text{ cm}} = 47,00 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Conociendo la resistencia del concreto reforzado, a saber:

$$f'_{cc} = 357 \frac{kg}{cm^2} + 1 \times 3.3 \times 1 \times 47,001 \frac{kg}{cm^2} = 512.10 \frac{kg}{cm^2}$$

El resultado obtenido 512.10 kg/cm² es similar a la resistencia obtenida en el ensayo realizado en laboratorio de la muestra cilíndrica A4 (H-35) que fue reforzado con una vuelta (100% reforzado) que fue de 524 kg/cm² que representa una variación de 2.3%.

Aire Untiveros (2002), en su investigación analiza un estudio experimental de probetas cilíndricas con concreto, teniendo un tamaño de 150 × 300 mm confinados con diferentes capas de FRP en carbono y vidrio para medir la mejora de la resistencia a la compresión, donde:

Las resistencias características de los hormigones sin confinar fueron de 25 y 60 MPa. En cada caso se ensayaron 3 probetas.

Tabla 9

Ensayos de confinamiento con FRP: Programa de ensayos

| Serie | Tipo de fibra | Número de capas | Espesor de confinamiento nominal (mm) |
|--------|---------------|-----------------|---------------------------------------|
| HF30 | Ninguno | 0 | 0 |
| | | 1 | 0,117 |
| | | 3 | 0,351 |
| | Carbono | 6 | 0,702 |
| | | 1 | 0,149 |
| | | 3 | 0,447 |
| HF70 | Vidrio | 6 | 0,894 |
| | | 0 | 0 |
| | | 1 | 0,117 |
| | Carbono | 3 | 0,351 |
| | | 6 | 0,702 |
| | | 9 | 1,053 |
| Vidrio | 12 | 1,404 | |
| | 1 | 0,149 | |
| | 3 | 0,447 | |
| | | 6 | 0,894 |
| | | 9 | 1,341 |
| | | 12 | 1,788 |

Nota: Nomenclatura de las probetas utilizadas por el autor. Adaptado de “Estudio experimental del comportamiento del hormigón confinado sometido a compresión”, Aire Unitveros (2002)

Tabla 10*Resultados de los ensayos de hormigón confinado con FRP*

| Hormigón | N° Capas | f'_{cmax} Mpa | ϵ_{max} $\mu\epsilon$ | E_i GPa | f'_{cmax}/f_c | $\epsilon_{max}/\epsilon_c$ | ϵ_{tmax} $\mu\epsilon$ | $\epsilon_{tmax}/\epsilon_t$ |
|----------|----------|-----------------|--------------------------------|------------|-----------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| | 0 | $f'_c = 42$ | $\epsilon_c = 2390$ | $E_c = 25$ | 1,0 | 1,0 | $\epsilon_t = 635$ | 1,0 |
| | GFRP | | | | | | | |
| | 1 | 41,0 | 2530 | 27,6 | 1,0 | 1,10 | 880 | 1,4 |
| | 3 | 61,0 | 17120 | 34,0 | 1,5 | 7,20 | 12810 | 20,2 |
| HF30 | 6 | 85,0 | 20190 | 32,3 | 2,0 | 8,40 | 11290 | 17,8 |
| | CFRP | | | | | | | |
| | 1 | 46,0 | 9200 | 26,8 | 1,1 | 3,80 | 8840 | 13,9 |
| | 3 | 77,0 | 21160 | 28,2 | 1,8 | 8,80 | 9270 | 14,6 |
| | 6 | 118,0 | 31620 | 29,0 | 2,6 | 13,20 | 10500 | 16,5 |
| | 0 | $f'_c = 69$ | $\epsilon_c = 2400$ | $E_c = 25$ | 1,0 | 1,0 | $\epsilon_t = 435$ | 1,0 |
| | GFRP | | | | | | | |
| | 1 | 79* | 2350 | 39,2 | 1,1 | 1,0 | 1090 | 2,5 |
| | 3 | 83* | 2650 | 37,5 | 1,2 | 1,1 | 2030 | 4,7 |
| | 6 | 107* | 6180 | 40,1 | 1,5 | 2,6 | 8940 | 20,5 |
| | 9 | 140* | 14120 | 38,2 | 2,0 | 5,9 | 9690 | 22,3 |
| HF70 | 12 | 170 | 14710 | 40,2 | 2,5 | 6,1 | 11030 | 25,3 |
| | CFRP | | | | | | | |
| | 1 | 94* | 2690 | 40,7 | 1,3 | 1,1 | 870 | 2,0 |
| | 3 | 98* | 7760 | 35,4 | 1,4 | 3,2 | 8210 | 18,9 |
| | 6 | 156 | 16340 | 37,3 | 2,3 | 6,8 | 10300 | 23,7 |
| | 9 | 199* | 22810 | 35,8 | 2,9 | 9,5 | 11370 | 26,1 |
| | 12 | 217 | 23870 | 41,7 | 3,1 | 9,9 | 8500 | 19,5 |

Nota: Resultados de los ensayos a compresión realizados por el autor. Adaptado de “*Estudio experimental del comportamiento del hormigón confinado sometido a compresión*”, Aire Unitveros (2002)

A partir de la tabla de resultados, se demostró que el reforzamiento con CFRP mejora circunstancialmente frente al reforzamiento con GFRP, tanto en ensayos de concreto con baja resistencia HF30, como en concreto de alta resistencia HF70.

Tabla 11*Verificación de resultados de laboratorio con la norma ACI 440 2R 17*

| Datos de la muestra de concreto: | | Datos de la Fibra de Carbono: | |
|----------------------------------|------------------------|---|---|
| Diámetro (D): | 15 cm | Módulo de elasticidad (Ef): | 230 000 N/mm ² = 2 345 347.29 kg/cm ² |
| Altura (h): | 30 cm | Número de capas (n): | 6 |
| f'_c : | 420 kg/cm ² | Espesor de la capa (tf): | 0.167 mm = 0.0167cm |
| | | Tensión de ruptura (E^*f_u): | 0.0167mm/mm |
| | | Resistencia a la tracción (f^*f_m): | 3 400 N/mm ² = 34 670.35 Kg/cm ² |

Fuente: Elaboración propia

Cálculo de la resistencia del concreto reforzado f_{cc}' con CFRP según la siguiente ecuación:

Ecuación 5: Concreto reforzado

$$f_{cc}' = f_c' + \psi_f 3.3 K_a f_l$$

Ecuación 6: Máxima resistencia del concreto reforzado

$$f_l = \frac{2 E_f n t_f \varepsilon_{fe}}{D}$$

Ecuación 7: Deformación máxima del CFRP

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

Fuente: ACI 440 2R 17 (2017)

Dónde:

$$f_c' = 420 \text{ kg/cm}^2$$

$$\psi_f = 1$$

$$K_a = 1 \text{ (sección circular)}$$

$$K_\varepsilon = 0.55,$$

Reemplazando valores, se obtiene la máxima resistencia del concreto reforzado:

$$f_l = \frac{2 \left(2\,345\,347.29 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \times 6 \times 0.0167 \text{ cm} \times (0.55 \times 0.0167 \frac{\text{mm}}{\text{mm}})}{15 \text{ cm}} = 282.00 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Conociendo la resistencia del concreto reforzado, a saber:

$$f_{cc}' = 420 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} + 1 \times 3.3 \times 1 \times 282.00 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 1350.61 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

El resultado obtenido de 1350.61 kg/cm² es similar a la resistencia obtenida en el ensayo realizado en laboratorio de la muestra cilíndrica de baja resistencia (HF30) que fue reforzado con 6 capas de fibra de carbono obteniendo 108MPa (1203.27 kg/cm²) de resistencia.

Castro Zavaleta (2019), en su investigación analiza un estudio experimental de probetas reforzadas con fibras de carbono para medir la mejora de resistencia a la compresión con respecto a probetas sin reforzamiento, donde:

Se prepararon 8 muestras circulares con concreto de dimensiones 15x30cm., con una resistencia de $f_c' = 210 \text{ kg/cm}^2$, según norma ASTM C39, NTE 060. Cuatro de

las muestras cilíndricas de concreto fueron reforzadas en fibra de carbono unidireccional en manta, de las cuatro muestras dos de ellas fueron reforzadas con fibra de carbono de 300 gr/m² y dos muestras reforzadas en fibra de carbono de 600 gr/m².

Tabla 12

Detalle de las muestras reforzadas con fibra de carbono

| Muestras cilíndricas reforzadas | | | |
|---------------------------------|------------------|-------------------|-------------|
| Muestra | Fibra de carbono | | |
| | Capas (n) | gr/m ² | Traslape cm |
| P1 | 1 | 600 | 15 |
| P2 | 1 | 600 | 30 |
| P3 | 2 | 300 | 0 |
| P4 | 3 | 300 | 0 |
| P5 | 0 | 0 | 0 |
| P6 | 0 | 0 | 0 |
| P7 | 0 | 0 | 0 |
| P8 | 0 | 0 | 0 |

Nota: Nomenclatura de las probetas utilizadas por el autor. Adaptado de “Reforzamiento estructural con fibra de carbono como alternativa económica para aumentar la resistencia a la compresión de las columnas en la galería comercial Fullmarket en el 2019”, Zavaleta (2019)

Tabla 13*Ensayo de muestras cilíndricas de concreto reforzadas con fibra de carbono**CFRP*

| Muestra de concreto ϕ 15 x 30 cm | | Fibra de Carbono aplicada | | | | Datos para la prueba de ensayo | | Resistencia compresión | Normativa |
|--|--|---------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Código de muestras | Resistencia a nominal Kg/cm ² | Días | Cantidad de vueltas (n) | Traslape (cm) | gr/m ² | Área (cm ²) | Carga de rotura (kg) | Kg/cm ² | |
| P-1 | 210 | 28 | 1 | 15 | 600 | 181,00 | 108187,00 | 598 | ASTM C39 NTE 060 |
| P-2 | 210 | 28 | 1 | 30 | 600 | 181,60 | 98274,00 | 541 | ASTM C39 NTE 060 |
| P-3 | 210 | 28 | 2 | 0 | 300 | 183,90 | 103121,00 | 561 | ASTM C39 NTE 060 |
| P-4 | 210 | 28 | 3 | 0 | 300 | 184,20 | 127339,00 | 691 | ASTM C39 NTE 060 |
| <u>P-5</u> | <u>210</u> | <u>28</u> | <u>0</u> | <u>0</u> | <u>0</u> | <u>176,50</u> | <u>45586,00</u> | <u>258</u> | <u>ASTM C39 NTE 060</u> |
| P-6 | 210 | 28 | 0 | 0 | 0 | 177,40 | 51621,00 | 291 | ASTM C39 NTE 060 |
| P-7 | 210 | 28 | 0 | 0 | 0 | 176,20 | 45584,00 | 257 | ASTM C39 NTE 060 |
| P-8 | 210 | 28 | 0 | 0 | 0 | 177,10 | 51619,00 | 290 | ASTM C39 NTE 060 |

Nota: Resultados de ensayos a compresión realizados por el autor. Adaptado de “*Reforzamiento estructural con fibra de carbono como alternativa económica para aumentar la resistencia a la compresión de las columnas en la galería comercial Fullmarket en el 2019*”, Zavaleta (2019)

Según el resultado del laboratorio para ensayo de materiales, se puede observar que para la muestra P1 con una resistencia nominal de 210 kg/cm² la resistencia aumento a 598 kg/cm² para la muestra P2 la resistencia aumento a 541 kg/cm² para la muestra P3 la resistencia aumento a 561 kg/cm² y para la muestra P4 la resistencia aumento a 691 kg/cm². Con los resultados mostrados se puede tener la seguridad que el reforzamiento con fibra de carbono eleva la resistencia del concreto.

Tabla 14*Verificación de resultados de laboratorio con la norma ACI 440 2R 17*

| Datos de la muestra de concreto: | | Datos de la Fibra de Carbono: | |
|-------------------------------------|------------------------|--|---|
| Diámetro (D): | 15 cm | Módulo de elasticidad (E _f): | 230 000 N/mm ² = 2 345 347.29 kg/cm ² |
| Altura (h): | 30 cm | Número de capas (n): | 2 |
| f'c: | 258 kg/cm ² | Espesor de la capa (t _f): | 0.167 mm = 0.0167cm |
| | | Tensión de ruptura (E* <i>f_u</i>): | 0.0167mm/mm |
| | | Resistencia a la tracción (f' <i>*f_m</i>): | 3 400 N/mm ² = 34 670.35 Kg/cm ² |

Fuente: Elaboración propia

Cálculo de la resistencia del concreto reforzado f'_{cc} con CFRP según la siguiente ecuación:

Ecuación 8: Concreto reforzado.

$$f'_{cc} = f'_c + \psi_f 3.3 K_a f_l$$

Ecuación 9: Máxima resistencia del concreto reforzado.

$$f_l = \frac{2 E_f n t_f \varepsilon_{fe}}{D}$$

Ecuación 10: Deformación máxima del CFRP.

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

Fuente: ACI 440 2R 17 (2017)

Dónde:

$$f'_c = 258 \text{ kg/cm}^2$$

$$\psi_f = 1$$

$$K_a = 1 \text{ (sección circular)}$$

$$K_\varepsilon = 0.55,$$

Reemplazando valores, se obtiene la máxima resistencia del concreto reforzado:

$$f_l = \frac{2 \left(2\,345\,347.29 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \times 2 \times 0.0167 \text{ cm} \times (0.55 \times 0.0167 \frac{\text{mm}}{\text{mm}})}{15 \text{ cm}} = 95.93 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Conociendo la resistencia del concreto reforzado, a saber:

$$f'_{cc} = 258 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} + 1 \times 3.3 \times 1 \times 95.93 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 574.58 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

El resultado obtenido 574.58 kg/cm^2 es similar a la resistencia obtenida en el ensayo realizado en laboratorio de la muestra cilíndrica reforzada con dos capas de fibra de carbono que fue de 561.00 kg/cm^2 que representa una variación del 2.42%.

Se realizaron los cálculos para las demás muestras reforzadas obteniéndose resistencia del concreto reforzada (f'_{cc}), similares a las muestras ensayadas en el laboratorio.

Tabla 15*Verificación de aumento de resistencias Norma ACI 440 2R 17.*

| N ° de capas de CFRP | Deformación efectiva de la fibra de carbono | Espesor de la fibra de carbono | Presión o esfuerzo ultimo de confinamiento | Resistencia del concreto | Resistencias obtenidas | | Diferencia porcentual |
|----------------------|---|--------------------------------|--|--------------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|
| | | | | | ACI 440 2R f'_{cc} | Laboratorio | |
| n | ϵ_{fe} | t_f | f_i | f'_c | kg/cm ² | kg/cm ² | % |
| | cm | cm | kg / cm ² | kg/cm ² | kg/cm ² | kg/cm ² | % |
| 1 | 0,009185 | 0,0333 | 95,647 | 258 | 573,64 | 598 | -425 |
| 1 | 0,009185 | 0,0333 | 95,647 | 258 | 573,64 | 541 | 5,69 |
| 2 | 0,009185 | 0,0167 | 95,934 | 258 | 57458 | 561 | 2,36 |
| <u>3</u> | <u>0,009185</u> | <u>0,0167</u> | <u>143,901</u> | <u>258</u> | <u>732,87</u> | <u>691</u> | <u>5,71</u> |

Fuente: Elaboración propia

La tabla muestra los resultados obtenidos del laboratorio de ensayos de materiales y los calculados aplicando la norma ACI 440 2R 17. De acuerdo con los experimentos y cálculos realizados para conocer la efectividad del CFRP, podemos concluir que la aplicación de Fibra de Carbono en las muestras de concreto circulares si aumenta la resistencia a la compresión del concreto.

5.1.1.2. Análisis computacional

Paez Cornejo (2017), en su artículo estudia las variaciones en el comportamiento estructural que implica el reforzamiento con polímeros, donde se elaboraron modelos computacionales de edificaciones (viviendas), que se analizaron con diversas características geométricas tales como: irregularidad en planta, irregularidad en elevación, vigas banda, vigas descolgadas, diferente número de pisos, entre otras.

A continuación, se analizan los períodos de vibración de las estructuras con y sin reforzamiento.

Tabla 16*Períodos de vibración, estructura sin reforzar (modo I)*

| VIGA CHATA | | | | | |
|-------------|-----------------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------|-------------|
| DESCRIPCIÓN | DÉFICIT POR SOLICITACIÓN DE CARGA | IRREGULARIDAD EN PLANTA | IRREGULARIDAD EN ELEVACIÓN | ESTRUCTURA REGULAR | CON VOLADOS |
| 1 NIVEL | 0,284528 | 0,226213 | 0,241564 | 0,241564 | 0,6189 |
| 2 NIVEL | 0,479438 | 0,439315 | 0,444125 | 0,463535 | 0,5532 |
| 3 NIVEL | 0,756143 | 0,675542 | 0,596227 | 0,713164 | 0,8386 |
| 4 NIVEL | 0,833744 | 0,765043 | 0,696907 | 0,818181 | 0,9396 |
| 5 NIVEL | 0,892914 | 0,840179 | 0,734370 | 0,877009 | 1,0035 |

| VIGA PERALTADA | | | | | |
|----------------|-----------------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------|-------------|
| DESCRIPCIÓN | DÉFICIT POR SOLICITACIÓN DE CARGA | IRREGULARIDAD EN PLANTA | IRREGULARIDAD EN ELEVACIÓN | ESTRUCTURA REGULAR | CON VOLADOS |
| 1 NIVEL | 0,244329 | 0,191238 | 0,205116 | 0,204055 | 0,250639 |
| 2 NIVEL | 0,392247 | 0,361280 | 0,351767 | 0,376888 | 0,452733 |
| 3 NIVEL | 0,596734 | 0,529937 | 0,478978 | 0,559504 | 0,666688 |
| 4 NIVEL | 0,597150 | 0,544520 | 0,500024 | 0,579081 | 0,677116 |
| 5 NIVEL | 0,627509 | 0,578487 | 0,513125 | 0,612762 | 0,729293 |

Nota: Análisis de los periodos de vibración para vigas chatas y peraltadas sin reforzar realizadas por el autor. Adaptado de “Análisis comparativo de estructuras con y sin reforzamiento FRP”, Paez (2017)

Tabla 17*Períodos de vibración, estructuras reforzadas (modo I)*

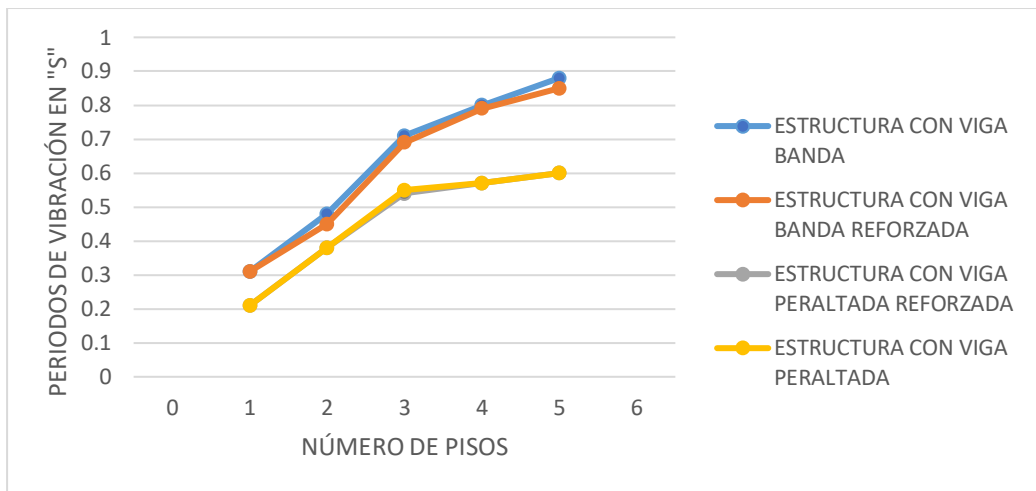
| VIGA CHATA | | | | | |
|-------------|-----------------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------|-------------|
| DESCRIPCIÓN | DÉFICIT POR SOLICITACIÓN DE CARGA | IRREGULARIDAD EN PLANTA | IRREGULARIDAD EN ELEVACIÓN | ESTRUCTURA REGULAR | CON VOLADOS |
| 1 NIVEL | 0,284528 | 0,479438 | 0,732021 | 0,817076 | 0,859923 |
| 2 NIVEL | 0,226213 | 0,439315 | 0,656892 | 0,749837 | 0,82328 |
| 3 NIVEL | 0,241564 | 0,444125 | 0,565578 | 0,682901 | 0,718883 |
| 4 NIVEL | 0,241564 | 0,463535 | 0,675782 | 0,802635 | 0,860372 |
| 5 NIVEL | 0,6189 | 0,4388 | 0,7965 | 0,9067 | 0,9685 |

| VIGA PERALTADA | | | | | |
|----------------|-----------------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------|-------------|
| DESCRIPCIÓN | DÉFICIT POR SOLICITACIÓN DE CARGA | IRREGULARIDAD EN PLANTA | IRREGULARIDAD EN ELEVACIÓN | ESTRUCTURA REGULAR | CON VOLADOS |
| 1 NIVEL | 0,239716 | 0,392227 | 0,569332 | 0,59715 | 0,627509 |
| 2 NIVEL | 0,191239 | 0,36128 | 0,529937 | 0,535499 | 0,578487 |
| 3 NIVEL | 0,205116 | 0,351767 | 0,478978 | 0,49134 | 0,513125 |
| 4 NIVEL | 0,204055 | 0,376888 | 0,559504 | 0,579081 | 0,612762 |
| 5 NIVEL | 0,250639 | 0,436186 | 0,625372 | 0,663743 | 0,68733 |

Nota: Análisis de los periodos de vibración para vigas chatas y peraltadas reforzadas realizadas por el autor. Adaptado de “Análisis comparativo de estructuras con y sin reforzamiento FRP”, Paez (2017)

Figura 11

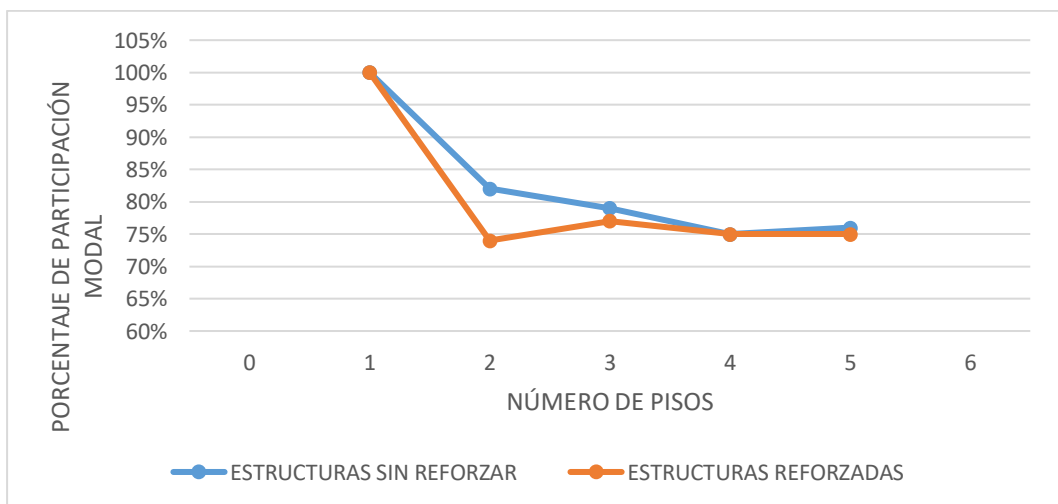
Línea representativa de los periodos de vibración



Nota: La estructura se volvió más rígida luego del reforzamiento con FRP. Adaptado de “Análisis comparativo de estructuras con y sin reforzamiento FRP”, Paez (2017)

Figura 12

Línea representativa de los factores de participación modal



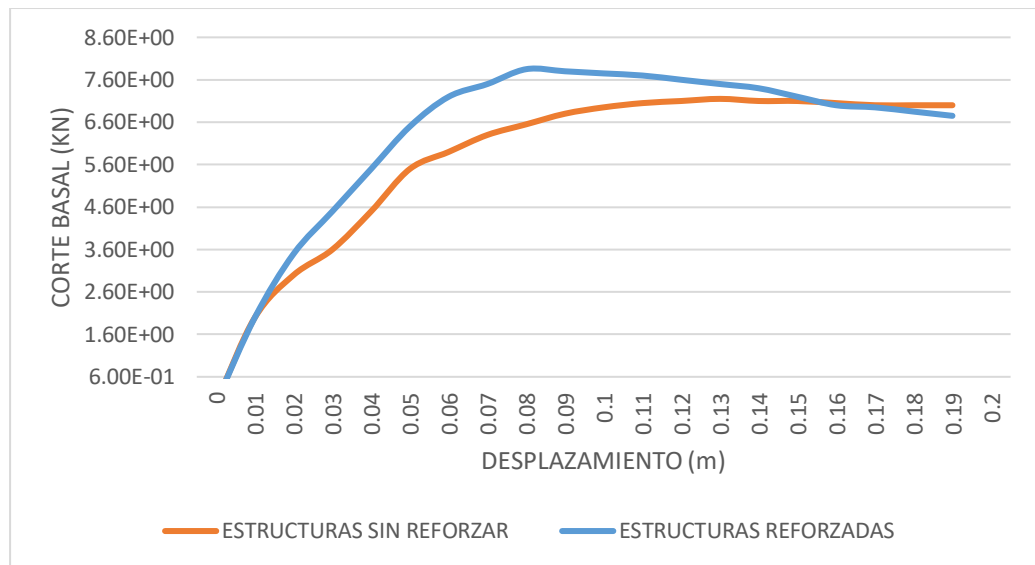
Nota: La relevancia del número de pisos es proporcional a la participación modal de la estructura.

