UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Estudio comparativo estructural de una sección circular de concreto armado con barras de fibra de vidrio (GFRP) en lugar de barras de acero expuesto a la corrosión por cloruros en la costa peruana.

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Pichardo Neyra, Camila Ysabel (0000-0001-6458-5368)

Tovar Párraga, Willy (0000-0002-3870-5562)

ASESOR

Fernández Dávila Gonzales, Víctor Iván (0000-0002-1333-8989)

Lima, 13 de febrero de 2020

DEDICATORIA

A nuestros padres, por ayudarnos a forjarnos como personas, por apoyarnos en todos estos años a cumplir nuestros objetivos y motivarnos para seguir esforzándonos.

AGRADECIMIENTOS

A nuestro asesor Víctor Fernández Dávila, por su constante apoyo y motivación en el desarrollo de esta investigación.

RESUMEN

El presente estudio aborda el uso de barras de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP) como reemplazo del acero en una sección circular de concreto armado, con el fin de evitar la corrosión de las barras de refuerzo y así mejorar su durabilidad.

El caso de estudio es la sección de un pilote cuadrado convertida en una sección circular equivalente de concreto armado del puerto artesanal de Huacho, provincia de Huaura, departamento de Lima. Se realizó el análisis comparativo del desarrollo del diagrama de interacción para el diseño por flexocompresión y ratio de cuantía requerida de refuerzo transversal para ambos tipos de refuerzo. Asimismo, se desarrolló el diagrama Momento–Curvatura para calcular factores de ductilidad y deformabilidad de ambas secciones.

Palabras Claves:

Polímero reforzado con fibra de vidrio; pilotes; corrosión; sección circular

ABSTRACT

The present study addresses the use of fiberglass reinforced polymer (GFRP) bars as a replacement for steel in a circular section of reinforced concrete, in order to avoid corrosion of rebar and thus improve its durability.

The case study is the section of a square pile converted into an equivalent circular section of reinforced concrete from the Huacho artisanal port, Huaura province, department of Lima. The comparative analysis of the development of the interaction diagram for the flexo-compression design and ratio of the required amount of transversal reinforcement was carried out for the design by cutting by Excel spreadsheets and the Matlab programming software, for both types of reinforcement. Likewise, the relative flexural stiffness at ultimate load level and the ductility of both sections under lateral load were analyzed by obtaining the Moment-Curvature diagram.

Keywords:

Glass fiber reinforced polymer; piles; corrosion; circular section

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. Antecedentes	10
1.2. Realidad problemática	12
1.3. Formulación del Problema	18
1.4. Hipótesis	18
1.5. Objetivo General	18
1.6. Objetivos Específicos	18
1.7. Descripción del Contenido	19
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1. Resumen Histórico	20
2.2. Componentes del GFRP	20
2.3. Características y Propiedades Mecánicas del GFRP	24
2.4. Ventajas del GFRP como barras de refuerzo estructural	26
2.5. Aplicaciones en estructuras existentes	30
2.6. Costo de construcción de diversos elementos estructurales reforzados con barras GFRP	33
2.7. Consideraciones para control de calidad para la construcción	34
3. MATERIAL Y MÉTODOS	36
3.1. Material	36
3.2. Método	37
4. RESULTADOS	40
4.1. Metodología para diseño por combinación de carga axial y flexión	40
4.2. Diseño por corte	66
4.3. Diagrama Momento-Curvatura	80
4.4. Idealización de los Diagramas Momento-Curvatura para el cálculo del índice de ductilidad de curvatura	92
5. CONCLUSIONES	100
6. RECOMENDACIONES	102
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: <i>Velocidad de corrosión en estructuras marinas según la profundidad</i>	14
Tabla 2: <i>Costo parcial por reparación de pilotes del Puerto de Huacho</i>	17
Tabla 3: <i>Tipos de fibra de vidrio y sus principales propiedades</i>	23
Tabla 4: <i>Principales propiedades mecánicas de las barras GFRP y Acero</i>	28
Tabla 5: <i>Principales propiedades física de las barras GFRP y Acero</i>	28
Tabla 6: <i>Principales características de las barras GFRP y barras de acero</i>	29
Tabla 7: <i>Costo del material GFRP VS Acero</i>	33
Tabla 8: <i>Tabla de datos de la sección cuadrada</i>	37
Tabla 9: <i>Tabla de datos de la sección circular</i>	37
Tabla 10: <i>Variables de Estudio</i>	38
Tabla 11: <i>Factor de Reducción de Resistencia</i>	41
Tabla 12: <i>Datos de la sección circular</i>	46
Tabla 13: <i>Distancias a los ejes de las barras y el área de acero por eje</i>	47
Tabla 14: <i>Iteraciones para el cálculo de P y M</i>	48
Tabla 15: <i>Datos de la sección circular reforzada con GFRP</i>	59
Tabla 16: <i>Cálculo de valores del diagrama de interacción Nominal</i>	60
Tabla 17: <i>Cálculo de valores del diagrama de interacción de diseño</i>	61
Tabla 18: <i>Valores calculados de las ecuaciones interpoladas del diagrama de interacción uniaxial nominal de acero y GFRP</i>	63
Tabla 19: <i>Datos de la sección circular reforzada con barras de acero</i>	69
Tabla 20: <i>Resultados del diseño por corte de la sección circular reforzada con barras de acero</i>	70
Tabla 21: <i>Datos de la sección circular reforzada con barras de GFRP</i>	74
Tabla 22: <i>Procedimiento previo del diseño de la sección circular reforzada con barras de GFRP</i>	75
Tabla 23: <i>Resultados del diseño por corte de la sección circular reforzada con barras de GFRP</i>	76
Tabla 24: <i>Parámetros y criterios de aceptación para procedimientos no lineales en columnas de concreto armado</i>	77
Tabla 25: <i>Resumen de resultados obtenidos para $P_n = 56.08T_n$</i>	77
Tabla 26: <i>Resumen de resultados obtenidos para $P_n = 112.16T_n$</i>	78
Tabla 27: <i>Resumen de resultados obtenidos para $P_n = 168.23T_n$</i>	78
Tabla 28: <i>Resumen de resultados obtenidos para $P_n = 224.31T_n$</i>	79
Tabla 29: <i>Datos de la sección circular reforzado con acero</i>	86
Tabla 30: <i>Datos de la sección circular reforzado con GFRP</i>	86
Tabla 31: <i>Índice de ductilidad de curvatura para sección con acero y GFRP sometido a carga axial</i>	99
Tabla 32: <i>Ratio porcentual de la rigidez a la flexión para sección con acero y GFRP respecto a carga axial</i>	99