Adaptado de “Análisis comparativo de estructuras con y sin reforzamiento FRP”, Paez (2017)

Se puede notar la eficacia del FRP para reducir los factores de participación modal es inversamente proporcional a la masa de la estructura ya que esta disminuye al aumentar en número de pisos, esto se debe a que normalmente solo se refuerzan los elementos de los niveles inferiores al ser los más críticos.

Figura 13

Curva de capacidad



Nota: La cortante basal tiene un límite plástico luego tiende a mantenerse. Adaptado de “Análisis comparativo de estructuras con y sin reforzamiento FRP”, Paez (2017)

La curva de capacidad se obtiene aplicando la técnica del pushover mediante un análisis

estático no lineal. Al reforzar con FRP aumenta la pendiente de la curva de capacidad por lo que la estructura es capaz de resistir una mayor sollicitación lateral con un menor desplazamiento en la azotea.

5.1.2. Tratamiento de superficies

Landa, G (2015) en su investigación analiza a 6 vigas de concreto pretensadas, aplicando refuerzos a cortante.

Se hicieron 6 tipos de refuerzo. La viga VR1 es reforzada con CFRP en orientación vertical a ambos lados de la sección transversal de la viga, el tratamiento de la superficie fue con chorro de arena donde se aplicará la resina epoxi, posteriormente limpiado con aire a presión para eliminar el polvo. Las fibras son aplicadas en capas de 250 mm de ancho y separadas 100 mm una capa con respecto a la otra.

La viga VR2 es reforzada con CFRP en forma de láminas. La banda de 250 mm de ancho es colocada en forma vertical, separadas 20 mm una con respecto a la otra. La superficie de contacto es preparada con un chorro de agua a presión sobre la superficie de hormigón.

La viga VR3 es reforzada con CFRP en forma de láminas. Las fibras de CFRP son colocadas como bandas de 250 mm de ancho, teniendo una orientación en diagonal, formando un ángulo de 45° con la vertical, y están, separadas 100 mm una con respecto a la otra. La superficie de contacto es preparada limpiándose con chorro de arena a presión dejando la superficie libre de polvo y partículas adheridas a la superficie.

La viga VR4 se reforzo con CFRP en forma de láminas. Las fibras de CFRP son colocadas como bandas de 250 mm de ancho, orientadas las fibras en forma diagonal, formando un ángulo de 45° con la vertical, y están, separadas 20 mm una con respecto a la otra. La superficie de contacto es preparada, limpiándose con chorro de agua a presión dejando la superficie libre de polvo.

La viga VR5 fue reforzada con CFRP en forma de láminas. La superficie de contacto es preparada con un picado, limpiándose con aire a presión dejando la superficie libre de polvo. Las fibras aplicadas como bandas de refuerzo de 250 mm de ancho, colocadas con una separación de 100 mm una con respecto a la otra. Las láminas de CFRP son colocadas con orientación vertical a ambos lados de la sección transversal de la viga.

La viga VR6 es reforzada con CFRP en forma de láminas. La superficie es tratada con un chorro de arena y agua a presión. Las fibras son colocadas como bandas de 250 mm de ancho, en posición diagonal, separadas 100 mm una con respecto a la otra. Sobre bandas en diagonal, se coloca una banda de CFRP a todo lo largo de la viga, con el sentido de las fibras en forma horizontal.

En las pruebas realizadas a las vigas se aplicaron las fibras CFRP de distintos fabricantes como Tonen, Mitsubishi, Hexcel Fyfe.

Tabla 18*Especificaciones de las vigas con CFRP a diferentes tratamientos de superficies*

| Viga | Disposición del refuerzo | Distancia entre láminas (mm) | Espesor de CFRP (mm) | Orientación de la fibra CFRP | Tipo de FRP | Preparación de superficie | F'c (Mpa) | Resistencia a cortante nominal dada por el hormigón Vc (KN) | Carga última de falla a cortante Vu (KN) | Incrementos de carga a cortante % (Vu) control |
|------|--------------------------|------------------------------|----------------------|--|-------------|---------------------------|-----------|---|--|--|
| VA | Viga de control | / | / | / | / | Sin tratamiento | 46 | 66 | 137 | 1 |
| VB | Estribos prensados | / | / | / | / | Sin tratamiento | 46 | 66 | 174 | 1,27 |
| VR1 | CFRP vertical | 100 | 250 | Forma vertical a la sección transversal de la viga | Tonen | Picado | 53 | 74 | 151 | 1,1 |
| VR2 | CFRP vertical | 20 | 250 | Forma vertical a la sección transversal de la viga | Mitsubishi | Arena y agua - presión | 44 | 76 | 161 | 1,17 |
| VR3 | CFRP diagonal | 100 | 250 | Angulo 45° con la vertical | Hexcel Fyfe | Agua - presión | 55 | 72 | 177 | 1,29 |
| VR4 | CFRP diagonal | 20 | 250 | Angulo 45° con la vertical | Mitsubishi | Arena y agua - presión | 44 | 76 | 173 | 1,26 |
| VR5 | CFRP horiz. y vert. | 100 | 250 | Forma vertical a la sección transversal de la viga | Tonen | Picado | 53 | 74 | 185 | 1,34 |
| VR6 | CFRP horiz. y diag. | 100 | 250 | Angulo 45° con la vertical | Hexcel Fyfe | Arena y agua - presión | 55 | 72 | 186 | 1,36 |

Fuente: Elaboración propia

La tabla 18 muestra una comparación entre la viga patrón (sin tratamiento de superficie) y las vigas con tratamientos de superficies reforzadas con diferentes marcas comerciales de fibra de carbono CFRP teniendo todo un ancho de fibra de 250 mm y una separación entre fibras de 20 mm y 100 mm. Se observa también la carga última de falla a cortante Vu para todas las pruebas. La carga de fisuración a cortante fue típicamente determinada por la correspondiente carga al iniciar las primeras grietas inclinadas. La resistencia a cortante nominal dada por el hormigón usando bandas extensométricas lineales y rosetas, respectivamente. La última columna nos indica los incrementos de carga a cortante en porcentaje que presentaron las vigas reforzadas con CFRP.

Los resultados nos muestran que colocar el sentido del tejido de las fibras de CFRP en forma perpendicular a las fisuras incrementa la resistencia a cortante

aproximadamente en 10 % más que con las fibras alineadas verticalmente a ambos lados de la sección transversal de la viga.

Md, N. N., Noor, M. N. S., Siti Norfahanim, A.M., Mohd Hisbany, M.H., & Norfaridah, M. (2019). En su investigación analizan un estudio experimental basadas en tratamientos de superficies y señales de emisión acústica en losas de concreto reforzadas con polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) bajo prueba de arranque.

Las losas se ensayaron mediante una prueba de extracción junto con la técnica de emisión acústica. Se analizaron y discutieron la fuerza de arranque, la fuerza de la señal acústica, la amplitud, la duración y el tiempo de subida.

Se utilizaron tres losas con medidas de 1000 mm de ancho, 1100 mm de largo y 40 mm de espesor. El concreto fue en proporción 1:2:4 de cemento: agregado fino: agregado grueso respectivamente. El tamaño máximo del agregado grueso fue de 10 mm. El aditivo Sika al 0.25% se añadió a la mezcla de concreto para mejorar la trabajabilidad del hormigón fresco. Se encontró que la resistencia del concreto fue de 40.68 Mpa, 41.78 MPa y 56.78 Mpa a los 7 y 28 días, respectivamente.

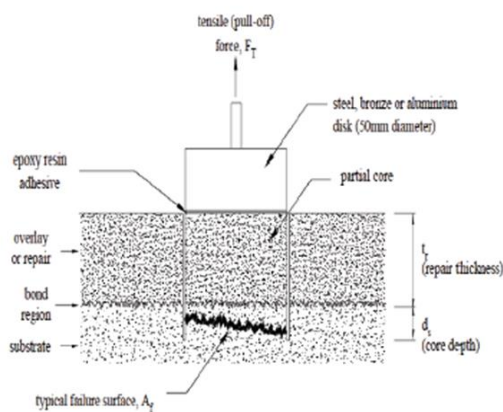
Se prepararon tres tipos de preparaciones de superficies: sin preparación de superficie (WSP), preparación de superficie normal (NSP) y preparación de superficie perforada (BSP). La segunda muestra NSP se basó en el método de chorro de arena. El método de chorro de arena se realizó en una superficie de la losa de concreto. Para suavizar la superficie irregular de la losa de concreto, se utilizó una amoladora de rueda de piedra eléctrica. Por lo tanto, se eliminó una fina capa de pasta de cemento sobre la superficie del concreto. Mientras tanto, el BSP se realizó perforando la superficie lisa de concreto para formar agujeros. Los agujeros se basaron en un diámetro propuesto de 10 mm y una profundidad de 3mm. El espaciado entre los orificios se aplicó de manera uniforme con 50 mm de centro a centro en todas las direcciones.

El CFRP se cortó en un tamaño de 50 mm x 1100 mm para cada preparación de superficie. Para la resina epoxi, se utilizó Sikadur 300 como agente de unión entre el concreto y CFRP. La resina epoxi tiene dos partes, la Parte A y la Parte B, y se mezcla con una proporción de 4:1 en peso para la Parte A: Parte B, respectivamente. Luego, se aplicó la resina epoxi sobre el sustrato preparado

usando llana, rodillo y brocha. Luego, el CFRP se colocó en capas sobre la superficie del sustrato en la dirección requerida. La prueba se realizó solo después de que el CFRP se secó por completo. El exceso de epoxi y las burbujas de aire se presionaron para asegurar una unión firme y suave entre el concreto y el CFRP. Se utilizó la técnica acústica para monitorear la unión entre CFRP y la superficie de la losa de concreto. Las señales de emisión acústica se registraron mediante la medición de Vallen Systeme con sensor tipo VS75 – V. En cada punto del núcleo parcial, se colocó un sensor debajo de la losa de concreto, el sensor fue pre amplificado para una ganancia de 34 dB. Los sensores se acoplaron a la superficie del haz con una fina capa de grasa para vacío y luego se sujetaron con abrazaderas magnéticas para limpiar el movimiento. Todos los sensores se calibraron utilizando fractura de mina de lápiz (PLF) para asegurar su conectividad con la superficie de concreto. El nivel de umbral se aplicó constantemente para todas las pruebas de arranque con una amplitud de 40 dB. El control de las emisiones acústicas se realizó junto con la prueba de extracción.

Figura 14




Prueba de extracción y monitorización de emisiones acústicas



Fuente: “Acoustic emission signals of pull-off test for concrete slab strengthened with CFRP using various surface preparations”, Md et al, (2019)

Tabla 19

Resultado de fuerza de arranque a diferentes superficies tratadas en losas reforzadas con CFRP

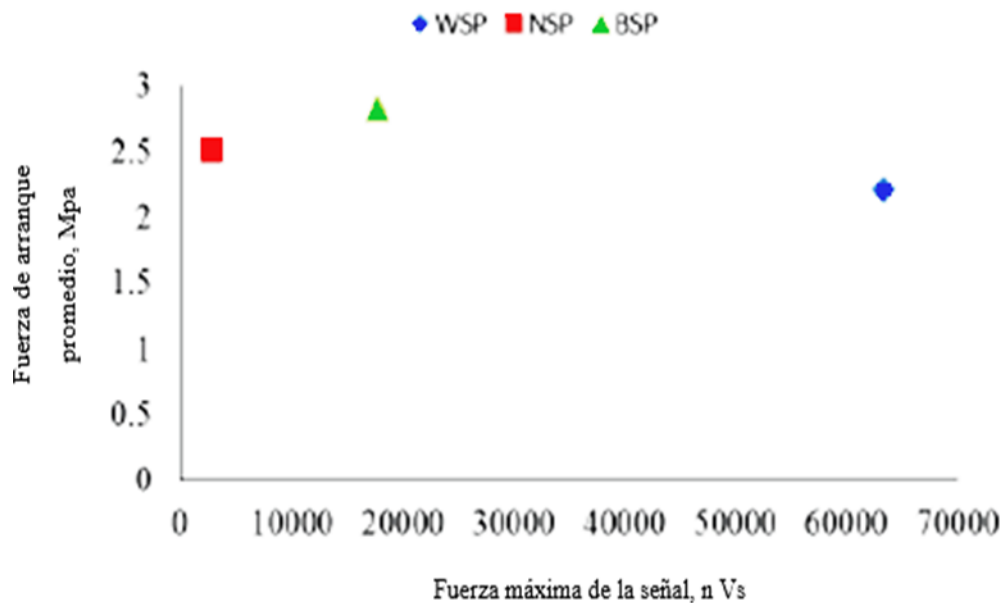
| Nomenclatura de muestra | Descripción | Fuerza de arranque (Mpa) | Tipo de falla | |
|-------------------------|---|--------------------------|---------------|---|
| WSP | - Sin preparación de superficie | 2.2 | Cohesiva |  |
| NSP | - Superficie normal - Se preparo la superficie con un chorro de arena - Se uso una amoladora de rueda de piedra electrica | 2.5 | Cohesiva |  |
| BSP | - Se perforo la supercie lisa para formar agujeros - Se realizaron agujeros de diametros de 10 mm y de una profundidad de 3 mm - Espaciado de 50 mm entre centros de cada agujero | 2.8 | Cohesiva |  |

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 19 se observa la fuerza de arranque promedio para las siguientes superficies ensayadas, para WSP fue de 2.2 MPa la NSP fue de 2.5MPa y la BSP fue 2.8 MPa. Se encontró que la preparación de la superficie con pequeñas perforaciones produjo la mayor resistencia al arrancamiento seguido de la superficie tratada con chorros de arena en comparación con la superficie que no fue tratada, lo que indica una buena unión entre el CFRP y la interfaz del concreto.

Figura 15

Fuerza máxima de la señal vs fuerza de arranque promedio

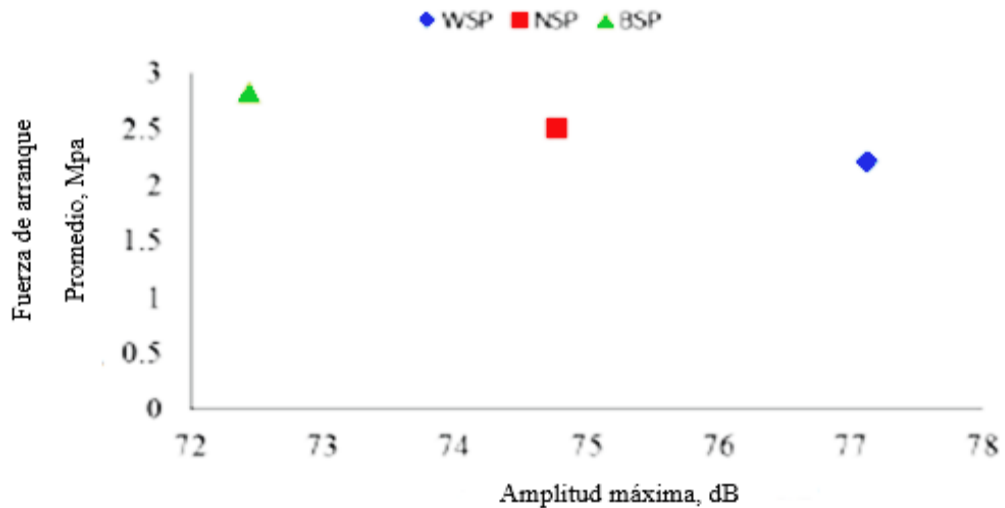


Fuente: “Acoustic emission signals of pull-off test for concrete slab strengthened with CFRP using various surface preparations”, Md et al (2019)

En la figura 15 se presenta la fuerza de arranque promedio con respecto a la fuerza máxima de señal (señales pico) para cada muestra, donde se observa en los resultados que la intensidad de la máxima señal promedio no está significativamente influenciada por el tipo de preparación de la superficie del concreto. Esta condición puede deberse a la aplicación de la carga durante la prueba de extracción que afecta los resultados. Este proceso también influye en la concentración de tensión que produjo un valor diferente de intensidad de la señal acústica.

Figura 16

Amplitud máxima vs fuerza de arranque promedio



Fuente: “Acoustic emission signals of pull-off test for concrete slab strengthened with CFRP using various surface preparations”, Md et al (2019)

En la figura 16 se observa que la amplitud de la emisión acústica indica de manera diferente dónde la amplitud es la más alta para BSP y la más baja para WSP.

Este ensayo fue útil para identificar la unión entre CFRP y el concreto mediante la técnica de emisión acústica. Los resultados indican que la resistencia al arrancamiento depende del tipo de preparación en la superficie. Sin embargo, al comparar los valores de la fuerza de cada prueba de arranque, los resultados fueron significativamente inconsistentes. Se debe a que alguna de las pruebas de extracción produjo resultados más bajos en la misma serie. Puede deberse a la dirección de carga durante la prueba de arranque.

La falla más común fue la falla cohesiva en la superficie del concreto como se muestra en la tabla 19 para las tres muestras con preparaciones en la superficie. Este modo de falla indica que se adoptó la adhesión adecuada de CFRP al hormigón.

5.1.3. Ensayos no destructivos

Fernández, Barrios Padura, & Molina Huelva (2018), presenta en su investigación un plan experimental para el control de calidad de la puesta en obra, basado en el estudio de la unión entre concreto y las bandas de refuerzo, teniendo en cuenta diferentes tipos de concreto y sistemas de preparación superficial, donde:

Se realizaron 120 ensayos sobre refuerzos de fibra de carbono aplicados a 8 probetas sin armar (4 probetas de cada tipo de concreto), en 3 de sus cuatro caras, y 5 ensayos por cara con diferentes tratamientos superficiales A, B, y C, el resultado de ensayo de cada cara ha sido la media de los 5 ensayos ejecutados en la misma. Los ensayos de ultrasonidos se realizaron según la UNE EN 12504-4:2006, con el objetivo de estudiar la calidad de la aplicación del material compuesto. La posición de los palpadores se realizó mediante el sistema de transmisión indirecta de la probeta de concreto.

Tabla 20

Tratamientos superficiales.

| | | |
|------|----------|------------|
| HA25 | 25 N/MM2 | 254 KG/CM2 |
| HA40 | 40 N/MM2 | 410 KG/CM2 |

| Código superficie | Tratamiento | Rugosidad |
|-------------------|---------------------|-----------|
| A | Lijado | Lisa |
| B | Cepillo de púas | Media |
| C | Cepillo de desgaste | Rugosa |

Fuente: Aplicación de las técnicas no destructivas pull-off y ultrasonidos en el control de calidad del refuerzo con materiales compuestos en estructuras de concreto (2018)

Tabla 21*Resumen del número de probetas utilizadas y número de ensayos ejecutados*

| N° DE PROBETA | REF. PROBET | N° ENSAYOS ULTRASONIDOS | | SOBRE PARA FIBRA DE CARBONO | N° ENSAYOS PULL OFF |
|---------------|--------------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------------|---------------------|
| | | N° ENSAYOS FLEXIÓN | SOBRE CONCRETO | | |
| 1 | (1)HM40-1A | 1 | 1 | 1 | * |
| 2 | (2)H40-1B | 1 | 1 | 1 | * |
| 3 | (3)HM40-1C +FRP | 1 | 1 | 1 | * |
| 4 | (4)HM40-A +FRP + Espiga | 1 | 1 | 1 | * |
| 5 | (5)HM40-B +FRP + Espiga | 1 | 1 | 1 | * |
| 6 | (6)HM40-C +FRP + Espiga | 1 | 1 | 1 | * |
| 7 | (7)HM40 (sin reforzar) | 1 | 1 | | |
| 8 | (8)HM25-1A +FRP | 1 | 1 | 1 | * |
| 9 | (9)HM25-1B +FRP | 1 | 1 | 1 | * |
| 10 | (10)HM25-1C +FRP | 1 | 1 | 1 | * |
| 11 | (11)HM25 (sin reforzar) | 1 | 1 | | |
| 12 | (12) HM 40 +FRP (caras A,B,C) | | 1 | 1 | 15 |
| 13 | (13) HM 40 +FRP (caras A,B,C) | | 1 | 1 | 15 |
| 14 | (14) HM 25 +FRP (caras A,B,C) | | 1 | 1 | 15 |
| 15 | (15)HA40-C+FRP | | 1 | 1 | ** |
| 16 | (16)HA40-C+FRP + Espiga | | 1 | 1 | ** |
| 17 | (17)HA40 (sin reforzar) | 1 | 1 | | |
| 18 | (18)HA25-C+FRP | | 1 | 1 | * |
| 19 | (19)HA25 (sin reforzar) | 1 | 1 | | |
| 20 | (21) HA 40 - C | | 1 | 1 | * |
| 21 | (22) HA 40 - C | | 1 | 1 | * |
| 22 | (22)HM40-2A +FRP | 1 | 1 | 1 | * |
| 23 | (23)HM40-2B +FRP | 1 | 1 | 1 | * |
| 24 | (24)HM40-2C +FRP | 1 | 1 | 1 | * |
| 25 | (25)HM25-2A +FRP | 1 | 1 | 1 | * |
| 26 | (26)HM25-2B +FRP | 1 | 1 | 1 | * |
| 27 | (27)HM25-2C +FRP | 1 | 1 | 1 | * |
| 28 | (28) HM 40 +FRP (caras A,B,C) | | 1 | 1 | 15 |
| 29 | (29) HM 25 +FRP (caras A,B,C) | | 1 | 1 | 15 |
| 30 | (30)HM40-3A +FRP | 1 | 1 | 1 | * |
| 31 | (31)HM40-3B +FRP | 1 | 1 | 1 | * |
| 32 | (32)HM40-3C +FRP | 1 | 1 | 1 | * |
| 33 | (33)HM25-3A +FRP | 1 | 1 | 1 | * |
| 34 | (34)HM25-3B +FRP | 1 | 1 | 1 | * |
| 35 | (35)HM25-3C +FRP | 1 | 1 | 1 | * |
| 36 | (36) HM 40 +FRP (caras A,B,C) | | 1 | 1 | 15 |
| 37 | (37) HM 25 +FRP (caras A,B,C) | | 1 | 1 | 15 |
| 38 | (38) HM 25 + FRP (caras A,B,C) | | 1 | 1 | 15 |

Nota: Nomenclatura de las probetas utilizadas en los ensayos del autor. Adaptado de “*Aplicación de las técnicas no destructivas pull-off y ultrasonidos en el control de calidad del refuerzo con materiales compuestos en estructuras de concreto*”, Fernández (2018)

Tabla 22*Resultados de los ensayos tipo Pull-off*

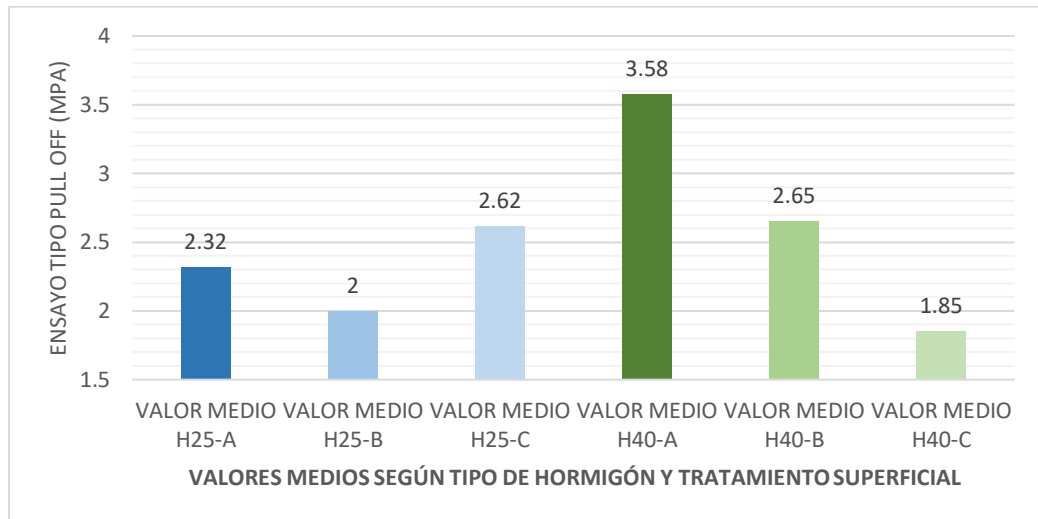
| PROBETA | PULL OFF | |
|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | Tensión media de arrancamiento (MPa) | Porcentaje de rotura en la unión (%) |
| (12) HM 40 - A+FRP | 5,33 | 14% |
| (12) HM 40 - B+FRP | 3,24 | 93% |
| (12) HM 40 - C+FRP | 2,13 | 25% |
| (13) HM 40 - A+FRP | 3,23 | 60% |
| (13) HM 40 - B+FRP | 2,13 | 23% |
| (13) HM 40 - C+FRP | 2,51 | 16% |
| (14) HM 25- A+FRP | 2,51 | 1% |
| (14) HM 25- B+FRP | 2,96 | 0% |
| (14) HM 25- C+FRP | 3,23 | 10% |
| (28) HM 40 - A+FRP | 2,56 | 2% |
| (28) HM 40 - B+FRP | 2,02 | 50% |
| (28) HM 40 - C+FRP | 1,52 | 29% |
| (29) HM 25- A+FRP | 2,66 | 20% |
| (29) HM 25- B+FRP | 1,07 | 29% |
| (29) HM 25- C+FRP | 1,7 | 35% |
| (36) HM 40 - A+FRP | 2,84 | 13% |
| (36) HM 40 - B+FRP | 3,21 | 48% |
| (36) HM 40 - C+FRP | 1,51 | 16% |
| (37) HM 25- A+FRP | 1,78 | 24% |
| (37) HM 25- B+FRP | 1,97 | 14% |
| (37) HM 25- C+FRP | 2,92 | 0% |
| (38) HM 25- A+FRP | 2,35 | 20% |
| (38) HM 25- B+FRP | 2 | 18% |
| (38) HM 25- C+FRP | 2,62 | 5% |

Nota: Resultados pull off obtenidos por el autor. Adaptado de “*Aplicación de las técnicas no destructivas pull-off y ultrasonidos en el control de calidad del refuerzo con materiales compuestos en estructuras de concreto*”, Fernández (2018)

Obteniendo la media de los valores de la tensión de arrancamiento para cada tipo de concreto y tratamiento superficial, en la tabla 22 se observa que la rugosidad influye en la tensión de arrancamiento.

Figura 17

Tensión de arrancamiento media del ensayo tipo Pull-Off según tratamiento superficial y tipo de concreto



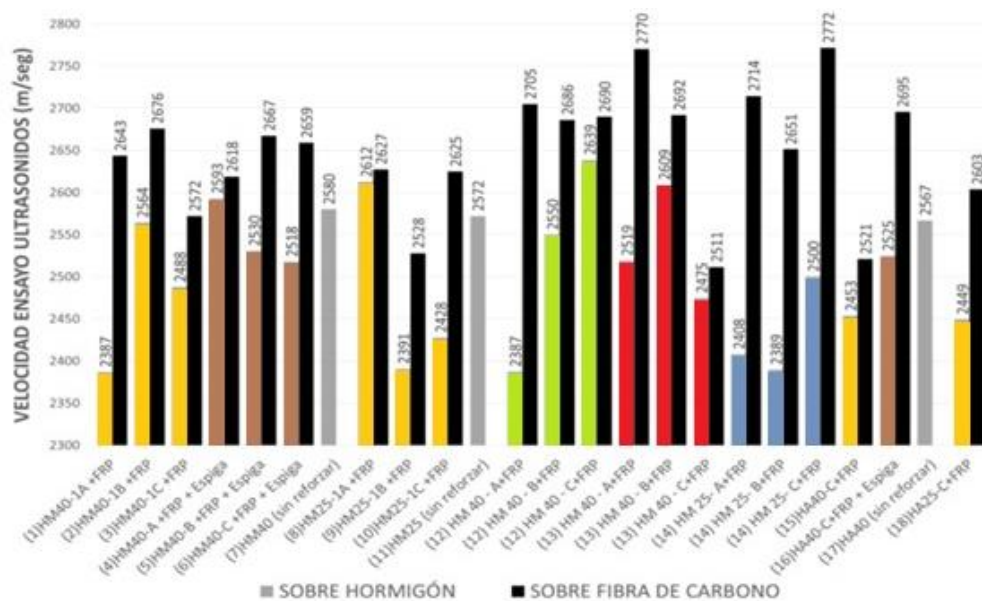
Nota: Ensayo pull off promedio de acuerdo al tipo de concreto y tratamiento utilizado por el autor. Adaptado de “*Aplicación de las técnicas no destructivas pull-off y ultrasonidos en el control de calidad del refuerzo con materiales compuestos en estructuras de concreto*”, Fernández (2018)

En probetas de concreto HM-40 a medida que aumenta la rugosidad de la superficie disminuye la tensión de adherencia. Por lo que respecta al tipo de concreto HM-25 no influye la preparación del soporte.

La toma de datos de ultrasonido se realizó sobre cada una de las 3 caras reforzadas de las 8 probetas destinadas a los ensayos de Pull-Off y sobre cada una de las caras de las 24 probetas destinadas para el ensayo a flexión. Se realizaron 72 medidas antes de la aplicación del refuerzo y otras 72 medidas a posteriori una vez aplicado el refuerzo de FRP. Por lo tanto, y como resultado se obtuvieron dos series de datos, uno de los valores obtenidos sobre el concreto y otra sobre la fibra de carbono aplicada y endurecida.

Figura 18

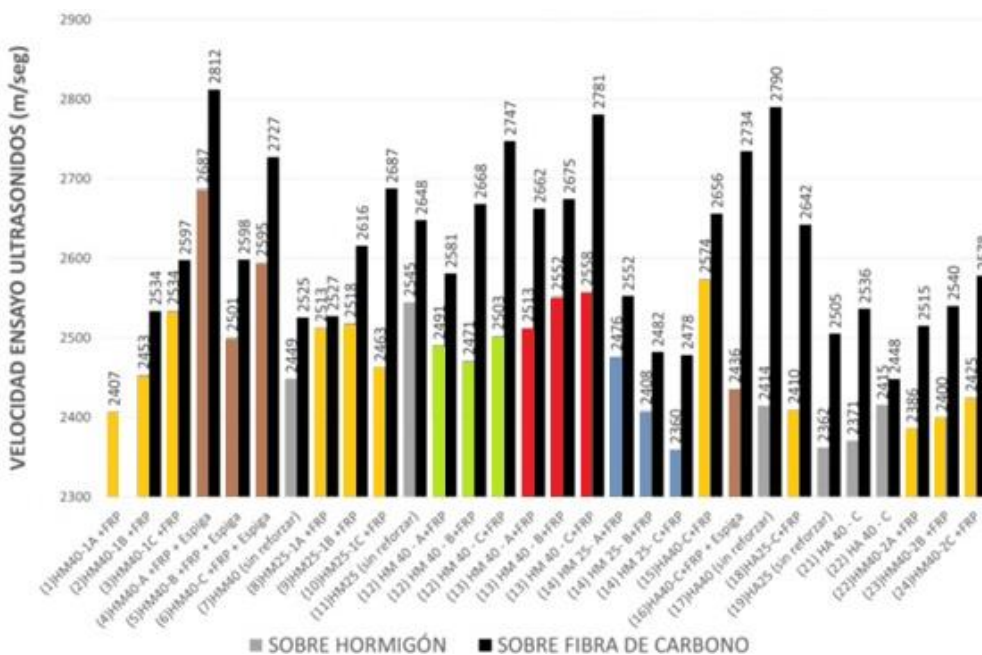
Resultados de ensayos de ultrasonidos antes y después de colocar el refuerzo



Nota: Velocidad de respuesta a ultrasonidos para cada ensayo realizado por el autor. Adaptado de “Aplicación de las técnicas no destructivas pull-off y ultrasonidos en el control de calidad del refuerzo con materiales compuestos en estructuras de concreto”, Fernández (2018)

Figura 19

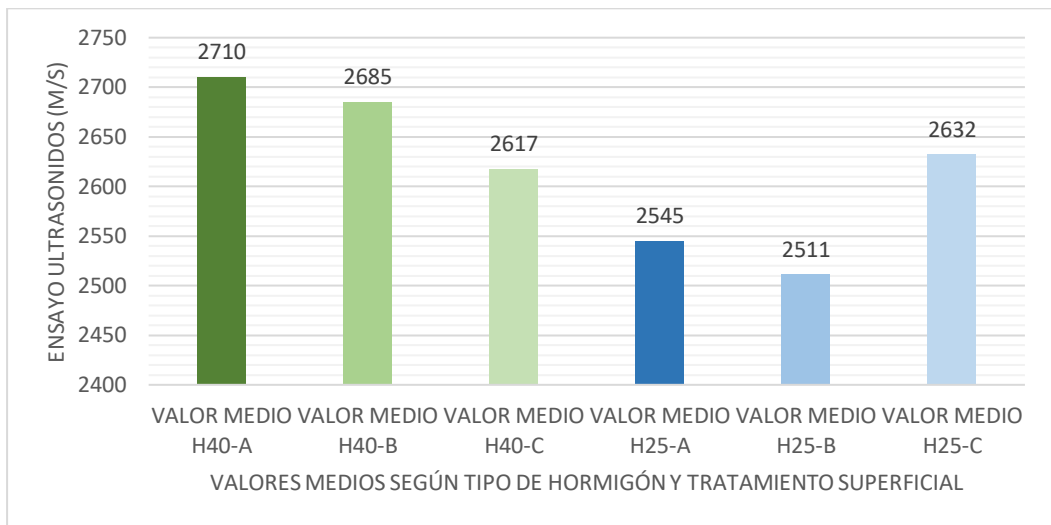
Resultados de ensayos de ultrasonidos antes y después de colocar el refuerzo



Nota: Velocidad de respuesta a ultrasonidos para cada ensayo realizado por el autor. Adaptado de “Aplicación de las técnicas no destructivas pull-off y ultrasonidos en el control de calidad del refuerzo con materiales compuestos en estructuras de concreto”, Fernández (2018)

Figura 20

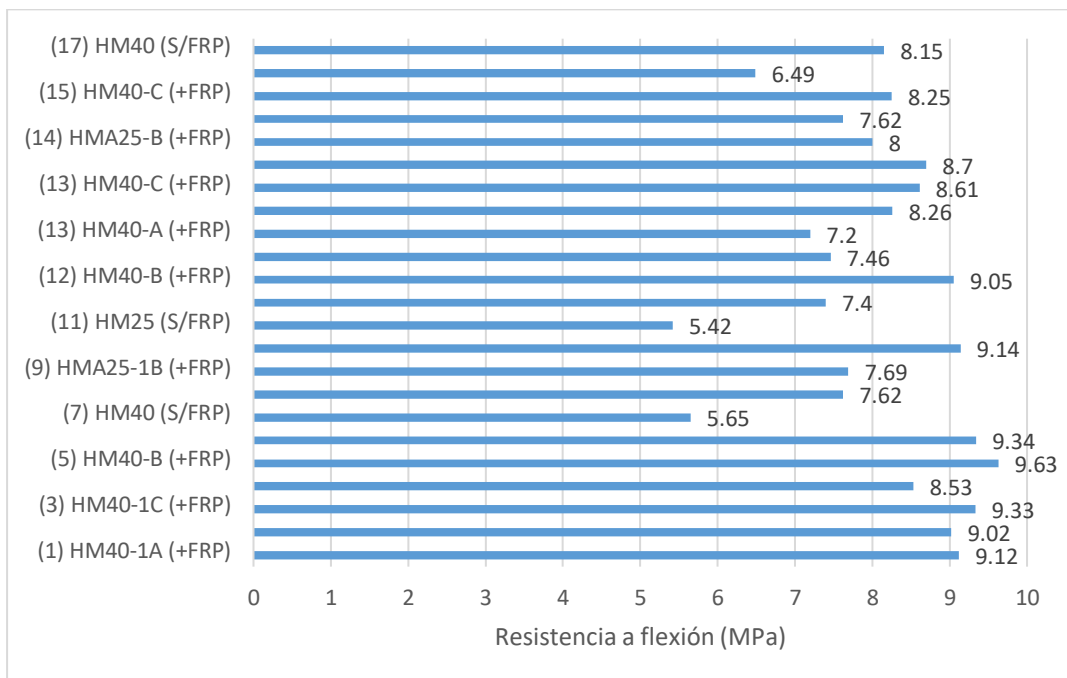
Resultados medios ultrasonidos según tratamiento superficial y tipo de Concreto



Nota: Ensayo a ultrasonidos promedio de acuerdo al tipo de concreto y tratamiento utilizado por el autor. Adaptado de “Aplicación de las técnicas no destructivas pull-off y ultrasonidos en el control de calidad del refuerzo con materiales compuestos en estructuras de concreto”, Fernández (2018)

Figura 21

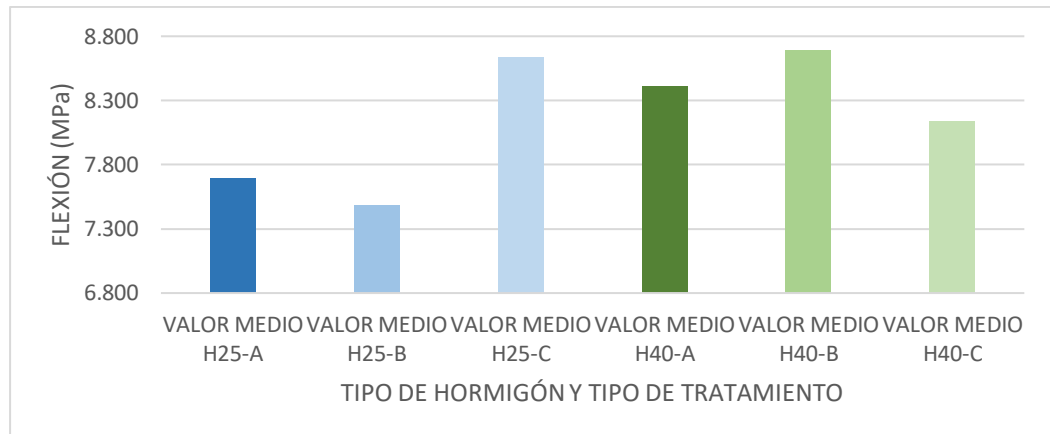
Resultados de ensayos a flexión realizados



Nota: Resultados a flexión obtenidos por el autor. Adaptado de “Aplicación de las técnicas no destructivas pull-off y ultrasonidos en el control de calidad del refuerzo con materiales compuestos en estructuras de concreto”, Fernández (2018)

Figura 22

Valores medios de los ensayos a flexión según tipo de hormigón y tratamiento superficial



Nota: Ensayo a flexión promedio de acuerdo al tipo de concreto y tratamiento utilizado por el autor. Adaptado de “Aplicación de las técnicas no destructivas pull-off y ultrasonidos en el control de calidad del refuerzo con materiales compuestos en estructuras de concreto”, Fernández (2018)

Para el tipo de concreto HM-40, el mayor valor de resistencia a flexión se obtiene para la preparación de la superficie media (tipo B) 8,69 MPa, si bien no existe una gran variación de la resistencia a flexión entre las tres preparaciones superficiales, que muestran valores respectivos para A, B y C de 8,41 MPa, 8,69 MPa y 8,13 MPa respectivamente. Por lo que respecta al concreto tipo HM-25, existe claramente un valor de mejora considerable de la resistencia a flexión para la preparación de la superficie tipo C (Figura 22), de 7,69 MPa en el tipo A, a 8,64 MPa en el tipo C.

Li, Z., & Meng, Z. (2016) en su investigación revisa las recientes aplicaciones de técnicas en ensayos no destructivos (NDT) existentes, especialmente de radiofrecuencia (RF), para compuestos plásticos reforzados con fibra de carbono (CFRP). Las propiedades electromagnéticas de los compuestos de CFRP que están asociadas con radiofrecuencias RF se discuten primero. Se debe prestar atención a la característica anisotrópica de la conductividad, la relación entre la profundidad de penetración y la conductividad.

Las técnicas no destructivas incluyen técnicas de corrientes parásitas, la técnica de microondas y la termografía basada en radio frecuencias, se clasifican en cuatro tipos (es decir, inducción electromagnética, resonancia, termografía basada en RF y propagación en ondas de RF).

Tabla 23*Diferentes ensayos no destructivos aplicados en CFRP*

| Métodos de RF NDT | Descripción |
|---|---|
| - Inducción electromagnética de Faraday | - Detecta daños en compuestos de CFRP - Defectos locales como rotura de CFRP - Zonas ricas en resinas - Delaminación - Daños por impacto - Regiones desunidas se detectaron a 10 y 24Ghz - Tamaño de la falla fue de 0.2 mm por 100 |
| - Método de resonancia | - Se compone de una cavidad resonante - Se emiten microondas evanescentes desde la punta - Cuando la sonda se mantiene a una distancia de separación fija, los defectos afectaran la frecuencia de resonancia de la cavidad. |
| - Métodos de termografía basada en RF | |
| Termografía por corrientes parasitas pulsadas (PEC) | - Daños por impacto de baja energía - Detectar grietas superficiales - Desarrolla la detección de daños - Cualquier cambio en la microestructura del CFRP puede cambiar el tensor de conductividad. - Los cambios en los flujos de corriente inducidos serían revelados por una cámara infrarroja (IR). |
| Termografía por microondas | - Usando la energía de microondas se calienta la región de interés y luego se mide la superficie térmica - La delaminación del CFRP es visible en la imagen térmica |
| - Método de propagación de ondas de RF | - Utilizan la línea de transmisión y la teoría de la antena - Se hizo una antena dipolo usando 2 láminas de CFRP, la muestra dañada cambia las propiedades de la antena |

Fuente: Elaboración propia

En esta investigación el autor da a conocer diferentes tipos de ensayos no destructivos basados en radiofrecuencias, se hace una recopilación describiendo el uso y lo que se puede detectar con cada método cuando se usa fibra de carbono como refuerzo, estos métodos nos ayudan a poder garantizar el estado de la fibra, una correcta adherencia y tener un desempeño óptimo del sistema, resaltando entre las expuestas el método de inducción electromagnética de Faraday y el método de termografía por corrientes pulsadas (PEC).

Gerritse, A, Hole. A, Pilakoutas. K, Taerwe. L, Triantanfilliou. T, Pascale. G & Di Tommaso. A (2001) en su investigación recopilan los diferentes ensayos no destructivos existentes en donde nos describen su aplicación, los defectos que pueden hallar cada uno de estos métodos y fallos que se pueden presentar al usar CFRP como método de reforzamiento.

Tabla 24*Técnicas no destructivas aplicadas a ensayos con CFRP*

| Técnicas no destructivas | |
|--------------------------------------|---|
| Tapping | Normalmente, los huecos se pueden detectar mediante un golpecito en la superficie unida con una varilla de acero de 5 mm de diámetro y punta redondeada. |
| Técnicas de eco pulsado ultrasonido | Se utiliza un haz ultrasónico de alta frecuencia para escanear la interfaz de hormigón y FRP y los defectos de unión se localizan a través de los ecos generados por el desajuste de impedancia acústica. Las técnicas de amplitud de eco son preferibles a las de tiempo de vuelo |
| Técnica de transparencia ultrasónica | Se utiliza un haz ultrasónico de baja frecuencia para escanear trayectorias ortogonales a la superficie reforzada donde se coloca uno de los traductores, mientras otro transductor se encuentra en la cara opuesta del elemento de hormigón. |
| Termografía | El NDT termográfico en condición dinámica directa se ha aplicado con éxito a la evaluación de la unión. La prueba debe realizarse con la muestra en equilibrio térmico, aplicando un calentamiento (o enfriamiento) homogéneo a la superficie libre de FRP y registrando su temperatura superficial durante el transitorio térmico con un sistema de imágenes infrarrojas. Los defectos se ubican como puntos calientes (o fríos) debido a las diferentes propiedades térmicas de la unión degradada |
| Otras técnicas dinámicas | Actualmente se están evaluando otras técnicas dinámicas basadas en el análisis del espectro de impacto y en la propagación de ondas acústicas de superficie. |

Fuente: Elaboración propia

López J. (2012), en su investigación recopilan los diferentes ensayos no destructivos existentes en donde nos describen su aplicación, los defectos que pueden hallar cada uno de estos métodos y fallos que se pueden presentar al usar CFRP como método de reforzamiento.

Este artículo revisa las capacidades de las técnicas de END más comunes utilizadas para inspeccionar la integridad de los materiales compuestos. Cada técnica tiene un potencial de detección y no puede permitir un diagnóstico completo del estado de daño mecánico del material. Así, dependiendo del mecanismo de daño que se produzca y las condiciones de uso, se preferirá una técnica sobre otra, o se deberán combinar varias técnicas para mejorar el diagnóstico del estado de daño de las estructuras.