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1:</i> Humedad relativa en Lima 2019	13
<i>Figura 2:</i> Variación de corrosión vs profundidad de la estructura.....	14
<i>Figura 3:</i> Representación del acero al ataque de cloruros	15
<i>Figura 4:</i> Mapa de ubicación del Distrito de Santa Rosa, Provincia de Chiclayo, Lambayeque.....	16
<i>Figura 5:</i> Tipos de Estructuras de Polímeros	21
<i>Figura 6:</i> Estructura química de la resina poliéster insaturada	22
<i>Figura 7:</i> Diagrama esfuerzo - deformación del acero y algunos tipos de FRP	25
<i>Figura 8:</i> Curvas de resistencia a la tracción de varilla GFRP y varilla de acero.....	26
<i>Figura 9:</i> Curvas de resistencia a la flexión de varilla GFRP y varilla de acero	27
<i>Figura 10:</i> Colocación de barras de GFRP en la losa del puente de Salem, Ohio.....	30
<i>Figura 11:</i> Paneles prefabricados con GFRP en Emma Park Bridge, Iowa.....	31
<i>Figura 12:</i> Puente Floodway, Winnipeg, Canadá	31
<i>Figura 13:</i> Puente 18th Street en Brandon, Manitoba, Canadá.....	32
<i>Figura 14:</i> Miami-Dade MetroRail	32
<i>Figura 15:</i> Vaciado de concreto de losa con GFRP	34
<i>Figura 16:</i> Estribos y espirales cerrados de GFRP	35
<i>Figura 17:</i> Sección cuadrada transversal del pilote existente	36
<i>Figura 18:</i> Sección transversal del pilote propuesta	37
<i>Figura 19:</i> Zonas de falla de en un diagrama de interacción	42
<i>Figura 20:</i> Distribución de esfuerzos en una sección según el Método de Whitney	42
<i>Figura 21:</i> Punto Balanceado en una Sección.....	43
<i>Figura 22:</i> Diagrama de interacción para flexión biaxial	45
<i>Figura 23:</i> Distribución de refuerzo de la sección circular (unidades en cm)	46
<i>Figura 24:</i> Diagrama de interacción uniaxial nominal de una sección de concreto reforzado con acero	49
<i>Figura 25:</i> Diagrama de interacción uniaxial de diseño de una sección de concreto reforzado con acero	49
<i>Figura 26:</i> Gráfico de la función del factor de reducción dependiente de la cuantía	52
<i>Figura 27:</i> Función del factor de reducción de resistencia a la tracción.....	52
<i>Figura 28:</i> Sección transversal de una columna circular.	54
<i>Figura 29:</i> Diagrama de interacción uniaxial nominal de la sección reforzada con GFRP	61
<i>Figura 30:</i> Diagrama de interacción uniaxial de diseño de la sección reforzada con GFRP	62
<i>Figura 31:</i> Comparación de diagramas uniaxiales de interacción nominal con Acero y GFRP en la zona de falla dúctil	63
<i>Figura 32:</i> Comparación de diagramas uniaxiales de interacción nominal con Acero y GFRP	64
<i>Figura 33:</i> Comparación de diagramas uniaxiales de interacción diseño con Acero y GFRP	65
<i>Figura 34:</i> Comparación de las plataformas de los diagramas uniaxiales de interacción de diseño con Acero y GFRP.	66

<i>Figura 35: Gráfico Cuantía VS $V_u/V_{mín}$ para $P_n= 56.08T_n$ comparativo entre diseño por corte de barras de acero y GFRP.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 36: Gráfico Cuantía VS $V_u/V_{mín}$ para $P_n= 112.16T_n$ comparativo entre diseño por corte de barras de acero y GFRP.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 37: Gráfico Cuantía VS $V_u/V_{mín}$ para $P_n= 168.23T_n$ comparativo entre diseño por corte de barras de acero y GFRP.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 38: Gráfico Cuantía VS $V_u/V_{mín}$ para $P_n= 224.31T_n$ comparativo entre diseño por corte de barras de acero y GFRP.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 39: Curvatura de un elemento.</i>	<i>81</i>
<i>Figura 40: Perfil de esfuerzos y deformaciones de una sección circular.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 41: Geometría y distribución de la sección circular en cm</i>	<i>87</i>
<i>Figura 42: Diagrama Momento-Curvatura para sección reforzada con acero.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 43: Diagrama Momento-Curvatura para sección reforzada con GFRP</i>	<i>88</i>
<i>Figura 44: Diagrama Momento-Curvatura para 15% de resistencia máxima a la compresión de diseño</i>	<i>89</i>
<i>Figura 45: Diagrama Momento-Curvatura para 30% de resistencia máxima a la compresión de diseño</i>	<i>89</i>
<i>Figura 46: Diagrama Momento-Curvatura para 45% de resistencia máxima a la compresión de diseño</i>	<i>90</i>
<i>Figura 47: Diagrama Momento-Curvatura para 60% de resistencia máxima a la compresión de diseño</i>	<i>90</i>
<i>Figura 48: Tipos de curvas idealizadas de Momento-Curvatura</i>	<i>92</i>
<i>Figura 49: Curva Idealizada</i>	<i>93</i>
<i>Figura 50: Diagrama Momento-Curvatura idealizado para refuerzo de acero con 15% de resistencia máxima a la compresión de diseño</i>	<i>94</i>
<i>Figura 51: Diagrama Momento-Curvatura idealizado para refuerzo de GFRP con 15% de resistencia máxima a la compresión de diseño</i>	<i>95</i>
<i>Figura 52: Diagrama Momento-Curvatura idealizado para refuerzo de acero con 30% de resistencia máxima a la compresión de diseño</i>	<i>95</i>
<i>Figura 53: Diagrama Momento-Curvatura idealizado para refuerzo de GFRP con 30% de resistencia máxima a la compresión de diseño</i>	<i>96</i>
<i>Figura 54: Diagrama Momento-Curvatura idealizado para refuerzo de acero con 45% de resistencia máxima a la compresión de diseño</i>	<i>96</i>
<i>Figura 55: Diagrama Momento-Curvatura idealizado para refuerzo de GFRP con 45% de resistencia máxima a la compresión de diseño</i>	<i>97</i>
<i>Figura 56: Diagrama Momento-Curvatura idealizado para refuerzo de acero con 60% de resistencia máxima a la compresión de diseño</i>	<i>97</i>
<i>Figura 57: Diagrama Momento-Curvatura idealizado para refuerzo de GFRP con 60% de resistencia máxima a la compresión de diseño</i>	<i>98</i>