Tabla 25*Descripción de diferentes ensayos no destructivos para CFRP*

| Tipos de ensayos no destructivos | |
|------------------------------------|---|
| Ensayo de adherencia (tap - test) | <p>Se comprobará mediante golpeteos la presencia de zonas huecas (sonido sordo al impacto) con una barra de acero de 5 mm de diámetro y punta redondeada</p> <p>Se señalarán las zonas afectadas</p> <p>En caso de apreciarse zonas con fallas de adherencia en laminados, deberán repararse por inyección.</p> <p>En caso de apreciarse zonas con fallos de adherencia en la instalación de hojas de fibra se aplicarán los siguientes criterios.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Inferiores a 12 cm² serán permisibles y no se repararán si: <ul style="list-style-type: none"> Área afectada es inferior al 5% del total La distribución no supera las 10 por m² <ul style="list-style-type: none"> - Hasta 160 cm² podrán repararse por inyección de resina. - Mas de 160 cm² deberán cortarse y repararse. |
| Ensayo de eco mediante ultrasonido | <p>Una onda de ultrasonidos de alta frecuencia se utiliza para escanear la interfase entre hormigón refuerzo CFRP.</p> <p>Detectar defectos de adherencia a través de ecos generados por desajustes de impedancia acústica.</p> <p>La efectividad de esta técnica está limitada defectos como burbujas de aire o gas</p> <p>Las áreas de refuerzo CFRP próximas a bordes o con radios de curvatura muy pequeños no pueden ser ensayados con éxito con esta técnica.</p> <p>Está recomendada únicamente para las áreas de refuerzo donde la unión de los elementos es crítica</p> |
| Ensayo de ultrasonido transparente | <p>Se aplica una onda de ultrasonidos de baja frecuencia para escanear direcciones ortogonales a la superficie reforzada donde un transductor está ubicado, mientras otro transductor está ubicado en la cara opuesta del elemento de hormigón</p> <p>Se graban el tiempo de recorrido de la onda a través de la masa y la atenuación de la misma</p> <p>Esta técnica sólo es posible cuando ambas caras del elemento, la reforzada y la opuesta son fácilmente accesibles sin excesiva pérdida de tiempo.</p> <p>Su uso es recomendable en situaciones concretas.</p> |
| Termografía | <p>Se aplica exitosamente en la evaluación de la adherencia.</p> <p>Debe realizarse con la muestra en equilibrio térmico, aplicando un constante de calor (o frío) a la superficie de refuerzo CFRP</p> <p>Grabar la temperatura mediante un sistema infrarrojo</p> <p>Los defectos son localizados como puntos de calor (o frío) debido a las propiedades térmicas diferentes del adhesivo degradado</p> <p>Requiere mucha atención y cuidado en el cálculo de los defectos detectables más pequeños a fin de garantizar su estado y propagación.</p> |
| Pruebas de carga | <p>Para la puesta en servicio del elemento reforzado hay que tener en cuenta que el adhesivo va adquiriendo sus resistencias hasta conseguir el endurecimiento total a los 7 días.</p> <p>Es necesario esperar 7 días hasta sobrecargar el elemento estructural a su carga máxima</p> <p>Se puede cargar si el caso lo requiere con sobrecargas inferiores que no hagan superar el límite de resistencia del adhesivo en cada momento.</p> |

Fuente: Elaboración propia

En esta investigación el autor da a conocer las diferentes técnicas de ensayos no destructivos que se pueden aplicar a los elementos reforzados con CFRP para garantizar su correcta adherencia y el correcto desempeño del sistema, resaltando entre los métodos expuestos el ensayo de eco mediante ultrasonido que permite detectar defectos de adherencia por medio de ondas.

5.2. Contrastación de resultados

5.2.1. Contrastación de la primera hipótesis

Hipótesis 1: Al verificar los resultados de ensayos en probetas con el sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra de carbono se mejora el desempeño mecánico de los elementos estructurales de concreto.

En las investigaciones analizadas verifican que las probetas cilíndricas al ser reforzadas por capas con fibra de carbono aumentan considerablemente su resistencia, incluso más que si esta fuera reforzada por fibra de vidrio. Adicionalmente se ha elaborado un análisis cuantitativo para cada una de las investigaciones analizadas que nos permite intuir la resistencia final de las probetas cilíndricas reforzadas sometidas al ensayo de compresión, basándonos en las normativas vigentes internacionales, ACI 440 2R 17.

Tabla 26

Comparativa del análisis porcentual por número de capas

| Autor del ensayo | Resistencia nominal kg/cm ² | N° de capas | Resistencia compresión (patrón, s/ reforzamiento) kg/cm ² | Resistencia compresión kg/cm ² | Mejora % |
|------------------------|---|-------------|---|--|----------|
| Piñero (2016) | 122,36 | 1 | 124,33 | 290,45 | 233,6% |
| Aire Untiveros (2002) | 210 | 1 | 290,00 | 541,00 | 186,0% |
| Piñero (2016) | 356,9 | 1 | 362,14 | 590,60 | 163,0% |
| Castro Zavaleta (2019) | 428,28 | 1 | 428,28 | 469,06 | 19,5% |
| Aire Untiveros (2002) | 210 | 3 | 290 | 691 | 238,0% |
| Castro Zavaleta (2019) | 428,28 | 3 | 428,28 | 785,181 | 183,0% |

Fuente: Elaboración propia

Se observó que el refuerzo mediante tejido de CFRP es más efectivo en las muestras de los resultados que han sido diseñadas con una resistencia nominal más baja, llegando a ser hasta 2.3 veces la resistencia a compresión patrón.

Tabla 27

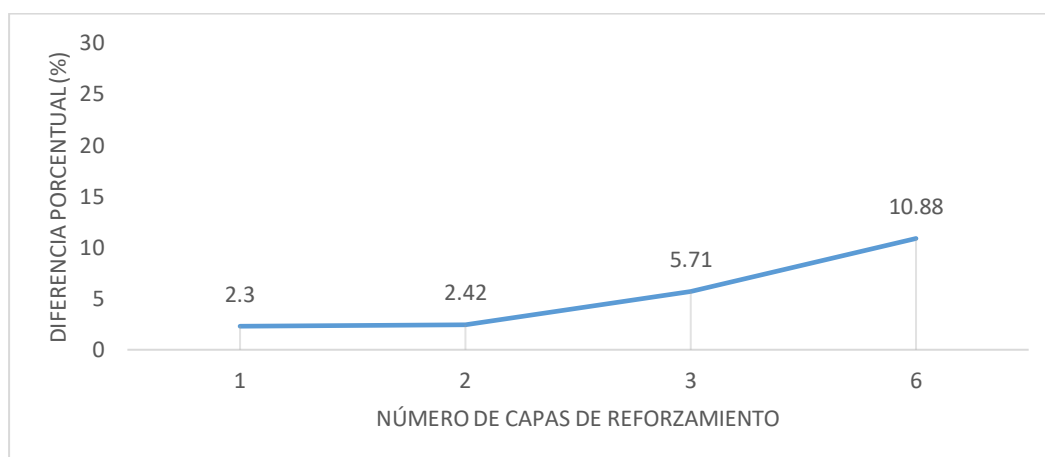
Comparativa del análisis porcentual de resistencias de f'_{cc} según ACI 440 2R-17

| Autor del ensayo | f'_{c} (diseño) (kg/cm ²) | N° de capas | f'_{c} (reforzada) (kg/cm ²) | ACI 440 2R f'_{cc} (kg/cm ²) | Diferencia % |
|------------------------|---|-------------|--|---|--------------|
| Piñero (2016) | 357 | 1 | 512,1 | 524 | 2,30 |
| Castro Zavaleta (2019) | 258 | 2 | 561 | 574,58 | 2,42 |
| Castro Zavaleta (2019) | 258 | 3 | 691 | 732,87 | 5,71 |
| Aire Untiveros (2002) | 420 | 6 | 1203 | 1350 | 10,88 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 23

Diferencia porcentual de las resistencias a compresión



Fuente: Elaboración propia

El método que se usó fue el de regresión para evaluar el comportamiento de la diferencia porcentual frente a la cantidad de capas que se utiliza para el reforzo de las probetas.

Mediante análisis por software se demuestra también que el reforzamiento con FRP, aumenta considerablemente la capacidad individual de los elementos estructurales, y por ende de toda la estructura, puesto que es un elemento de acción pasiva, es decir trabaja a medida que se deforma, proporcionando rigidez, reduciendo el periodo, y los porcentajes de participación modal, a manera de un acero equivalente, pero es ineficiente para corregir problemas de derivas, por su escasa aportación de inercia, y puede inducir a problemas de fallas frágiles y de torsión, cuando no se controla una rigidez equitativa.

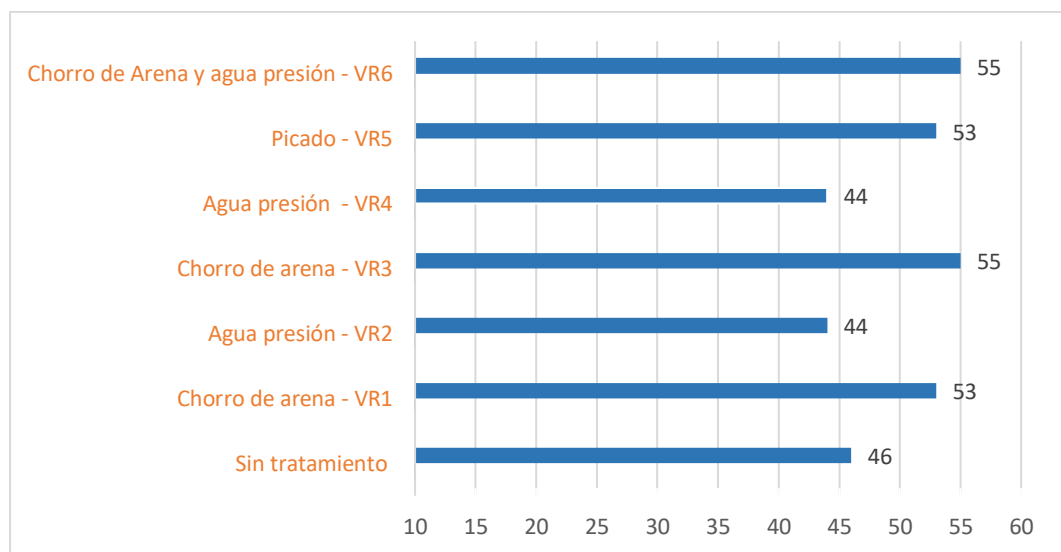
5.2.2. Contrastación de la segunda hipótesis

Hipótesis 2: Al determinar el adecuado tratamiento de la superficie se garantiza la adhesión del sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra de carbono en elementos estructurales de concreto.

En las investigaciones analizadas se verifican las muestras que tienen un tratamiento de superficie a base de chorro de arena a presión y haciéndoles unas pequeñas perforaciones a la superficie de 10 mm de diámetro, 3mm de profundidad y siendo espaciados 50 mm entre centros de cada agujero mejoran su resistencia a la compresión y resistencia al arrancamiento.

Figura 24

Comparación de resistencias a la compresión de vigas reforzadas con CFRP a diferentes tratamientos de superficie

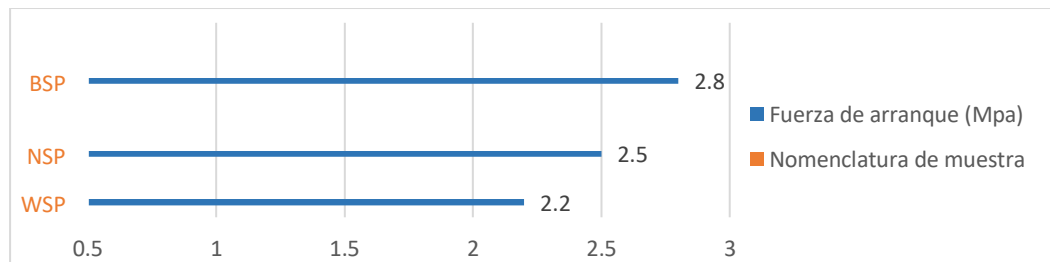


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 24 se puede observar que preparar la superficie del concreto usando chorro de arena - agua a presión ayuda a dar una mejor adherencia para unir el hormigón y el CFRP mediante la resina epóxica

Figura 25

Fuerza de arranque en diferentes superficies de losas reforzadas con CFRP



Fuente: Elaboración propia

Analizando los resultados se puede observar en la Figura 25 una tendencia del aumento de la resistencia al arrancamiento con cada tipo de preparación en la superficie, siendo la muestra BSP tratada con pequeñas perforaciones en su superficie la que obtiene la mayor resistencia de 2.8 Mpa seguida de la muestra NSP tratada con chorro de arena a presión que obtiene una resistencia de 2.5 Mpa.

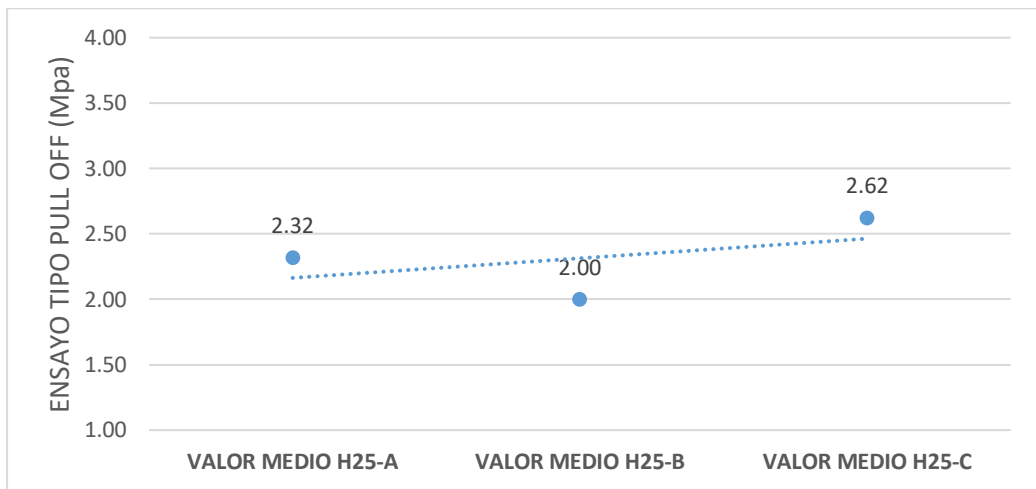
5.2.3. Contrastación de la tercera hipótesis

Hipótesis 3: Al verificar el correcto control de los ensayos no destructivos se garantiza la adhesión del sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra de carbono en elementos estructurales de concreto.

A partir del artículo analizado verificamos que es posible cuantificar el comportamiento del refuerzo, si bien, no considerándose adecuado establecer correlaciones generales según tipo de concreto, es recomendable realizar dicha correlación en cada refuerzo a verificar, así mismo, los ensayos de ultrasonidos nos permiten verificar la adecuada preparación del soporte o rugosidad de la superficie.

Figura 26

Pull Off en muestras H25

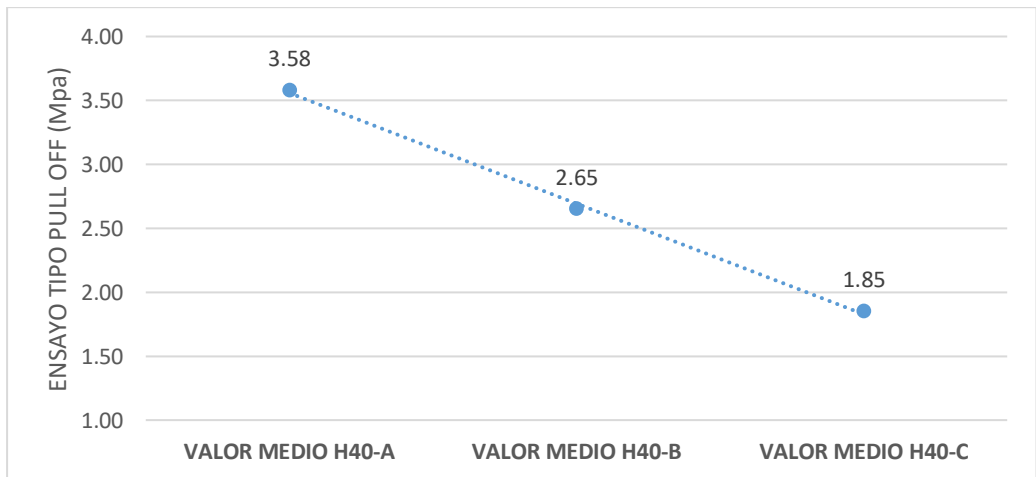


Fuente: Elaboración propia

Se aprecia que los resultados de Pull Off para concretos de baja resistencia son similares entre sí para las distintas rugosidades de la superficie del concreto.

Figura 27

Pull Off en muestras H40

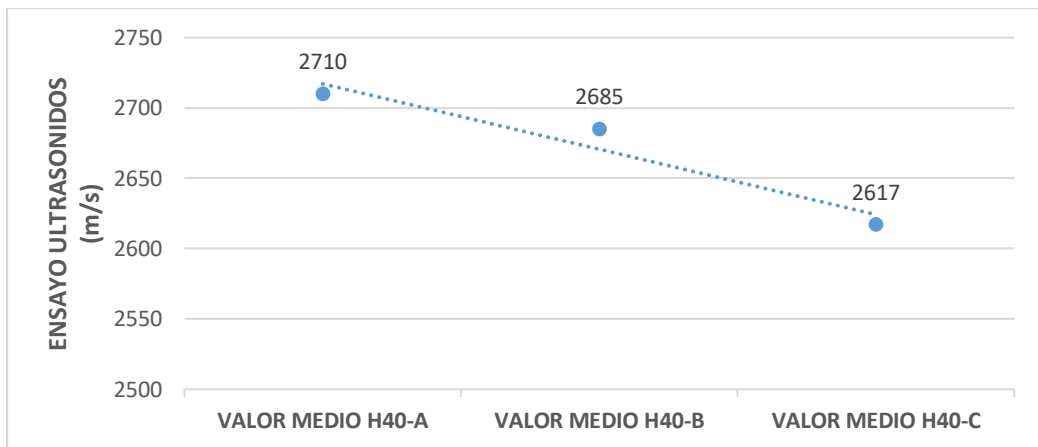


Fuente: Elaboración propia

Se aprecia que los resultados de Pull Off para concretos de alta resistencia, trabajan mejor para una superficie A (Lisa), que recibió un tratamiento de lijado, siendo la menos efectiva para una superficie C (Rugosa), que recibió un tratamiento de cepillo desgaste.

Figura 28

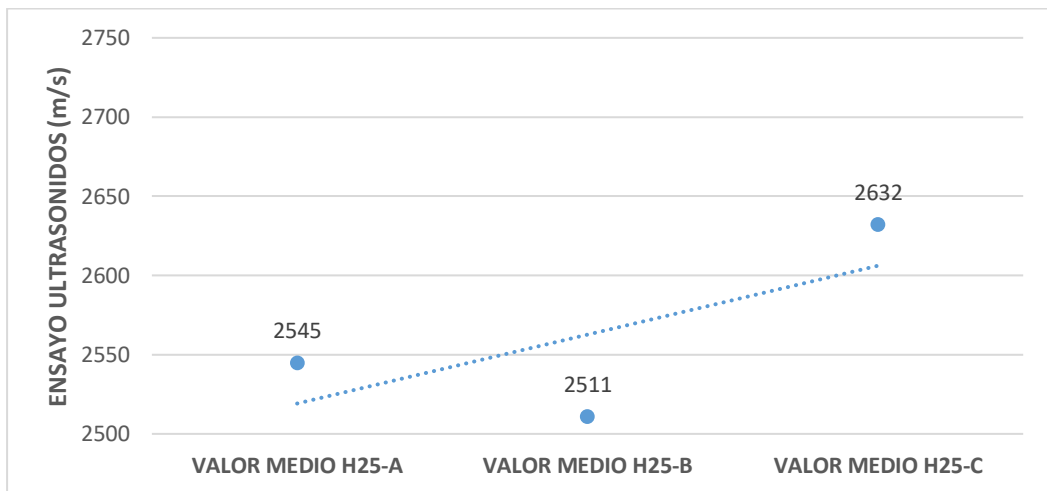
Ultrasonidos en muestras H40



Fuente: Elaboración propia

Figura 29

Ultrasonidos en muestras H25



Fuente: Elaboración propia

Se puede verificar la adecuada preparación del soporte o rugosidad de la superficie sobre todo en concretos de alta resistencia.

Con este ensayo podemos establecer parámetros de calidad de la adhesión del refuerzo de FRP y por ende del aumento de la capacidad mecánica, se podrá definir un método de control de calidad rápido, no destructivo y válido para evaluar la calidad del refuerzo ejecutado.

Tabla 28*Cuadro resumen de ensayos no destructivos (NDT)*

| Autor | Método | Comentario |
|--|---|---|
| Li, Z., & Meng, Z. (2016) | <ul style="list-style-type: none"> - Inducción electromagnética de Faraday - Método de resonancia - Métodos de termografía basada en RF - Termografía por corrientes parasitas pulsadas (PEC) - Termografía por microondas - Método de propagación de ondas de RF | El presente autor expone técnicas en ensayos no destructivos existentes basados en radiofrecuencias para aplicarse en fibra de carbono y poder detectar fallo tanto de adherencia como de fibra. |
| Gerritse, A, Hole.A , Pilakoutas.K , Taerwe.L , Triantanfilidou . T, Pascale.G & Di Tommaso.A (2001) | <ul style="list-style-type: none"> - Tapping - Técnicas de eco pulsado ultrasonido - Termografía - Otras técnicas dinámicas | Los presentes autores presentan métodos para garantizar una correcta aplicación y estado de la fibra de carbono, resaltando entre ellos método de eco pulsado con ultrasonido que nos permite detectar fallos de adherencia . |
| López J. (2012) | <ul style="list-style-type: none"> - Ensayo de adherencia (tap- test) - Ensayo de eco mediante ultrasonido - Ensayo de ultrasonido transparente - Termografía - Pruebas de carga | Recopila diferentes ensayos no destructivos en donde explica sus aplicaciones, los defectos y fallos que se pueden detectar con cada uno de estos métodos cuando se trabaja con CFRP como refuerzo estructural |

Fuente: Elaboración propia

Al comparar la recopilación de los autores en la Tabla 28 notamos las capacidades de las técnicas de ensayos no destructivos NDT más comunes utilizadas para la inspección de los materiales compuestos. Cada técnica tiene un potencial de detección y puede permitir un diagnóstico completo del estado de daño mecánico del material. Así, dependiendo del mecanismo de daño que se produzca y las condiciones de uso, se preferirá una técnica sobre otra, o se deberán combinar varias técnicas para mejorar el diagnóstico del estado de daño de las estructuras.

Entre los ensayos no destructivos que más resaltan y proponemos su difusión en nuestro país se tienen los siguiente:

- El ensayo de inducción electromagnética de Faraday, que tiene como particularidad detectar daños, defectos locales de rotura, zonas ricas en resinas y regiones desunidas detectadas a 10 y 24 GHz.
- El ensayo de termografía por corrientes pulsadas (PEC), la cual desarrolla la detección de daños en la fibra, detecta grietas superficiales.

- El ensayo de termografía por microondas, la cual usa la energía de microondas calentando la región de interés y luego se mide la superficie térmica, la delaminación del CFRP siendo visible en la imagen térmica.
- El ensayo de eco mediante ultrasonido, la cual detecta defectos de adherencia a través de ecos generados por desajustes de impedancia acústica.

5.3. Discusiones

1. Según Piñero (2016), Aire Untiveros (2002), Castro Zavaleta (2019), el confinamiento con polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP), aumenta considerablemente la resistencia a compresión y la deformación del hormigón.

En nuestra investigación afirmamos esta conclusión, ya que el refuerzo de fibra de carbono (CFRP) aumenta la resistencia de las secciones de concreto armado sometidas a flexión. En el caso de secciones con menor cuantía de acero, la fibra de carbono tiene una mayor influencia en el incremento de su resistencia, debido a que la fibra de carbono y el acero poseen una rigidez similar. Se comprobó que el comportamiento del CFRP es prácticamente lineal hasta llegar al estado de falla, por lo que es considerado un material frágil. Adicionalmente se correlacionan a los valores teóricos que nos da como resultado el análisis numérico, basándonos en la norma brindada por el ACI 440 2R 17.

2. Landa, G (2015), Md, N., Noor, M. N. S., Siti Norfahanim, A.M., Mohd Hisbany, M.H., & Norfaridah, M. (2019), la preparación de la superficie antes de la aplicación del epóxico y fibra de carbono CFRP con chorro de arena a presión y haciéndole pequeños orificios de 3mm aumenta su fuerza de arranque y adhesión.

En nuestra investigación afirmamos esta conclusión, ya que al comparar los resultados de estos autores notamos que las muestras a las que se le aplicaron estos dos tratamientos en la superficie tienen una mayor resistencia a la compresión y a la fuerza de arranque.

3. Según Fernández, Barrios Padura, & Molina Huelva (2018), los ensayos de ultrasonidos se pueden emplear para verificar la adecuada preparación del soporte o rugosidad de la superficie, sobre todo en concretos de alta resistencia, como parte de un protocolo de control de calidad del refuerzo que permita valorar su eficacia.

En nuestra investigación afirmamos esta conclusión pues mediante ensayos de ultrasonidos aplicadas en gran parte de la superficie de los elementos reforzados,

complementada con una serie de ensayo de Pull-Off seleccionados en función de los ultrasonidos, permitirían cuantificar el comportamiento del refuerzo. Así mismo en la investigación someten las probetas a ensayos a flexión, lo cual nos complementa la demostración de la mejora del desempeño mecánico del sistema.

CONCLUSIONES

1. Se concluye que la aplicación de fibra de carbono como reforzamiento aumenta la resistencia del concreto dependiendo del diseño del elemento estructural, del gramaje de la fibra de carbono y el número de capas de CFRP que se aplique a una óptima superficie, puesto que en el presente estudio se determinó que el uso de este sistema aumenta hasta un máximo de 2.3 la resistencia final a compresión, que varía inversamente proporcional al número de capas de refuerzo colocadas en probetas cilíndricas, viéndose también que la óptima superficie a tratar debe por chorro de arena a presión y micro perforaciones.
2. Se concluye que para los resultados obtenidos de probetas cilíndricas de concreto reforzadas con CFRP al 100%, las probetas de baja resistencia llegan a experimentar un incremento de 2.3 veces su resistencia (290.45 kg/cm²), mientras que para probetas de concreto de alta resistencia el incremento es 0.2 veces su resistencia (785.38 kg/cm²). Así mismo la verificación por métodos analíticos para el porcentaje de variación de la resistencia a compresión de las probetas cilíndricas analizadas aumentan en la medida que el número de capas de refuerzo.
3. Para los ensayos en vigas se puede concluir que las que fueron tratadas con un chorro de arena tuvieron un aumento en su resistencia a la compresión de un 1.19 % de 46 MPa a 55MPa comparada con la viga control sin tratamiento; seguido a esto se encuentra el tratamiento de micro perforaciones en la superficie donde se obtuvo un aumento de su resistencia al arranque en un 1.27 % de 2.2 MPa a 2.8 MPa por encima de la muestra de control. Se concluye que el tratamiento de la superficie influye tanto en la resistencia a compresión como a la resistencia de arranque, aportando una mejora en el desempeño del elemento estructural y garantizando la adherencia para el óptimo desempeño del sistema con fibra de carbono, debiendo ser incluido en los protocolos de instalación.
4. Se concluye que mediante los ensayos Pull-Off y ultrasonidos es posible determinar la preparación del soporte óptima en función del tipo de concreto. Siendo los concretos de baja resistencia similares entre sí para las distintas rugosidades de la

superficie del concreto, mientras que los de alta resistencia, trabajan mejor para una superficie A (Lisa), que recibió un tratamiento de lijado, siendo la menos efectiva para una superficie C (Rugosa), que recibió un tratamiento de cepillo desgaste. Entre los ensayos no destructivos que más resaltan en nuestra investigación son los siguientes: los ensayos Pull-off, ultrasonidos, el ensayo de inducción electromagnética de Faraday, el ensayo de termografía por corrientes pulsadas (PEC), el ensayo de termografía por microondas, siendo estos últimos tomados en cuenta de manera internacional pues son estudios que presentan detalles más específicos para la detección de fallas.

RECOMENDACIONES

1. La verificación por métodos analíticos que nos brinda la normativa de la fibra de carbono, ACI 440.2R-17 para la resistencia a compresión de las probetas cilíndricas ensayadas es un valor muy confiable, siempre que se tengan las especificaciones de las propiedades del material CFRP y del comportamiento de la estructura.
2. Para realizar el reforzamiento de los elementos estructurales se deberá hacer un estudio previo, ya sea por geo radar o por pruebas de diamantina, para ver qué elementos necesitan este tratamiento, en caso el refuerzo presente corrosión, necesitamos utilizar otros tipos de epóxico para contrarrestarla, y la cantidad de refuerzo a colocar.
3. Para realizar una correcta adherencia se recomienda tratar con arenado y micro perforaciones a las superficies de los elementos estructurales antes de ser reforzados con el sistema compuesto con polímeros de fibra de carbono. Así mismo recomendándose su inclusión en los protocolos de inspección
4. Cada técnica de ensayo no destructivo tiene un potencial para detectar fallas, y un solo ensayo no podrá permitir un diagnóstico final del estado o daño del material. Por consiguiente, se recomienda combinar varias técnicas de ensayos no destructivos para un mejor diagnóstico de acuerdo al criterio del supervisor considerando que sean de fácil ejecución, ya que los elementos reforzados pueden tener un acceso dificultoso.
5. Se recomienda continuar con esta línea de investigación con mayor incidencia a nivel nacional para que se pueda llegar a normar su uso dentro del Reglamento Nacional de Edificaciones, pues este sistema provee seguridad estructural, un costo reducido, fácil instalación y una buena fase de servicio.

BIBLIOGRAFÍA

- 440, A. C. (2017). *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars.*
- Abdalla, K., Al-Rousan, R., & Lagaros, N. (2019). *Modeling and analysis of optimized rectangular RC columns confined with CFRP composites.*
doi:<http://aulavirtual.urp.edu.pe/bdacademicas/docview/2217688176?accountid=45097>
- Addepiali, S., & Zhao, Y. (2019). *Non-destructive evaluation of localised heat damage occurring in carbon composites using thermography and thermal diffusivity measurement.*
doi:<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.09.040>.
- 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.* Obtenido de Universidad Nacional de San Agustín:
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10565>
- Ahmed, A., Naganathan, S., Nasharuddin, K., Fayyadh, M., & Jamali, S. (2016). *Repair effectiveness of damaged RC beams with eb opening using CFRP and steel plates.* Obtenido de Jordan Journal of Civil Engineering, 10 (2):
<https://aulavirtual.urp.edu.pe/bdacademicas/docview/2051200158?accountid=45097>
- Airbus. (2013). *Composites on the A350 XWB.* Obtenido de <https://youtu.be/JvCsnXqkGG8>
- Aire Untiveros, C. (2002). *Estudio experimental del comportamiento del hormigón confinado sometido a compresión.* Obtenido de UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA: <http://hdl.handle.net/10803/6168>
- Al Azzawi, M., Hopkins, P., Ross, J., Mullins, G., & Sen, R. (2018). *Carbon fiber-reinforced polymer concrete masonry unit bond after 20 years of outdoor exposure.*
doi:<http://dx.doi.org/10.14359/51>
- Alegre Gago, G. (2017). *Estudio experimental del comportamiento a compresión de probetas de hormigón de resistencias bajas y medias confinadas con tejidos de fibras de carbono y con defectos muy importantes de ejecución.* Obtenido de Universidad Católica del Perú:
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=114585>
- Alegría, N. (Octubre de 2016). *Refuerzo de estructuras de concreto.* Obtenido de SIKA PERÚ S.A. / TM REFURBISHMENT / STRUCTURAL STRENGTHENING:
<https://per.sika.com/es/serp.html?q=INTRODUCCI%C3%93N+AL+REFUERZO+MEDIANTE+CFRP&box=Top>
- Aljazeera, Z., Alghazali, H., & Myers, J. (2020). *Effectiveness of using carbon fiber grid system in reinforced two-way concrete slab system.* doi:<http://dx.doi.org/10.14359/51720198>
- Alotaibi, N., Shekarchi, W., Ghamnoum, W., & Jirsa, J. (2020). *Shear Design of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Shear with Anchored Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Strips.* Obtenido de International Concrete Abstracts Portal:
<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&i=51721315>
- Al-Rousan, R., & Al-Saraireh, S. (2020). *Impact of anchored holes technique on behavior of reinforced concrete beams strengthened with different CFRP sheet lengths and widths.*

- Case Studies in Construction Materials*, 405. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509520300772>
- Amaireh, L., & Al-Tamimi, A. (2020). Optimum Configuration of CFRP Composites for Strengthening of Reinforced Concrete Beams Considering the Contact Constraint. *Procedia Manufacturing*, 350-357. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920308714>
- Amir, H. (2018). *Investigation of the effect of CFRP strengthening on the behavior of deficient steel members under combined lateral and torsional loading*. doi:<http://aulavirtual.urp.edu.pe/bdacademicas/docview/2127775219?accountid=45097>
- Automotriz cART's Arte. (2020). *Oro negro | ¿QUE ES LA FIBRA DE CARBONO?* Obtenido de <https://youtu.be/iuFr15Ie29Q>
- Baca Escobar, W. (2016). Diseño de estructuras de concreto reforzadas con fibra de carbono. *Top Consult Perú*, 166-172. Obtenido de https://www.topconsult.com.pe/articulos/Fibra_carbono_Peru_-_Diseno_estructuras_concreto_reforzadas_fibra_carbono.pdf
- Baca Escobar, W., & Espinoza Anaya, E. (2016). Comportamiento de vigas de concreto reforzadas con fibras de carbono en ensayos a escala natural. *Top Consult Perú*, 1-21. Obtenido de <https://www.topconsult.com.pe/index.php/2016-01-14-21-57-36/308-comportamiento-de-vigas-de-concreto-reforzadas-con-fibras-de-carbono-en-ensayos-a-escala-natural>
- BASF Construction Chemicals Latin America. (2006). Sistemas compuestos de reforzamiento MBrace. *BASF - The Chemical Company*, 1-8. Obtenido de <https://es.slideshare.net/revitalizate/11-sistema-m-brace-basf-0906>
- Belarbi, A., Reda, M., Poudel, P., Tahsiri, H., Dawood, M., & Gencturk, B. (2018). *Prestressing concrete with CFRP composites for sustainability and corrosion-free application*. doi:<http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201814901010>
- Beltran Rivero, A. (2011). *Uso de fibras de carbono como reforzamiento a flexión en vigas de concreto reforzado*. Obtenido de UNIVERSIDAD DE LA SALLE: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/229/
- Bernal, S. e. (2009). Morteros geopoliméricos reforzados con fibras de carbono basados en un sistema binario de un subproducto industrial. *Lat. Metal Master S*, 587-592. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/51532656/MORTEROS_GEOPOLIMERICOS_REFORZADOS_CON_F20170127-6726-58scfp.pdf?1485554485=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMorteros_Geopolimericos_Reforzados_Con_F.pdf&Expires=1604886346&Signature=BCbyKTD
- Bonett Díaz, R. L. (2003). *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación de entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*. Obtenido de Universidad Politécnica de Cataluña: <https://pdfs.semanticscholar.org/b2ff/553e7cba6edcd572eff2ba96c3be98e2c2c1.pdf>
- Calla Deza, L. N. (2018). *Universidad Católica de Santa María*. Obtenido de <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/7111>
- Calvet Rodríguez, V. (2014). *Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón*. Obtenido de

- Castro Zavaleta, C. (2019). *Reforzamiento estructural con fibra de carbono como alternativa económica para aumentar la resistencia a la compresión de las columnas en la galería comercial Fullmarket en el 2019*. Obtenido de UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/22464?show=full>
- Chapple C., P. (2010). Hormigón: Las técnicas precisas. *Recuperación Estructural*, 26-34. Obtenido de https://issuu.com/revista_bit/docs/bit-73-julio-2010
- Chavarry Vallejos, C; Chavarría Reyes, L; Valencia Gutiérrez, A; Pereyra Salardi, E; Arieta Padilla, J; Rengifo Salazar, C. (2020). Hormigón reforzado con vidrio molido para controlar grietas y fisuras por contracción plástica. *Pro Sciences*, 4(31),31-41.
- Concrelab. (2020). *Ensayo de adherencia Pull Off*. Obtenido de <https://www.concrelab.com/pulloff/>
- Crawford, K. (2016). *NDT evaluation of long- term bond durability of CFRP-structural systems applied to RC highway bridges*. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s40091-016-0120-2>
- Crawford, K. C. (2016). *NDT evaluation of long-term bond durability of CFRP-structural systems applied to RC highway bridges*. Tehran: Springer Nature B.V. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s40091-016-0120-2>
- Cutti Huallpa, K. (2015). *Análisis experimental del uso de las fibras de carbono para el reforzamiento en una viga peraltada de concreto armado para una edificación en la ciudad de Lircay-Angaraes-Huancavelica*. Obtenido de UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCABELICA: <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/265>
- Damnoo, D., & Kumar, S. (2016). *Experimental study on post repair performance of reinforced concrete beams rehabilitated and strengthened with CFRP sheets*. doi:<http://dx.doi.org/10.5958/2321-581X.2016.00022.2>
- Dirven , B. B., Pérez, R., Cáceres, R. J., Tito, A. T., Gómez , R. K., & Ticona, A. (2018). *El desarrollo rural establecido en las áreas Vulnerables*. Lima: Colección Racso.
- Discovery, C. (2019). *Así se construye*. Obtenido de <https://youtu.be/x1laMABbmIE>
- Douglas Gregory, A. (2011). *Evaluating the long-term durability of fiber reinforced polymers via field assessments of reinforced concrete structures*. Obtenido de COLORADO STATE UNIVERSITY: <https://search.proquest.com/docview/916240134/2B0C8234E56F408FPQ/6?accountid=45097>
- Duchene, P., Ayadi, A., & Krawczak, P. (2018). *A review of non-destructive techniques used for mechanical damage assessment in polymer composites*. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s10853-018-2045-6>
- Duque, A., Amazo, I., & Ruiz, D. (2011). Ensayos de resistencia de pórticos de concreto a escala, reforzados con CFRP en los nudos. *con-ciencias*, 83-93. Obtenido de <http://aulavirtual.urp.edu.pe/bdacademicas/docview/1867929601?accountid=45097>
- Ekanayake, S., & Gurram, S. (2018). *Depth determination of defects in CFRP-structures using lock-in therography*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.032>

- Elizondo Lozano, D. (2014). *UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN*. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/4141/>
- Estrada Santos, M., & Yoplac Carhuatanta, J. (2019). *Evaluación técnica y económica de reforzamiento estructural en vigas de concreto armado con fibras de carbono en el edificio multifamiliar Huaraz Breña - Lima 2019*. Obtenido de UNIVERSIDAD RICARDO PALMA: <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2645>
- Fernández, V., Barrios Padura, Á., & Molina Huelva, M. (2018). APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS PULL-OFF Y ULTRASONIDOS EN EL CONTROL DE CALIDAD DEL REFUERZO CON MATERIALES COMPUESTOS EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina; Bogotá*. Obtenido de <http://aulavirtual.urp.edu.pe/bdacademicas/docview/1957088568?accountid=45097>
- FIB. (2019). *Externally applied FRP reinforcement for concrete structures*. Technical report. Obtenido de <https://www.fib-international.org/publications/fib-bulletins/externally-applied-frp-reinforcement-for-concrete-structures-detail.html>
- Flores Tantaleán, L. (2016). Reforzando Edificaciones con fibra de carbono. *Top Consult Perú*, 1-6. Obtenido de http://www.topconsult.com.pe/articulos/Reforzando_edificaciones_con_Fibra%20de%20Carbono_-_Top_Consult_PERU_-_Luis_Flores.pdf
- Fujikake, K., Soeum, S., & Matsui, T. (2017). CFRP strengthened RC beams subjected to impact loading. *Procedia Engineering*, 173-181. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817360575>
- Heuer, H., & Schulze, M. (2015). *Review on quality assurance along the CFRP value chain e Nondestructive testing of fabrics preforms and CFRP by FG radio wave techniques*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.022>.
- Ishikawa, T., Kawano, H., Nagao, T., & Kobayashi, A. (2016). Thermal stress measurement in steel plate strengthened by CFRP and aluminum alloy plates. *International Journal of Steel Structures*, 1175-1185. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s13296-016-0055-2>
- Jahami, A., Temsah, Y., & Khatib, J. (2019). *The efficiency of using CFRP as a strengthening technique for reinforced concrete beam subjected to blast loading*. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s40091-019-00242-w>
- Jia, P., Dong, J., Yuan, S., & Wang, Q. (2018). *Experimental study of post-heated steel reinforced recycled concrete columns repaired with CFRP*. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s11595-018-1911-z>
- Katogi, H., & Takemura, K. (2016). Flexural Property and In Situ Observation of Carbon Milled Fiber Added. *Key Engineering Materials*, 57-60. doi:<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.665.57>
- Kim, Y., & Al-Kubaisi, A. (2018). *Carbon fiber-reinforced polymer-strengthened reinforced concrete beams subjected to differential settlement*. doi:<http://dx.doi.org/10.14359/51700986>
- Korayem, A. H., Liu, Y. M., Zhao, X. L., & Duan, W. H. (2015). *Bond Characterization of Steel-CFRP with Carbon Nanotube Modified Epoxy Adhesive via Pull-off Tests*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte., Ltd. doi:<http://dx.doi.org/10.1142/S0219455415400271>

- Kupski, J., & Zarouchas, D. (2020). Thin-ply in adhesively bonded carbon fiber reinforced polymers.
- La Torre, G., & Tupac Yupanqui, S. (2019). *Evaluación y diseño de dos propuestas de reforzamiento para vigas y columnas de concreto armado en una edificación de hotel*. Obtenido de UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/628230>
- Li, Z., & Meng, Z. (2016). *A review of the radio frequency non-destructive testing for carbon-fiber composites*. doi:<http://dx.doi.org/10.1515/msr-2016-0010>
- Lisantonio, A., & Pinang, P. (2018). *Axial and flexural strength of square RC columns with non-rounded corners wrapped with CFRP under eccentric loading*. Obtenido de Jordan Journal of Civil Engineering, 12 (1): <http://aulavirtual.urp.edu.pe/bdacademicas/docview/2206320615?accountid=45097>
- Liu, Y., & Fan, Y. (2019). *Experimental study on flexural behavior of prestressed concrete beams reinforced by CFRP under chloride environment*. Obtenido de Advances in Civil Engineering: <http://dx.doi.org/10.1155/2019/2424518>
- Lupasteanu, V., Tăranu, N., & Ungureanu, D. (2018). *Failure particularities of adhesively bonded joints between steel and carbon fiber reinforced polymers composite elements*. Obtenido de Buletinul Institutului Potehnic Din Lasi Sectia Constructii, Arhitectura, 64 (1), 63-72: <http://aulavirtual.urp.edu.pe/bdacademicas/docview/2051200158?accountid=45097>
- Manrique Siles, D., & Paucar Berrocal, M. (2019). *Uso de fibra de carbono en reforzamiento de estructuras de edificaciones, centro empresarial Camino Real, San Isidro*. Obtenido de UNIVERSIDAD RICARDO PALMA: <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2637>
- Maxineasa, S., Tarami, N., Bejan, L., Isopescu, D., & Banu, O. (2015). *Environmental impact of carbon fiber-reinforced polymer flexural strengthening solutions of reinforced concrete beams*. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s11367-015-0940-5>
- Md, N., Noor, M., & Siti Norfahanim, A. (2019). *Acoustic emission signals of pull-off test for concrete slab strengthened with CFRP using various surface preparations*. doi:<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.821.479>
- Mohsen, I., Thilan, O., & Nathan, W. (2014). Durability of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Sheets. *Concrete International*, 43-48,63. Obtenido de <http://aulavirtual.urp.edu.pe/bdacademicas/docview/1625899906?accountid=45097>
- Moncayo Theurer, M., & Rodriguez, J. (2016). Las fibras de carbono como una alternativa de reforzamiento. *redalyc.org*, 57-62. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750927006.pdf>
- Mugahed, Y., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., Alaskar, A., & Alrshoudi, F. (2020). Properties and water penetration of structural concrete wrapped with CFRP. *Results in Engineering*, 1-13. doi:<https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2019.100094>
- Ottazzi Pasino, G. A. (2004). *Diseño en Concreto Armado*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de https://www.academia.edu/8091903/OTTAZZI_PASINO_GIANFRANCO_MATERIA_L_ENSE%3%91ANZA_CONCRETO_ARMADO_1_?auto=download

- Paez Cornejo, D. (2017). *Análisis comparativo de estructuras con y sin reforzamiento (FRP)*. Obtenido de Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí: https://www.researchgate.net/publication/321894566_Analisis_comparativo_de_estructuras_con_y_sin_reforzamiento_FRP
- Petruska, O., Zajac, J., Molnar, V., Fedorko, G., & Tkac, J. (2019). *The effect of the carbon fiber content on the flexural strength of polymer concrete testing samples and the comparison of polymer concrete and U-shaped steel profile damping*. doi:<http://dx.doi.org/10.3390/ma12121917>
- Piñero, D. J. (2016). *Estudio experimental del comportamiento a compresión de probetas de hormigón de resistencias bajas y medias confinadas con tejidos de fibras de carbono y con defectos muy importantes de ejecución*. Obtenido de UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE ESPAÑA: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=114585>
- Raouf, S., Koutas, L., & Bournas, D. (2017). Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams. *Construction and Building Materials*, 279-291. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181730908X>
- Rescalvo Fernández, F. (2014). *Refuerzos de fibra de carbono para rehabilitación de vigas de madera. Modelos analíticos, ensayos experimentales y puesta en obra*. Obtenido de UNIVERSIDAD DE GRANADA: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=150991>
- Rosenboom, O. A. (2006). *Behavior of FRP repair/strengthening systems for prestressed concrete*. Obtenido de UNIVERSIDAD ESTATAL DE CAROLINA DEL NORTE: <https://search.proquest.com/docview/305299701/abstract/82B4F4572D084E96PQ/1?acountid=45097>
- Sagil, J., & Sonate, A. (2018). Experimental study on micromachining of CFRP/Ti stacks using micro ultrasonic machining process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1539-1547. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-1298-6>
- SCI. (2020). *ENSAYO DE ULTRASONIDO: ¿PARA QUÉ SIRVE?* Obtenido de <https://scisa.es/ensayo-de-ultrasonido/>
- Silva Vera, P. (2016). *Refuerzo estructural con fibra de carbono*. Obtenido de UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/5412>
- Sun, W., Jirsa, J., & Ghannoum, W. (2016). Behavior of Anchored Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strips Used for Strengthening Concrete Structures. *ACI MATERIALS JOURNAL*, 163-172. doi:<http://dx.doi.org/10.14359/51688637>
- Syed Mohamad Syahir, S., Abdullah, S., Shahidan, S., & Siti Rahimah, M. (2017). *Failure behaviour of concrete prisms strengthened by various bond widths of carbon fibre reinforced polymer (CFRP)*. Obtenido de EDP Sciences: [:http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201710302015](http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201710302015)
- Taheri, H., & Ahmed, A. (2019). *Nondestructive ultrasonic inspection of composite materials: A Comparative advantage of phased array ultrasonic*. doi:<http://dx.doi.org/10.3390/app9081628>
- Tang, T., & Saadatmanesh, H. (2005). Analytical and Experimental Studies of Fiber-Reinforced Polymer-Strengthened Concrete Beams Under Impact Loading. *ACI Structural Journal*,

139-149. Obtenido de ACI Structural Journal:
<https://search.proquest.com/docview/198207776/fulltextPDF/4C20CB546F6F4671PQ/1?accountid=45097>

- Tatar, J., & Hamilton, R. (2016). *Structural testing and dissection of carbon fiber-reinforced polymer repaired bridge girders taken out of service*.
doi:<http://dx.doi.org/10.14359/51689160>
- Tovar, G. L. (1986). *El asentamiento y la segregación de los Blancos y Mestizos*. Bogotá: Cengage.
- Vega, C., & Torres, N. (2018). External strengthening of unreinforced masonry walls with polymers reinforced with carbon fiber. *Ingeniería e Investigación*, 15-23. Obtenido de <http://aulavirtual.urp.edu.pe/bdacademicas/docview/2243448817?accountid=45097>
- Villanueva, P. (2017). *Influencia de las condiciones de ejecución en la resistencia de anclajes de fibra de carbono para refuerzos de estructuras de hormigón*. Obtenido de Universidad Politécnica de Madrid: http://oa.upm.es/45368/1/Paula_Villanueva_Llaurado.pdf
- Wu, C., Zhao, X. L., & Al-Mahaidi, R. (2013). *MODE I STRESS INTENSITY FACTOR OF CENTER-CRACKED TENSILE STEEL PLATES WITH CFRP REINFORCEMENT*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte., Ltd.
doi:<http://dx.doi.org/10.1142/S0219455413500053>
- Yamamoto, T., Nanba, S., Ebihara, Y., & Nishi, Y. (2010). *Impact Values of Sandwich Structural Composites of Resins Covered with CFRP Sheets*. Japan, Sendai: Japan Science and Technology Agency. Obtenido de <http://aulavirtual.urp.edu.pe/bdacademicas/docview/1437641992?accountid=45097>
- Yasmeen, T. (2018). *The effect of beam design on behaviour of retrofitted beam using CFRP*. Obtenido de *Jordan Journal of Civil Engineering*, 12 (1): <http://aulavirtual.urp.edu.pe/bdacademicas/docview/1993162064?accountid=45097>
- Zhen-yuan, J., Chen, C., Fu-ji, W., Zhang, C., & Wang, Q. (2020). Analytical model for delamination of CFRP during drilling of CFRP/metal stacks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 11-12. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-020-05029-y>
- Zhu, E., & Zhu, Z. (2019). *Effect of curing conditions on bond behavior between carbon fiber-reinforced polymer and concrete*.
doi:<http://aulavirtual.urp.edu.pe/bdacademicas/docview/2324857714?accountid=45097>
- Zhuang, N., Dong, H., Chen, D., & Ma, Y. (2018). *Experimental study of aged and seriously damaged RC beams strengthened using CFRP composites*.
doi:<http://dx.doi.org/10.1155/2018/6260724>

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

| PROBLEMA GENERAL | OBJETIVO GENERAL | HIPÓTESIS GENERAL | VARIABLES | INDICADORES | INSTRUMENTOS | DISEÑO METODOLÓGICO |
|---|---|---|--|--|---|---|
| ¿En qué medida el sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra influye en las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto? | Aplicar el sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra para mejorar las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto | La aplicación del sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra mejora las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto | V.I. SISTEMA COMPUESTO DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA | Resultados de ensayos (compresión, computacionales) Pruebas de adherencia | Normas ASTM C-39: Método de ensayo estándar para compresión de especímenes de cilindro de concreto ACI 440.1R-17: Guía de diseño y construcción sistemas de FRP para el fortalecimiento de estructuras de concreto | El método de investigación es cualitativo ya que se tiene un enfoque exploratorio, inductivo y descriptivo orientado al proceso para el análisis de la investigación. El tipo de la investigación es descriptiva porque especifica las propiedades y características del sistema compuestos de polímeros reforzados con fibra aplicados al concreto. |
| PROBLEMAS ESPECÍFICOS | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | HIPÓTESIS ESPECÍFICAS | | | | |
| ¿En qué medida los resultados en ensayos de laboratorio con el sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra de carbono influyen en las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto? | Analizar los resultados en ensayos de laboratorio con el sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra de carbono para mejorar las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto | Al analizar los resultados en ensayos de laboratorio con el sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra de carbono se mejoran las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto. | | Tratamiento de superficies | Manual de aplicación certificada del sistema TYFO® FYBRWRAP® | El nivel de la investigación es explicativo y exploratoria ya que analiza el sistema compuestos de polímeros reforzados con fibra como una solución de reforzamiento para elementos estructurales de concreto. |
| ¿En qué medida el tratamiento de la superficie influye en las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto? | Determinar el tratamiento de la superficie para mejorar las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto | Al determinar el tratamiento de la superficie se mejora las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto | V.D. ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE CONCRETO | Propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto | NTP-339.034-2008: Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas | El diseño de la investigación es experimental por que se analizan los resultados de laboratorios ya existentes, para luego interpretar los resultados y llegar a una conclusión específica. |
| ¿En qué medida el control del refuerzo mediante ensayos no destructivos influye en las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto? | Analizar el control del refuerzo mediante ensayos no destructivos para mejorar las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto | Al verificar el control del refuerzo mediante ensayos no destructivos se mejora las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto. | | | | |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2: Operacionalización de las variables

| Variables | Clasificación de la variable | Dimensiones | Indicadores | Indices | Unidad de medida | Escala | Instrumento | Herramientas | Items |
|---|------------------------------|---|--------------------------------------|--|-----------------------|--|-----------------------------------|---|--------------------------|
| V.I. SISTEMAS COMPUESTOS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA | Interviente | Instalación del sistema | Resultados de ensayos en laboratorio | Ensayos a compresión / computacionales | kg/cm ² | Cuantitativa Continua | Guías Manuales Fichas técnicas | Normas ASTM C-39: Método de ensayo estándar para compresión de especímenes de cilindro de concreto | Indicado en los formatos |
| | Continua | | | | | | | | |
| | Ordinal | Pruebas de adherencia | Ensayo de Pull off | N/mm ² | Cuantitativa Continua | ACI 440.1R-15 Guía de diseño y construcción sistemas de FRP para el fortalecimiento de estructuras de concreto | | | |
| | Dependiente | | Ensayo de ultrasonido | μs | | | | | |
| V.D. ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE CONCRETO | Discreta | Resistencia del concreto | Tratamiento de superficies | Chorro de arena a presión | l/cm ² | Cuantitativa Continua | Formato de Laboratorio | Manual de aplicación certificada del sistema TYFO® FYBRWRAP® | |
| | Ordinal | | | Micro perforaciones | und | | | | |
| | Ordinal | Desempeño mecánico de los elementos estructurales de concreto | Ensayo de compresión | N/mm ² | Cuantitativa Continua | Norma E0.60 ASTM 400.037 fichas técnicas NTP 339.034 2008 | | | |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3: M1 - Selección documental: Referencias - Resúmenes - Subtemas identificados (Artículos)

| # | TÍTULO | RESUMEN | IDEAS PRINCIPALES | SUBTEMAS (Indicadores) | CONCLUSIONES | REVISTA | AÑO |
|---|--|---|---|---|--|---|------|
| 1 | Pressing concrete with CFRP composites for sustainability and corrosion-free applications. (Pretensado de hormigón con compuestos de CFRP para aplicaciones sostenibles y libres de corrosión) | Las vigas pretensadas con CFRP pueden presentar fallas por rotura de los tendones antes del apilamiento del hormigón, mientras que el diseño de flexión de las vigas de acero pretensado siempre se define por apilamiento del hormigón independientemente de la relación de refuerzo. El comportamiento de flexión de las vigas pretensadas de CFRP con tendones adheridos ha sido ampliamente estudiado en el pasado. Los resultados de las pruebas indican consistentemente que, si bien el comportamiento de las vigas de hormigón pretensado con CFRP y de acero pretensado es similar en muchos aspectos, hay varias diferencias importantes que deben tenerse en cuenta. Estas diferencias se deben principalmente a la naturaleza lineal-elástica del refuerzo CFRP. Por otro lado, el comportamiento a la flexión de las vigas postesadas con tendones de CFRP no adheridos ha sido menos estudiado en comparación con las vigas pretensadas unidas con tendones de CFRP. La falla de las vigas postesadas no adheridas generalmente se atribuye al apilamiento del concreto. El hecho de que los cables no estén adheridos provoca la liberación de tensiones en las secciones críticas y la promedia a lo largo del tendón, por lo que la carga en el tendón será menor que su contraparte adherida. Por lo tanto, la resistencia final de las muestras adheridas es mayor que la de las muestras no adheridas independientemente del tipo de tendón. | Fallas en vigas pretensadas reforzadas con polímeros reforzados con fibra de carbono. | Control de los procesos de la instalación del sistema compuesto de polímeros Desempeño mecánico de los elementos estructurales | Los resultados preliminares de las pruebas experimentales mostraron que las vigas pretensadas de CFRP muestran suficiente advertencia antes de fallar. Además, la deformabilidad de las vigas postesadas con cables CFRP pretensados no adheridos es superior a la de las otras vigas pretensadas CFRP. Sin embargo, la resistencia final fue menor que todas las otras vigas unidas. | Les Ulic: EDP Sciences. | 2018 |
| 2 | The efficiency of using CFRP as a strengthening technique for reinforced concrete beams subjected to blast loading (La eficacia de utilizar CFRP como técnica de refuerzo para vigas de hormigón armado sometidas a cargas explosivas) | Algunas estructuras pueden estar sujetas a cargas explosivas mientras están en servicio. Esto puede causar daños o fallas en los elementos estructurales. Este artículo examina el rendimiento de vigas de hormigón armado que utilizan polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) cuando se someten a cargas explosivas. Los datos experimentales, incluidos el daño y la deflexión, se recopilaron de una investigación previa y luego se realizó un análisis numérico utilizando el software ABAQUS. Además, se utilizó el modelo de grado único de libertad (SDOF) para complementar los hallazgos del análisis numérico. Siguiendo la buena correlación entre los datos experimentales y numéricos, se realizaron análisis adicionales en vigas de hormigón armado reforzadas con polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP). Se descubrió que el uso de CFRP mejora la capacidad de carga y la absorción de energía y reduce la deflexión central. | Elementos de hormigón armado reforzados con polímeros reforzados con fibra de carbono sometidos a daños y fallas por cargas explosivas. | Control de los procesos de la instalación del sistema compuesto de polímeros Desempeño mecánico de los elementos estructurales | Una viga de hormigón armado es capaz de resistir cargas de explosión más altas en presencia de CFRP. El refuerzo de la viga con cuatro capas con CFRP puede aumentar la masa de TNT en un 50% para causar el mismo daño en comparación con una viga sin CFRP. Es posible formar la curva de Iso-Daño para cualquier elemento estructural usando el Programa de Elementos Finitos como ABAQUS. Esto se puede lograr usando varias combinaciones de masa TNT y distancia de separación para obtener los valores equivalentes de presión e impulso. El uso de CFRP redujo la extensión del daño de las vigas de hormigón armado cuando se sometieron a cargas de explosión. A medida que aumentaba el número de capas de CFRP, como lo demuestra la deflexión en la mitad del tramo. La deflexión de la mitad del tramo para vigas con 4 capas de CFRP es un 30% menor que la de una viga sin CFRP. Sin embargo, el uso de más de 2 capas no reduce aún más la deflexión. El uso de láminas de CFRP en vigas de hormigón armado aumentó la energía absorbida de la viga. Una mayor energía de absorción se asocia con un número reducido y propagación de grietas. | International Journal of Advanced Structural Engineering. | 2019 |
| 3 | Effect of curing conditions on bond behavior between carbon fiber-reinforced polymer and concrete (Efecto de las condiciones de curado sobre el comportamiento de la unión entre el polímero reforzado con fibra de carbono y el concreto) | Se probaron un total de 16 muestras de extracción para investigar el efecto de las condiciones de curado sobre el comportamiento de unión del concreto reforzado con polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) montado cerca de la superficie (NSM) bajo temperaturas de curado de 35 a 65 ° C (95 a 149 ° F) y tiempos de curado de 6 a 12 horas. Se comparó con el de las muestras en condiciones ambientales (16 ° C [60,8 ° F]). Sobre estas bases, se propuso un modelo de deslizamiento de enlace local no lineal. Se emplean dos parámetros clave, A y B, en el modelo de adherencia-deslizamiento propuesto, cuyas expresiones específicas se relacionan principalmente con la carga máxima de extracción y el esfuerzo cortante pico de la muestra. Los resultados muestran que el comportamiento de unión de la tira de CFRP representa una curva cuadrática negativa con temperatura de curado y curvas tangentes inversas positivas con tiempo de curado, respectivamente. | Ensayos para investigar el efecto de las temperaturas sobre el fraguado en los polímeros reforzados con fibra de carbono en diferentes condiciones ambientales. | Control de los procesos de la instalación del sistema compuesto de polímeros Desempeño mecánico de los elementos estructurales | Los resultados muestran que las condiciones de curado de los materiales adhesivos tienen un gran influencia en el comportamiento de adherencia del sistema NSM CFRP. Cuando el tiempo de curado era constante en 12 horas, la resina epoxi se curado completamente y la deformación axial se distribuyó uniformemente a lo largo del longitud efectiva de la tira en el rango de temperatura de 50 a 65 ° C (122 hasta 149 ° F). Cuando la temperatura de curado era constante a 50 ° C (122 ° F), la curva de deformación fue más moderada con la extensión del tiempo de curado, y la tendencia de desarrollo lineal fue más obvia. | ACTI Materials Journal. | 2019 |
| 4 | Carbon fiber-reinforced polymer-strengthened reinforced concrete beams subjected to differential settlement. (Vigas de hormigón armado reforzadas con polímeros reforzadas con fibra de carbono sometidas a asentamiento diferencial) | Este artículo presenta el comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas con composites de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) sometidas a asentamiento diferencial. Se probaron dos tipos de esquemas de refuerzo, CFRP adherido externamente (EB) y montado cerca de la superficie (NSM) con varias condiciones de soporte, y su desempeño se comparó con el de sus contrapartes no fortalecidas. Las propiedades de los suelos se identifican mediante el análisis de límites y las relaciones carga-asentamiento, incluida la distribución de granos y los módulos de reacción de la subrasante con condiciones drenadas y no drenadas. Las características de disipación de energía y respuesta post-fluencia de las vigas están influenciadas por el asentamiento diferencial. La ductilidad de las vigas reforzadas es menos susceptible al asentamiento en comparación con las no reforzadas. Independientemente de las condiciones de soporte, las vigas NSM exhiben mayor ductilidad que las vigas EB. El desarrollo de curvatura a lo largo del tramo de carga está relacionado con la extensión del asentamiento diferencial, que está asociado con la ocurrencia de modos de falla y desunión de CFRP. Los requisitos funcionales para las vigas reforzadas se evalúan en función de los límites de distorsión angular. Los mecanismos de redistribución de momentos inducidos por el asentamiento diferencial se elaboran mediante modelos analíticos junto con investigaciones paramétricas. | Comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas con polímeros reforzados con fibra de carbono sometidos a asentamientos. | Control de los procesos de la instalación del sistema compuesto de polímeros Desempeño mecánico de los elementos estructurales | La ductilidad de las vigas probadas disminuyó después del fortalecimiento de CFRP. La variación de ductilidad en las vigas reforzadas no fue tan susceptible al asentamiento diferencial como el caso de las vigas no reforzadas. Las vigas NSM demostraron una mayor ductilidad que las vigas EB, independientemente de la condición del soporte. El refuerzo de CFRP aumentó el momento negativo de las vigas cuando se sometieron a asentamiento diferencial, debido a que el momento positivo de las vigas reforzadas se redistribuyó al momento negativo. Con un aumento de la resistencia del hormigón, el momento final fijo de las vigas reforzadas empeoró debido al mecanismo de redistribución. La cantidad de agua dentro de los estratos del suelo controló el módulo de reacción de la subrasante, lo que influyó en la extensión del asentamiento. El desplazamiento posterior a la fluencia disponible de las vigas no reforzadas hasta la falla se redujo por la ocurrencia de asentamiento diferencial en comparación con el desplazamiento de la viga probada en soportes rígidos. No obstante, los haces asentados mostraron una mayor disipación de energía que el haz rígido. Las condiciones de apoyo también afectaron las características de disipación de energía de las vigas reforzadas. | ACTI Structural Journal. | 2018 |
| 5 | A review of non-destructive techniques used for mechanical damage assessment in polymer composites (Una revisión de las técnicas no destructivas utilizadas para la evaluación de daños mecánicos en compuestos poliméricos) | En la presente revisión, los autores arrojan más luz sobre la capacidad de diferentes técnicas de END para detectar la evolución del daño mecánico en el material. Este artículo se centra principalmente en resinas epoxi termoendurecibles reforzadas con fibras de carbono o vidrio, como se informa en la mayoría de las referencias proporcionadas. Los límites de cada técnica para proporcionar los parámetros de daño requeridos se discutieron principalmente en términos de detección y caracterización de mecanismos a una escala de longitud adecuada. Todas las técnicas presentadas se agregan para resaltar cuándo son más adecuadas para detectar daños mecánicos. Por otro lado, permiten la detección de mecanismos de daño microestructural como el agrietamiento de la matriz, la rotura de la fibra o el desprendimiento. En este contexto, el monitoreo de daños se refiere a eventos microestructurales como el agrietamiento de la matriz y la rotura de la fibra o macro eventos como la delaminación. | Diferentes técnicas de ensayos no destructivos para detectar la evolución de daño microestructural como agrietamientos, rotura de fibra, etc. | Control de los procesos de la instalación del sistema compuesto de polímeros Relación epóxico/fibra | Debido a la complejidad del daño mecánico de los materiales compuestos, que es interno, de escalas múltiples, heterogéneo y anisotrópico, existe una clara necesidad de trabajo adicional sustancial para inspeccionar y caracterizar estos materiales, con el fin de monitorear la salud estructural y prevenir fallas de estructuras industriales. Ninguno de los métodos NDT es capaz únicamente de inspeccionar todos los defectos estructurales en materiales compuestos, especialmente en piezas industriales complejas. También está claro que algunas técnicas tienen una aplicación limitada en conjunto. Se puede esperar un diagnóstico completo de la salud estructural, al menos más confiable y más preciso, combinando simultáneamente múltiples técnicas NDT adecuadas. Este enfoque de múltiples técnicas permitirá la validación o la completitud del diagnóstico mediante la explotación de la redundancia o complementariedad de los datos obtenidos, respectivamente. | Journal of Materials Science. | 2018 |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4: M1 - Selección documental: Referencias - Resúmenes - Subtemas identificados (Tesis)

| # | TÍTULO | RESUMEN | IDEAS PRINCIPALES | SUBTEMAS | CONCLUSIONES | REVISTA | AÑO |
|---|---|---|--|--|--|----------------|------|
| 1 | Estudio experimental del comportamiento a compresión de probetas de hormigón de resistencias bajas y medias confinadas con tejidos de fibras de carbono y con defectos muy importantes de ejecución | Estudiar el comportamiento elástico e inelástico de vigas de concreto armado reforzadas con fibras de carbono sometidas a flexión. Para lo cual se analizarán vigas de concreto armado reforzadas con acero y con fibras de carbono (CFRP), empleando diferentes cuantías de cada una. | . Se realizará el análisis comparativo para determinar las ventajas y desventajas del uso de este método de reforzamiento. Una vez obtenido los datos del análisis se hizo una comparación con los datos del proyecto original el cual se encontró deficiencias en este, el reforzamiento de la estructura se realizó de acuerdo a las consideraciones de la Norma ACI 440.2R-08, con la utilización de la fibra de carbono tecnología usada en otros países con gran éxito | Control de procesos Desempeño mecánico de los elementos de concreto | Finalmente se presentarán las principales conclusiones y recomendaciones obtenidas del análisis empleado, brindando las consideraciones básicas para el uso de CFRP como reforzamiento de elementos estructurales. | TESIS DOCTORAL | 2018 |
| 2 | Evaluación y Reparación Estructural con Fibra de Carbono de la Superestructura del Puente la Capilla - Moquegua | En la superestructura del puente, La Capilla – Moquegua, Se realizó la patología del puente La Capilla teniendo como diagnostico final, fallas con repercusiones estructurales en la superestructura, se hizo el análisis con la norma vigente de manera analógica y se verificó los resultados con el programa de análisis y diseño de puente CsiBridge. | Posterior al diseño, se realizó la evaluación técnico-económica, proponiendo un plan de ejecución (cronograma) acorde con las características y contexto del proyecto, y un presupuesto económico para cada caso | Desempeño mecánico de los elementos de concreto | Finalmente, con la utilización de la fibra de carbono se pudo verificar que el reforzamiento a flexión y corte con fibra de carbono FRP es una alternativa muy eficiente y fácil de instalar, resultando económico con respecto a otras alternativas de reforzamiento. | TESIS | 2018 |
| 3 | Evaluación y diseño de dos propuestas de reforzamiento para vigas y columnas de concreto armado en una edificación de hotel | En la evaluación técnico-económica de dos tipos de reforzamiento estructurales, tales como el polímero reforzado con fibra de carbono y el encamisado de concreto reforzado en los elementos estructurales de vigas y columnas. Con el objetivo de determinar la alternativa de solución óptima, teniendo en cuenta que la opción de encamisado de concreto reforzado es comúnmente la más empleada en el sector | El reforzamiento con fibra de carbono en muestras cilíndricas de concreto ensayados en laboratorio y su posterior verificación con la norma ACI 440 2R 17, demostró que mediante su aplicación se eleva la resistencia de las columnas, se reduce el uso de materiales, no requiere de grandes espacios para el almacenamiento de material y la generación de desperdicios o material de desmonte es reducido | Control de procesos | Finalmente, mediante un análisis comparativo que contrasta ambos criterios, se concluye la alternativa de reforzamiento óptima para la edificación de hotel analizada es el CFRP. | TESIS | 2019 |
| 4 | Reforzamiento estructural con fibra de carbono como alternativa económica para aumentar la resistencia a la compresión de las columnas en la galería comercial Fullmarket en el 2019 | El reforzamiento de las columnas con fibra de carbono adherido externamente con un adhesivo epóxico aumenta su resistencia a compresión. Los estudios realizados a este material revelan que es entre 7 a 10 veces más resistente a la tracción que el acero grado 60. Asimismo, pruebas realizadas en el laboratorio con muestras cilíndricas de concreto reforzadas con fibra de carbono demostraron el aumento de resistencia a compresión del concreto. | Se reconoció las características y los beneficios del empleo de las fibras de carbono en las vigas de concreto armado y el aumento de capacidad que estas adquieren al cumplir los requerimientos y especificaciones del proyecto, teniendo resultados muy favorables tanto en la fase de servicio como en la instalación. | Control de procesos Desempeño mecánico de los elementos estructurales | Finalmente, se concluye que la investigación cumplió su cometido al incrementar la resistencia de las columnas de la galería Fullmarket. | TESIS | 2019 |
| 5 | Evaluación técnica y económica de reforzamiento estructural en vigas de concreto armado con fibras de carbono en el edificio multifamiliar Huaraz Breña - Lima 2019 | La presente tesis tuvo como objetivo realizar la evaluación técnica y económica de reforzamiento estructural en el Edificio Multifamiliar Huaraz en el distrito de Breña, dando a conocer la viabilidad para el reforzamiento estructural del proyecto frente a las patologías que se presentaron especialmente en las vigas de concreto armado. | | Control de procesos Evaluación socio-económica | los resultados de esta tesis se confirmó la importancia de realizar una correcta evaluación estructural dando a conocer a las fibras de carbono como la mejor alternativa de reforzamiento estructural en vigas de concreto armado en el Edificio Multifamiliar Huaraz, además obteniendo con ellas la mejor propuesta económica de reforzamiento moderno en comparación con lo convencional (encamisado de vigas) cuidando los intereses del cliente sin alterar el bien inicial. | TESIS | 2019 |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5: M2 - Subtemas – Justificación – Objetivos específicos

| SUBTEMAS (Indicadores) | Definición / Justificación del subtema/ delimitación temporal (si aplica) | Objetivo |
|---|--|--|
| Control de los procesos de la instalación del sistema compuesto de polímeros | Consiste en aplicar la calidad al proceso de instalación de un producto , es de suma importancia garantizar un correcto control de instalación para asegurar el funcionamiento óptimo del sistema . | Verificar el correcto control de los procesos de la instalación del sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra de carbono para mejorar las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de concreto. |
| Relación epóxico/fibra | Describe la estrecha relación entre la cantidad de epóxico y el material a adherir , ya que teniendo el compuesto A y compuesto B se debe buscar la relación de acuerdo al metrado , tipo de elemento ,temperatura y exposición. | Determinar la adecuada relación epóxico/fibra para asegurar el correcto desempeño mecánico del sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra de carbono |
| Pruebas de adherencia | Las pruebas de adherencia después de la aplicación del revestimiento, cuantifica la resistencia de la unión entre la fibra y el elemento estructural a reforzar mejorando las propiedades mecánicas ,garantizar una correcta adherencia evitará patologías de falla propias de adherir 2 elementos. | Analizar el correcto control de la adherencia del refuerzo mediante ensayos no destructivos del sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra de carbono para mejorar el desempeño mecánico de los elementos estructurales de concreto |
| Desempeño mecánico de los elementos estructurales de concreto | El comportamiento de un elemento estructural esta dado por su resistencia a la flexión ,compresión , tracción , con los años de vida del elemento y dados a diferentes factores de errores constructivos o factores externos por el paso del tiempo presentan desgastes y se requieren de reforzamientos y reparaciones para un funcionamiento óptimo. | Analizar los resultados de ensayos en probetas con el sistema compuesto de polímeros reforzados con fibra de carbono para mejorar el desempeño mecánico de los elementos estructurales de concreto. |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 6: M3 – Síntesis por Subtema

| Fuente | Autor(es) | Título | SUBTEMAS (Indicadores) 1 Control de los procesos de la instalación del sistema compuesto de polímeros | SUBTEMAS (Indicadores) 2 Relación epóxico/fibra | SUBTEMAS (Indicadores) 3 Pruebas de adherencia | SUBTEMAS (Indicadores) 4 Desempeño mecánico de los elementos estructurales de concreto |
|--------|---|---|---|---|---|---|
| 5 | Duchene, P., Chaki, S., Ayadi, A., & Krawczak, P | A review of non-destructive techniques used for mechanical damage assessment in polymer composites | Se arrojan más luces sobre la capacidad de diferentes técnicas de END para detectar la evolución del daño mecánico en el material. | Este artículo se centra principalmente en resinas epoxi termoendurecibles reforzadas con fibras de carbono o vidrio, como se informa en la mayoría de las referencias proporcionadas. Los límites de cada técnica para proporcionar los parámetros de daño requeridos se discutieron principalmente en términos de detección y caracterización de mecanismos a una escala de longitud adecuada. | El monitoreo de daños se refiere a eventos microestructurales como el agrietamiento de la matriz y la rotura de la fibra o macro eventos como la delaminación. | |
| 6 | Taheri, H., & Ahmed, A | Nondestructive ultrasonic inspection of composite materials: A comparative advantage of phased array ultrasonic. | La calidad de estos materiales es importante para un funcionamiento seguro. Las técnicas de pruebas no destructivas (NDT) son una forma eficaz de inspeccionar estos compuestos | | | |
| 7 | Md, N., Noor, M., Siti Norfahaman, ,A, Mohd Hisbany, ,M., & Norfaridah, M | Acoustic emission signals of pull-off test for concrete slab strengthened with CFRP using various surface preparations. | Este estudio investiga las señales de emisión acústica de losas de hormigón reforzadas con polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) bajo prueba de arranque. | | La preparación de la superficie de perforación produjo la mayor resistencia al arrancamiento en comparación con otras preparaciones de superficie, lo que indica una buena unión entre el CFRP y la interfaz del hormigón | |
| 8 | Tatar, J., Wagner, D., & (Trey) Hamilton, ,H | Structural testing and dissection of carbon fiber- reinforced polymer-repaired bridge girders taken out of service | | | | Se presenta los hallazgos de las pruebas estructurales y de materiales realizadas en una viga de puente envuelta en CFRP que se puso fuera de servicio del Indian River Bridge ubicado en Melbourne |
| 9 | Petruška, O., Zajac, J., Molnár, V., Fedorko, G., & Tkáč, J. | The effect of the carbon fiber content on the flexural strength of polymer concrete testing samples and the comparison of polymer concrete and U-shaped steel profile damping | Este estudio se centra en el efecto del contenido de fibra de carbono en la resistencia a la flexión de las muestras de ensayo de hormigón polímero y en la comparación de la amortiguación del hormigón polímero y el perfil de acero en forma de U. | | | Alto coeficiente de atenuación y fuerza flexural Junto con una alta resistencia a la compresión, son propiedades del material necesarias para utilizar este material compuesto como marco de una herramienta. |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 7: M4 - Matriz de Relaciones Jerarquía/comparación /desarrollo - Subtema

| SUBTEMA 1 (Control de los procesos de la instalación del sistema compuesto de polímeros) | Duchene, P., Chaki, S., Ayadi, A., & Krawczak, P | Duchene, P., Chaki, S., Ayadi, A., & Krawczak, P | Diferentes técnicas de ensayos no destructivos para detectar la evolución de daño microestructural como agrietamientos, rotura de fibra, etc. |
|---|--|---|---|
| Taheri, H., & Ahmed, A | Taheri, H., & Ahmed, A | Ensayos no destructivos con ultrasonido para la inspección de materiales compuestos de polímeros de fibra de carbono para la detección de fallas. | |
| Md, N., Noor, M., Siti Norfahanim, A, Mohd Hisbany, M., & Norfaridah, M | BASF Construction Chemicals Latin America. | Tipos comunes de epoxi y de tela utilizados. Procedimientos de instalación para los sistemas compuestos. Configuración general, calibración y mantenimiento de un saturador. Control de calidad e inspección. | |
| BASF Construction Chemicals Latin America. | Chapple C., P. | A pesar de que los sistemas FRP tienen diferencias, en general las fibras de carbono poseen una densidad de 1.700 kg/m ³ , representando alrededor de un 20% de la densidad del acero. Esto entrega ventajas en transporte e instalación y una resistencia de cerca de 40 000 kg/cm ² , representando 9,5 veces la resistencia de las barras de refuerzo de acero. | |
| Alotaibi, N., Ghannoum, W., & Jirsa, J. | Flores Tantaaléan, L. | Estos sistemas FRP cada vez en el Perú son más usados por muchos factores: tienen un costo muy competitivo frente a los sistemas convencionales de refuerzo y un comportamiento estructural muy bueno. | |
| Al-Rousan, R., & Al-Saraireh, S. | Fernández, V., Barrios, Á., & Molina, M. | Una correcta puesta en obra y con garantías del adecuado comportamiento del refuerzo optimiza y pone en valor este sistema. La implantación de un plan de control de calidad apropiado garantizará la optimización del refuerzo, y permitirá establecer los criterios de mantenimiento adecuados | |
| Al Azzawi, M., Hopkins, P., Ross, J., Mullins, G., & Sen, R. | Ekanayake, S., & Gurram, S. | Detección de defectos mediante la termografía de bloque para una detección de defectos no destructivos, donde se determinan las propiedades térmicas y defectos en estructura reforzadas con CFRP. | |
| Ekanayake, S., & Gurram, S. | Addepalli, S., & Zhao, Y. | La termografía usada para detectar daños juntos con su capacidad para identificar cambios químicos durante la exposición al calor en los polímeros reforzados con fibra de carbono. | |
| Damnoo, D. J., & Kumar, S. | Zhu, E., & Zhu, Z. | Ensayos para investigar el efecto de las temperaturas sobre el fraguado en los polímeros reforzados con fibra de carbono en diferentes condiciones ambientales. | |
| Lj, Z., & Meng, Z. | Concrelab | El ensayo de adherencia Pull Off, te ayudará en tu proyecto u obra para que puedas validar fácilmente la resistencia de la unión (zona de interfaz) entre el material o pegamento de prueba y el concreto. | |
| Aljazeera, Z., Alghazali, H., & Myers, J. | Zhuang, N., Dong, H., Chen, D., & Ma, Y. | Vigas de hormigón envejecidas y dañadas con laminas de polímeros reforzados con fibra de carbono y anclajes. | |
| Jia, P., Dong, J., Yuan, S., & Wang, Q. | Kupski, J., & Zarouchas, D. | La mejora de rendimiento de polímeros reforzados con fibra de carbono con uniones adhesivas con capas de diferentes espesores, usando emisiones acústicas y correlación de imágenes digitales para controlar el daño y la evolución de la tensión del área. | |
| | Baca Escobar, W., & Espinoza Anaya, E. | Los resultados obtenidos en estos ensayos son muy interesantes e ilustran lo complejo del comportamiento real, se ha determinado, que algunos especímenes ensayados no alcanzaron la resistencia nominal teórica de diseño, fallando prematuramente por delaminación del sistema y por desprendimiento del recubrimiento del concreto. | |
| | Damnoo, D. J., & Kumar, S. | Modos de fallas en vigas rectangulares de hormigón armado reforzadas con láminas de polímero reforzado con fibra de carbono unidas externamente. Después de la iniciación de la grieta, se encontraron delaminaciones de CFRP no cmf y CMF añadido. El tamaño de delaminación de CMF 0.8wt% añadido de CFRP era menor que el de CMF y CMF 1.2wt% añadido CFRP. Por lo tanto, la propiedad flexural de CFRP se mejoró porque la delaminación de CFRP se evitó por CMF 0.8wt% | |
| | Katogi, H., Takemura, K | Modo de falla por desprendimiento en vigas de hormigón armado reforzados con fibra de carbono. | |
| | Yasmeen, T. | | |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 8: M4 – Subtema 2

| | | | |
|--|---|---|---|
| | Duchene, P., Chaki, S., Ayadi, A., & Krawczak, P | Duchene, P., Chaki, S., Ayadi, A., & Krawczak, P | Diferentes técnicas de ensayos no destructivos para detectar la evolución de daño microestructural como agrietamientos, rotura de fibra, etc. |
| | Alotaibi, N., Shekarchi, W., Ghannoum, W., & Jirsa, J. | BASF Construction Chemicals Latin America. | Tipos comunes de epoxi y de tela utilizados. Procedimientos de instalación para los sistemas compuestos. Configuración general, calibración y mantenimiento de un saturador. Control de calidad e inspección. |
| | BASF Construction Chemicals Latin America. | Al-Rousan, R., & Al-Sarairoh, S. | No puede mejorarse en la mayoría de los parámetros investigados. Los resultados también mostraron que el comportamiento de las vigas probadas fue más efectivo cuando se usaron agujeros anclados combinados con vigas reforzadas con CFRP |
| | Al-Rousan, R., & Al-Sarairoh, S. | Crawford, K. C. | Los espectros (bandas) de frecuencias obtenidas en estas pruebas muestran una correlación con la condición de unión CFRP-hormigón e identifican áreas unidas y desunidas de la placa. Los resultados de estas pruebas indican que esta máquina de impacto NDT, con mejoras de diseño, puede proporcionar a los ingenieros de puentes un medio para evaluar rápidamente longitudes de laminados CFRP aplicados a múltiples puentes de carreteras dentro de una infraestructura de transporte nacional. |
| SUBTEMAS 2 (Relación epóxico/fibra) | Crawford, K. C. | Syed Mohamad Syahir, S., Abdullah, S., Shahidan, S., & Siti Rahimah, M. | Dimensionamientos de las tiras de polímero de fibra de carbono y preparación de superficie a reforzar antes de la aplicación |
| | Syed Mohamad Syahir, S., Abdullah, S., Shahidan, S., & Siti Rahimah, M. | Al Azzawi, M., Hopkins, P., Ross, J., Mullins, G., & Sen, R. | Reparación de muros con láminas de fibra de carbono en 2 direcciones con el uso de epóxicos comerciales. |
| | Al Azzawi, M., Hopkins, P., Ross, J., Mullins, G., & Sen, R. | Li, Z., & Meng, Z. | Técnicas de ensayos no destructivos como radiofrecuencia para compuestos plásticos reforzados con fibras de carbono para detectar roturas de fibra. |
| | Lupășteanu, V., Țăranu, N., & Ungureanu, D | | |
| | Baca Escobar, W. | Alotaibi, N., Shekarchi, W., Ghannoum, W., & Jirsa, J. | Vigas de hormigón armado reforzadas con tiras de polímeros de fibra de carbono y anclajes de CFRP. |
| | Li, Z., & Meng, Z. | Lupășteanu, V., Țăranu, N., & Ungureanu, D | Fallas en uniones adheridas entre tiras de compuestos de polímeros reforzados con fibra de carbono CFRP y acero Uniones adhesivas con FRP. |
| | Zhuang, N., Dong, H., Chen, D., & Ma, Y | Baca Escobar, W. | Todo diseñador debe tener muy claro las propiedades de los diferentes sistemas de refuerzo de fibra de carbono, las que son proporcionadas por los fabricantes, además deben distinguir si las propiedades reportadas son únicamente de las fibras de carbono o son las propiedades del sistema compuesto o sea fibras compuestas con las resinas saturantes. |
| | Katogi, H.; Takemura, K | Zhuang, N., Dong, H., Chen, D., & Ma, Y | Vigas de hormigón envejecidas y dañadas con laminas de polímeros reforzados con fibra de carbono y anclajes. |
| | Amir, H. | Katogi, H.; Takemura, K | Después de la iniciación de la grieta, se encontraron delaminaciones de CFRP no cmf y CMF añadido. El tamaño de delaminación de CMF 0.8wt% añadido CFRP era menor que el de CMF y CMF 1.2wt% añadido CFRP. Por lo tanto, la propiedad flexural de CFRP se mejoró porque la delaminación de CFRP se evitó por CMF 0.8wt% |
| | | Amir, H. | Aplicación de láminas de CFRP adheridas con adhesivos a elementos de acero |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 9: M4 - Subtemas 3

| | | | |
|---|--|--|--|
| | <p>Belarbi, A., Reda, M., Poudel, P., Tahsiri, H., Dawood, M., & Gencturk, B.</p> <p>Jahami, A., Temsah, Y., & Khatib, J.</p> <p>Duchene, P., Chaki, S., Ayadi, A., & Krawczak, P</p> <p>Md, N., Noor, M., Siti Norfahanim, A, Mohd Hisbany, M., & Norfaridah, M BASF Construction Chemicals Latin America.</p> <p>Alotaibi, N., Shekarchi, W., Ghannoum, W., & Jirsa, J.</p> <p>Al-Rousan, R., & Al-Saraireh, S.</p> <p>Crawford, K. C.</p> <p>SCI.</p> <p>Fernández, V., Barrios, Á., & Molina, M.</p> | <p>Md, N., Noor, M., Siti Norfahanim, A, Mohd Hisbany, M., & Norfaridah, M</p> <p>BASF Construction Chemicals Latin America.</p> <p>Fernández, V., Barrios, Á., & Molina, M.</p> <p>Syed Mohamad Syahir, S., Abdullah, S., Shahidan, S., & Siti Rahimah, M.</p> <p>Al Azzawi, M., Hopkins, P., Ross, J., Mullins, G., & Sen, R.</p> <p>Heuer, H., & Schulze, M.</p> <p>Li, Z., & Meng, Z.</p> | <p>Pruebas no destructivas con señales de emisión acústica en losas de hormigón reforzadas con polímero de fibra de carbono para identificar la unión entre CFRP y el elemento.</p> <p>Tipos comunes de epoxi y de tela utilizados. Procedimientos de instalación para los sistemas compuestos. Configuración general, calibración y mantenimiento de un saturador. Control de calidad e inspección.</p> <p>Una correcta puesta en obra y con garantías del adecuado comportamiento del refuerzo optimiza y pone en valor este sistema. La implantación de un plan de control de calidad apropiado garantizará la optimización del refuerzo, y permitirá establecer los criterios de mantenimiento adecuados</p> <p>Dimensionamientos de las tiras de polímero de fibra de carbono y preparación de superficie a reforzar antes de la aplicación</p> <p>Reparación de muros con láminas de fibra de carbono en 2 direcciones con el uso de epóxicos comerciales.</p> <p>Ensayo no destructivo END de radiofrecuencia para determinar la orientación de la fibra, brechas, desalineaciones, fallas en polímeros reforzados con fibra de carbono CFRP</p> <p>Técnicas de ensayos no destructivos como radiofrecuencia para compuestos plásticos reforzados con fibras de carbono para detectar roturas de fibra.</p> |
| <p>SUBTEMAS 3 (Pruebas de adherencia)</p> | <p>Syed Mohamad Syahir, S., Abdullah, S., Shahidan, S., & Siti Rahimah, M.</p> <p>Al Azzawi, M., Hopkins, P., Ross, J., Mullins, G., & Sen, R.</p> <p>Lupășteanu, V., Țăranu, N., & Ungureanu, D</p> <p>Zhuang, N., Dong, H., Chen, D., & Ma, Y.</p> <p>Baca Escobar, W.</p> <p>Li, Z., & Meng, Z.</p> <p>Ishikawa, T., Kawano, H., Nagao, T., & Kobayashi, A.</p> <p>Sun, W.; Jirsa, J.; Ghannoum, W.</p> <p>Amir, H.</p> | <p>Belarbi, A., Reda, M., Poudel, P., Tahsiri, H., Dawood, M., & Gencturk, B.</p> <p>Jahami, A., Temsah, Y., & Khatib, J.</p> <p>Zhu, E., & Zhu, Z.</p> <p>Kim, Y., & Al-Kubaisi, A.</p> <p>SCI.</p> <p>Lupășteanu, V., Țăranu, N., & Ungureanu, D</p> <p>Zhuang, N., Dong, H., Chen, D., & Ma, Y.</p> <p>Baca Escobar, W.</p> <p>Ishikawa, T., Kawano, H., Nagao, T., & Kobayashi, A.</p> <p>Korayem, A. H., Liu, Y. M., Zhao, X. L., & Duan, W. H.</p> <p>Amir, H.</p> | <p>Fallas en vigas pretensadas reforzadas con polímeros reforzados con fibra de carbono .</p> <p>Elementos de hormigón armado reforzados con polímeros reforzados con fibra de carbono sometidos a daños y fallas por cargas expositivas.</p> <p>Ensayos para investigar el efecto de las temperaturas sobre el fraguado en los polímeros reforzados con fibra de carbono en diferentes condiciones ambientales.</p> <p>Comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas con polímeros reforzados con fibra de carbono sometidos a asentamientos.</p> <p>Un ensayo de ultrasonido convencional se realiza con un transductor de mano o palpador. Este palpador se deberá colocar sobre la superficie del objeto para poder realizar la medición. El papel del inspector será esencial durante este proceso, ya que es totalmente manual.</p> <p>Fallas en uniones adheridas entre tiras de compuestos de polímeros reforzados con fibra de carbono CFRP y acero Uniones adhesivas con FRP .</p> <p>Vigas de hormigón envejecidas y dañadas con laminas de polímeros reforzados con fibra de carbono y anclajes .</p> <p>Todo diseñador debe tener muy claro las propiedades de los diferentes sistemas de refuerzo de fibra de carbono, las que son proporcionadas por los fabricantes, además deben distinguir si las propiedades reportadas son únicamente de las fibras de carbono o son las propiedades del sistema compuesto o sea fibras compuestas con las resinas saturantes.</p> <p>Se mostró que las tensiones térmicas en placa de acero con placa CFRP eran capaces de calcular mediante el uso de la teoría compuesta y la temperatura medida.</p> <p>Las muestras extraíbles con laminados CFRP poseen una mayor resistencia (aproximadamente doble) a la de las muestras con láminas CFRP, debido a la buena saturación de fibras en los laminados</p> <p>Aplicación de láminas de CFRP adheridas con adhesivos a elementos de acero</p> |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 10: Factor de reducción ambiental para diversas fibras y condiciones de exposición.

| Exposure condition | Fiber type | Environmental reduction factor <i>CE</i> |
|---|------------|--|
| Concrete not exposed to earth and weather | Carbon | 1.0 |
| | Glass | 0.8 |
| | Aramid | 0.9 |
| Concrete exposed to earth and weather | Carbon | 0.9 |
| | Glass | 0.7 |
| | Aramid | 0.8 |

Fuente: Committee 440, ACI (2017).

Anexo 11: Comparativo económico de la viga VT-07A (continua)

| COMPARATIVO ECONOMICO FRP VS ENCAMISADO / FLEXION | | | | | | |
|---|-------------------------|-------------------|----------|--------------------|-----------|--------------|
| PRESUPUESTO ENCAMISADO DE VIGAS | | | | | | |
| COSTOS DIRECTOS | DESCRIPCIÓN | UND | CANTIDAD | P.U | SUB TOTAL | PLAZO (DIAS) |
| MATERIALES | ACERO | Kg | 25,16 | 2,44 | 61,4 | |
| | ENCOFRADO | m2 | 1,24 | 40 | 49,6 | |
| | CONCRETO | m3 | 0,1 | 290 | 27,55 | |
| MANO DE OBRA | ACERO | Kg | 25,16 | 0,9 | 22,64 | |
| | ENCOFRADO | m2 | 1,24 | 20 | 24,8 | |
| | CONCRETO | m3 | 0,1 | 37 | 3,52 | |
| SUB CONTRATA | SERVICIO DE PERFORACION | und | 16 | 12 | 192 | |
| TOTAL DE COSTOS DIRECTOS: | | | | | \$ 381.51 | 8 |
| COSTO INDIRECTOS | COSTO MENSUAL | COSTO X ACTIVIDAD | | % DE PARTICIPACIÓN | SUB TOTAL | |
| RESIDENTE | 6000 | 1620 | | 8,00% | 129,6 | |
| ING. CALIDAD | 5500 | 1485 | | 8,00% | 118,8 | |
| MAESTRO DE OBRA | 4000 | 1080 | | 8,00% | 86,4 | |
| SSOMA | 3500 | 945 | | 8,00% | 75,6 | |
| ALMACENERO | 35000 | 945 | | 2,00% | 18,9 | |
| TOTAL DE COSTOS INDIRECTOS | | | | | \$ 429.30 | |
| TOTAL DE PRESUPUESTO | | | | | \$ 810.81 | |

Fuente: Universidad Ricardo Palma (2019)

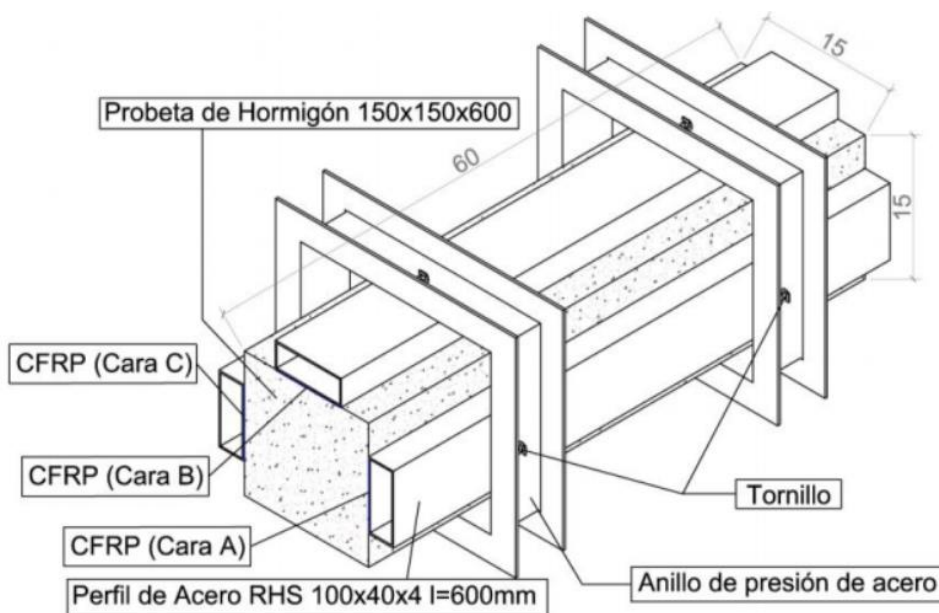
Anexo 12: Comparativo económico de la viga VT-07A (continua)

| COMPARATIVO ECONOMICO FRP VS ENCAMISADO / FLEXION | | | | | | |
|---|-----------------------------------|-------------------|--------------------|-----|-----------|--------------|
| PRESUPUESTO FIBRAS DE CARBONO | | | | | | |
| COSTOS DIRECTOS | DESCRIPCION | UND | CANTIDAD | P.U | SUB TOTAL | PLAZO (DIAS) |
| INSTALACIÓN + MATERIAL | FIBRA SIKA CARBIDUR SO 1012 | ml. | 1,9 | 358 | \$680,20 | |
| TOTAL DE COSTOS DIRECTOS: | | | | | \$680,20 | |
| COSTO INDIRECTOS | COSTO MENSUAL | COSTO X ACTIVIDAD | % DE PARTICIPACIÓN | | SUB TOTAL | |
| RESIDENTE | 6000 | 198 | 8,00% | | 15,84 | 1 |
| ING. CALIDAD | 5500 | 181,5 | 8,00% | | 14,52 | |
| MAESTRO DE OBRA | 4000 | 132 | 8,00% | | 10,56 | |
| SSOMA | 3500 | 115,5 | 8,00% | | 9,24 | |
| ALMACENERO | 3500 | 115,5 | 2,00% | | 22,31 | |
| TOTAL DE COSTOS INDIRECTOS | | | | | \$52,47 | |
| TOTAL DE PRESUPUESTO | | | | | \$732,67 | |

Fuente: Universidad Ricardo Palma (2019)

Anexo 13: Sistema empleado para la colocación del FRP y caras de tratamiento.

Cotas en cm.



Fuente: Ciencia e Ingeniería Neogranadina; Bogotá (2018)

Anexo 14: Tipos de ductilidad, gráficas y definiciones

| Ductility types | Schematic representation | Definition |
|-------------------------------------|--------------------------|--|
| Material (axial) ductility | | $\mu_\epsilon = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_y}$ |
| Cross-section (curvature) ductility | | $\mu_\chi = \frac{\chi_u}{\chi_y}$ |
| Member (rotation) ductility | | $\mu_\theta = \frac{\theta_u}{\theta_y}$ |
| Structure (displacement) ductility | | $\mu_\delta = \frac{\delta_u}{\delta_y}$ |

Fuente: Gioncu, 2000

Anexo 15: Propiedades e idoneidad de fibras para FRP

| Tipo de fibra | Tracción | Módulo elástico | Fuego | Durabilidad | Fatiga | Impacto | Coste |
|---------------|----------|-----------------|-------|-------------|--------|---------|-------|
| CARBONO | I | I | R | I | R | A | A |
| VIDRIO | R | A | R | A | A | R | I |
| ARAMIDA | R | R | I | I | I | I | A |
| BASALTO | I | A | I | I | R | R | R |
| NATURAL | A | P | A | P | A | A | I |
| PBO | I | I | I | A | A | A | P |

Fuente: Gioncu, 2000

Nota: I: idóneo / P: poco recomendable / R: recomendable / A: aceptable, Fuente: Universidad Politécnica De España (2017)

Anexo 16: Resistencias promedio de probetas de concreto

| Refuerzo | Resistencia característica (N/mm ²) | Probeta | Tensión de rotura individual (N/mm ²) | Tensión de rotura promedio (N/mm ²) |
|------------------|---|---------|---|---|
| Sin refuerzo | 12 | C2 | 822 | 12,193 |
| | | C4 | 12,252 | |
| | | D3 | 15,504 | |
| | 35 | A2 | 35,973 | 35,514 |
| | | A5 | 36,793 | |
| | | B2 | 33,777 | |
| Refuerzo al 50% | 12 | C3 | 19,716 | 25,077 |
| | | C5 | 27,145 | |
| | | D4 | 28,371 | |
| | 35 | A1 | 52,137 | 53,795 |
| | | A3 | 52,295 | |
| | | B4 | 56,951 | |
| Refuerzo al 100% | 12 | D1 | 35,483 | 28,484 |
| | | D2 | 28,217 | |
| | | C1 | 21,751 | |
| | 35 | A4 | 53,43 | 57,919 |
| | | B1 | 57,374 | |
| | | B3 | 62,952 | |

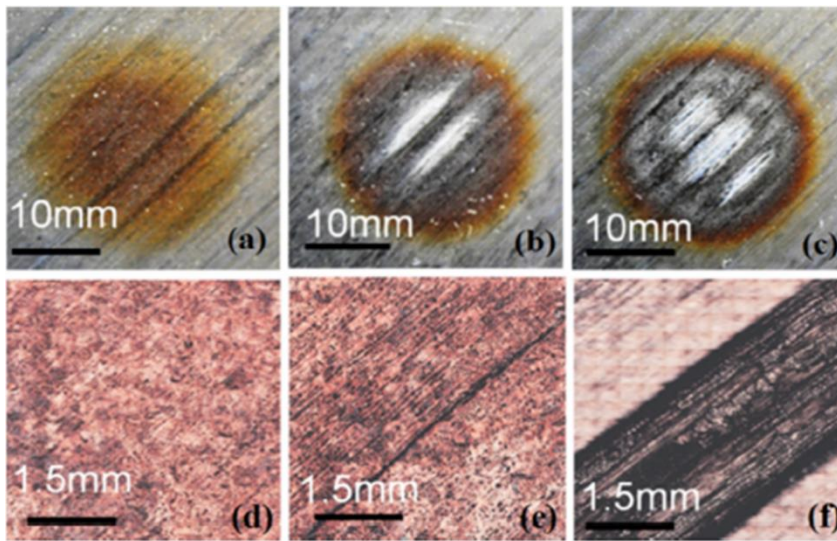
Fuente: Universidad Politécnica De España (2017)

Anexo 17: Nomenclatura de las muestras de prueba

| Nombre | Exposición al calor (°C) | Tiempo de exposición (min) | Diámetro de daño (mm) | Daños |
|--------|--------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| S1 | Sin exposición al calor | 0 | 0 | Sin Daños |
| M2 | 386.2 | 2 | 24 | Decoloración |
| M5 | 386.2 | 5 | 26 | Grieta inicial |
| M30 | 386.2 | 30 | 26 | Grietas y ampollas extendidas |
| L220 | 340.8 | 220 | 28 | Decoloración fuerte |
| H1 | 473.2 | 0.25 | | Signos ilimitados de decoloración |

Fuente: Addepialli, S., & Zhao, Y. (2019).

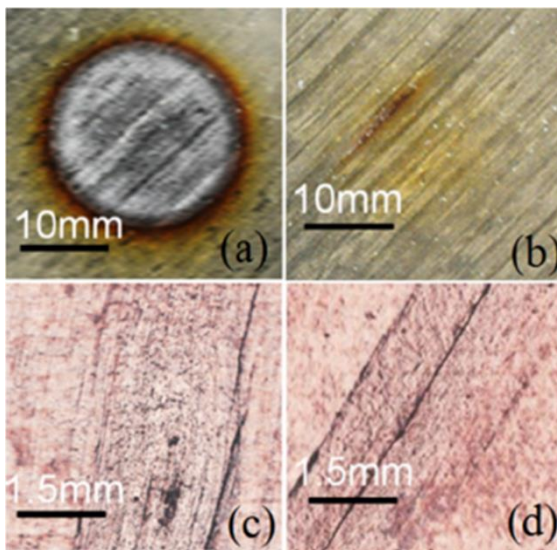
Anexo 18: Resultados de la inspección visual para laminados expuestos a una exposición media al calor



Fuente: Addepialli, S., & Zhao, Y. (2019).

Nota: a) y d) M2, b) y e) M5, c) y f) M30. Fuente: Addepialli, S., & Zhao, Y. (2019).

Anexo 19: Resultados de la inspección visual para laminados expuestos a diferentes exposiciones al calor



Fuente: Addepialli, S., & Zhao, Y. (2019).

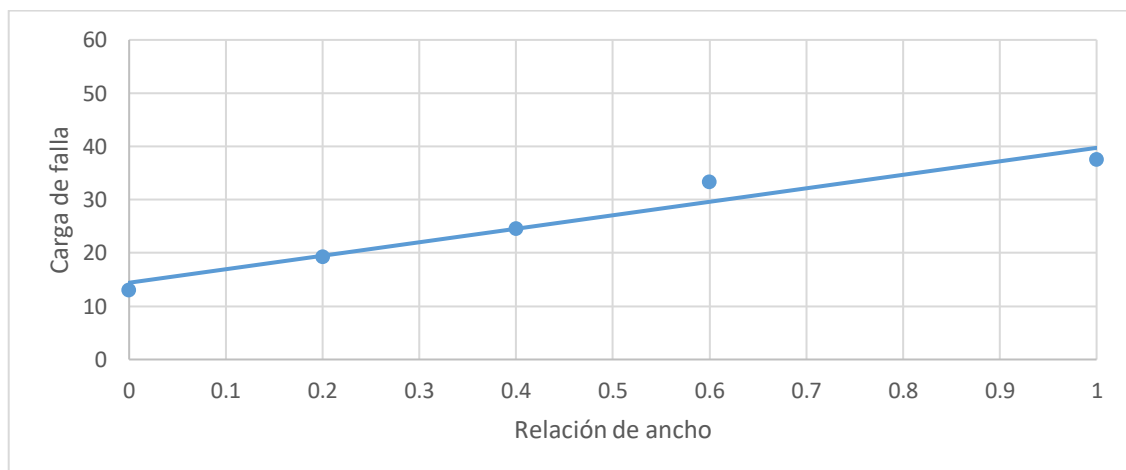
Nota: a) y c) L220, b) y d) H1. Fuente: Addepialli, S., & Zhao, Y. (2019).

Anexo 20: Datos tabulados de la prueba de carga promedio en tres puntos

| Anchura proporción Wpags/Wc | Muestra | Prueba de carga de tres puntos | | |
|-----------------------------|---------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| | | Ultimo carga (KN) | Promedio último cargo (KN) | Porcentaje de incrementar (%) |
| 0 | W0 | 13,64 | 13,06 | 0 |
| | | 11,00 | | |
| | | 14,52 | | |
| 0,27 (20 mm) | W20 | 18,33 | 19,25 | 47,39 |
| | | 20,61 | | |
| 0,53 (40mm) | W40 | 24,81 | 24,6 | 89,05 |
| | | 24,57 | | |
| 0,80 (60mm) | W60 | 34,89 | 33,38 | 155,67 |
| | | 32,37 | | |
| | | 32,89 | | |
| 1 (75mm) | W75 | 36,89 | 37,50 | 187,23 |
| | | 37,73 | | |
| | | 37,89 | | |

Fuente: Syed Mohamad Syahir, S. M., Abdullah, S. R., Shahidan, S., & Siti Rahimah, M. N. (2017).

Anexo 21: Cargas de falla basadas en las diferentes relaciones de ancho
















Fuente: Syed Mohamad Syahir, S. M., Abdullah, S. R., Shahidan, S., & Siti Rahimah, M. N. (2017).

Anexo 22: Vida útil típica (tiempo de trabajo) del epóxico a diversas temperaturas

| Temperatura | Vida útil | | |
|--------------|-----------|---|-------|
| [15 - 18] °C | 6 | 7 | Horas |
| [19 - 21] °C | 5 | 6 | Horas |
| [22 - 23] °C | 4 | 5 | Horas |
| [24 - 26] °C | 3 | 4 | Horas |
| [27 - 29] °C | 1.5 | 3 | Horas |

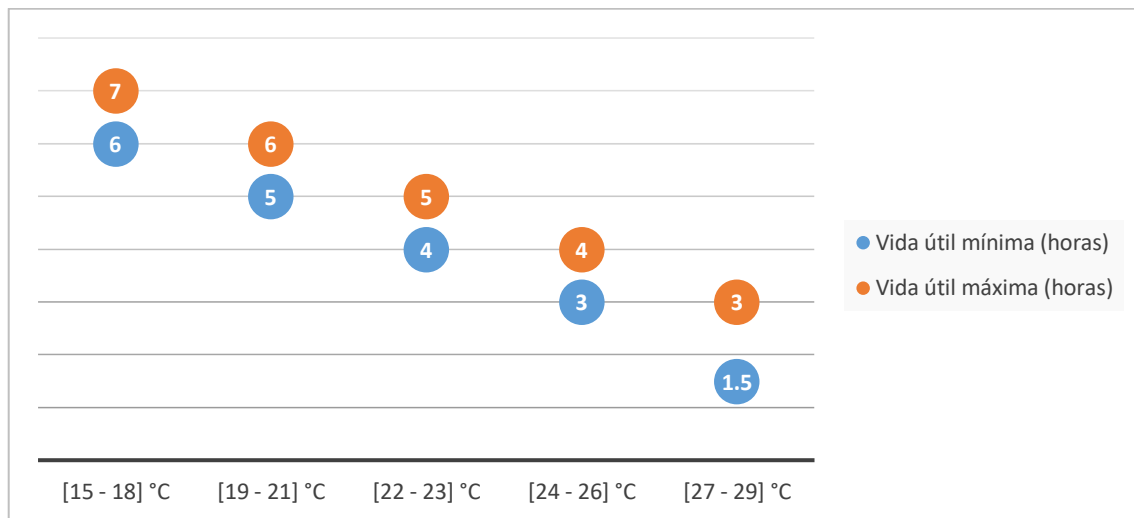
Fuente: Manual de Entrenamiento para Aplicadores Certificados del sistema Tyfo® Fibrwrap® (2016)

Anexo 23: Tipos de modo de falla para cada muestra

| Ancho | Observación física | Modo de fallo |
|-------|---|--|
| 0 |  Sample A | Grieta por flexión |
| |  Sample B | |
| |  Sample C | |
| 0.27 |  Sample A | Ruptura de FRP |
| |  Sample B | |
| 0.53 |  Sample A | Ruptura de FRP |
| |  Sample B | |
| 0.8 |  Sample A | Interfaz del extremo de la placa desprendiendo (La grieta comienza a desarrollarse en la superficie del prisma de concreto hasta que provoco que el CFRP y el concreto se despegue) |
| |  Sample B | |
| |  Sample C | |
| 1 |  Sample A | Interfaz del extremo de la placa desprendiendo (La grieta comienza a desarrollarse en la superficie del prisma de concreto hasta que provoco que el CFRP y el concreto se despegaran) |
| |  Sample B | |
| |  Sample C | |

Fuente: Syed Mohamad Syahir, S. M., Abdullah, S. R., Shahidan, S., & Siti Rahimah, M. N. (2017).

Anexo 24: Temperatura de ambiente respecto a la vida útil del epóxico preparado



Fuente: Manual de Entrenamiento para Aplicadores Certificados del sistema Tyfo® Fibrwrap® (2016)

Anexo 25: Temperatura actual respecto a la humedad relativa en su lugar de trabajo para hallar el punto de rocío

| Temp C° | % Humedad Relativa | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 100 | 95 | 90 | 85 | 80 | 75 | 70 | 65 | 60 | 55 | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 |
| 40 | 40 | 39 | 38 | 37 | 36 | 35 | 33 | 32 | 31 | 39 | 28 | 26 | 24 | 22 | 19 | 16 | 13 | 8 | 3 |
| 38 | 38 | 37 | 37 | 35 | 34 | 33 | 32 | 30 | 29 | 27 | 26 | 24 | 22 | 20 | 17 | 15 | 11 | 7 | 1 |
| 36 | 36 | 35 | 34 | 33 | 32 | 31 | 30 | 28 | 27 | 26 | 24 | 22 | 20 | 18 | 16 | 13 | 10 | 7 | 0 |
| 34 | 34 | 33 | 32 | 31 | 30 | 29 | 28 | 26 | 25 | 24 | 22 | 20 | 19 | 16 | 14 | 11 | 8 | 4 | 0 |
| 32 | 32 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 23 | 22 | 20 | 19 | 17 | 15 | 12 | 10 | 6 | 2 | 0 |
| 30 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 21 | 20 | 18 | 17 | 15 | 13 | 11 | 8 | 4 | 1 | 0 |
| 28 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 18 | 17 | 15 | 13 | 11 | 9 | 6 | 3 | 0 | |
| 26 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 16 | 15 | 13 | 11 | 9 | 7 | 4 | 1 | 0 | |
| 24 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 14 | 13 | 11 | 10 | 8 | 5 | 3 | 0 | | |
| 22 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 11 | 10 | 8 | 6 | 4 | 1 | | | |
| 20 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 9 | 8 | 6 | 4 | 2 | 0 | | | |
| 18 | 18 | 17 | 16 | 15 | 15 | 14 | 12 | 11 | 10 | 9 | 7 | 6 | 4 | 2 | 0 | 0 | | | |
| 16 | 16 | 15 | 14 | 13 | 13 | 12 | 11 | 9 | 8 | 7 | 6 | 4 | 2 | 1 | 0 | | | | |
| 14 | 14 | 13 | 12 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 6 | 5 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | | | |
| 12 | 12 | 11 | 10 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 4 | 3 | 2 | 0 | | | | | | | |
| 10 | 10 | 9 | 8 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 1 | 1 | 0 | | | | | | | |
| 8 | 8 | 7 | 6 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | | | | | | | |
| 6 | 6 | 5 | 4 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | |
| 4 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 2 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Fuente: Manual de Entrenamiento para Aplicadores Certificados del sistema Tyfo® Fibrwrap® (2016)

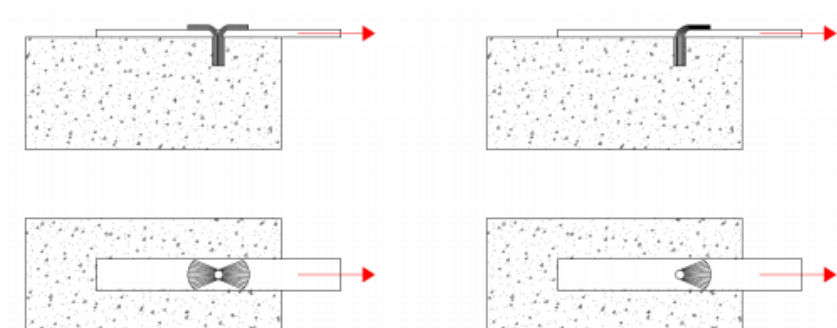
Nota: La temperatura de la superficie de la estructura debe estar por lo menos 3 °C por encima de este punto de rocío. Fuente: Manual de Entrenamiento para Aplicadores Certificados del sistema Tyfo® Fibrwrap® (2016)

Anexo 26: Anclajes tipo “pajarita” (izquierda) y abanico único (derecha)



Fuente: Villanueva, P. (2017)

Anexo 27: Orientación de anclajes “pajarita” y abanico respecto a carga.



Fuente: Villanueva, P. (2017)

Anexo 28: Efecto de la temperatura en reforzamientos con fibras de carbono

| Muestra | Temperaturas | Modos de fallo | Observación |
|---------|--------------|---|--|
| M1 | -30 | Fallo interlaminar del refuerzo y fallo a cortante del hormigón | Desviaciones de carga con caídas repentinas de carga |
| M2 | -100 | Fallo interlaminar del refuerzo y fallo a cortante del hormigón | Desviaciones de carga con caídas repentinas de carga |
| M3 | 40 | Fallo cohesivo | Comportamiento uniforme |

Fuente: López Molina, Javier

Anexo 29: Especificaciones técnicas de las resinas epóxicas saturantes

| Características | Resina epóxica saturante | |
|---------------------------------|---|-------------------|
| Viscosidad | Componente A: 11000 - 13000 cps a 25 °C Componente B: 11 cps a 25 °C | |
| Viscosidad de producto mezclado | 600 - 700 cps | |
| Densidad (a 20 °C) | Componente A: 1,16 Kg/l Componente B: 0.95 Kg/l Producto mixto: 9.17 Kg/l | ASTM D-972 |
| Tg | 82 °C | ASTM D-4065 |
| Resistencia a la tracción | 72.4 Mpa | ASTM D-638 Tipo 1 |
| Módulo de tracción | 3.18 Gpa | ASTM D-638 Tipo 1 |
| Porcentaje de elongación | 5.00% | ASTMD -638 Tipo 1 |
| Resistencia a la compresión | 86.2 MPa | ASTM D-695 |
| Módulo de compresión | 3.2 GPa | ASTM D-695 |
| Resistencia a flexión | 132.4 MPa | ASTM D-790 |
| Módulo de flexión | 3.12 GPa | ASTM D-790 |

Fuente: Piñero Díaz, José (2016)

Anexo 30: Especificaciones técnicas de las resinas adhesivas

| Características | Resina epóxica adhesiva | Normal ASTM |
|------------------------------|---|--------------------------|
| Viscosidad | Componente A: 7000-1000 cps a 25 °C Componente B: 11 cps a 25 °C | |
| Viscosidad producto mezclado | Consistencia de pasta gruesa | |
| Densidad (a 20 °C) | | ASTM D-972 |
| Tg | 82 °C | ASTM D-4065 |
| Resistencia a la tracción | 72.4 Mpa | ASTM D-638 Tipo 1 |
| Módulo de tracción | 3.18 GPa | ASTM D-638 Tipo 1 |
| Porcentaje de elongación | 5.00% | ASTM D-638 Tipo 1 |
| Resistencia a la compresión | | ASTM D-695 |
| Módulo de compresión | | ASTM D-695 |
| Resistencia a flexión | 123.4 Mpa | ASTM D-790 |
| Módulo de flexión | 3.12 GPa | ASTM D 790 ASTM D-790 |

Fuente: Piñero Díaz, José (2016)