1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presentan estudios e investigaciones realizados sobre el empleo de las barras GFRP alrededor del mundo como solución al problema de corrosión en las barras de acero. Además, se expone la realidad problemática en la zona de estudio, se plantea una pregunta de investigación y se formula una hipótesis inicial. Por último, se establece el objetivo principal y los específicos de la presente investigación.

1.1. Antecedentes

La historia del uso de polímeros reforzados con fibra (FRP) se remonta a la década de los 40 en la Segunda Guerra Mundial, donde la industria aeroespacial empezó a desarrollar materiales de alta resistencia y de bajo peso. Es desde este punto donde EE. UU. empezó a usar este material para la demanda de sus consumidores, realizando cañas de pescar y palos de golf. Pero es en los 60s, donde se consideró verdaderamente el uso de esta tecnología en el área de la construcción como refuerzo del concreto armado (Comité ACI 440, 2015).

Las barras de polímero de fibra de vidrio poseen como componente principal a la fibra de vidrio, que le da la gran rigidez y resistencia a la tracción a las barras. Su proceso de fabricación se basa en la pultrusión, que consiste en pasar miles de fibras de vidrio sucesivamente, adheridas a una resina de polímero en estado líquido, a través de un molde que se encuentra a temperatura elevada y que establece la sección transversal de las barras. Para una mejor adherencia al concreto es necesario que las barras sean corrugadas, por este motivo se suele atar un conjunto de fibras alrededor y a lo largo de las barras (Larralde & Silva, 1992). Una de las principales ventajas que poseen estas barras es que eliminan los problemas de corrosión en el concreto armado gracias al componente polímero, el cual protege a las fibras de los nocivos efectos ambientales como la humedad, el ataque de agentes químicos y la temperatura, reduciendo los costos de reparación en las estructuras afectadas (Brindis, 2002). El reemplazo de las barras de acero por sus equivalentes barras de fibra de vidrio debido a la corrosión es relativamente nuevo, y su comportamiento estructural sigue siendo investigado experimentalmente en diversos elementos estructurales. En los siguientes párrafos se discutirán diferentes estudios e investigaciones realizadas en los últimos años.

En 1992, se publicó un estudio en la revista española “Obras Públicas” realizado por Larralde & Silva, donde muestran los resultados de ensayos realizados en la Universidad Drexel, Filadelfia, EE. UU. En dichos ensayos, las vigas reforzadas con

barras GFRP fueron sometidas a flexión, obteniéndose gráficos de carga-deformación, donde todas las vigas ensayadas fallaron por tracción. Por último, se muestran los ensayos preliminares en las vigas mencionadas anteriormente, en las cuales se pudo observar un comportamiento carga-deformación similar al del refuerzo tradicional de acero. Además, el comportamiento del concreto reforzado con barras GFRP puede ser desarrollado mediante los métodos analíticos convencionales empleando las propiedades mecánicas de las barras de fibra de vidrio (Larralde & Silva, 1992).

En el año 1998, se presenta una conferencia magistral del ingeniero Manuel González de la Coteria en el Primer Congreso Nacional de Ingeniería Estructural y Construcción realizado en Perú. En este documento, se menciona la gran importancia que tiene el problema de la corrosión que se presenta en el litoral peruano y de cómo afecta a las estructuras portuarias y, en general, en las construcciones de concreto armado. Concluye que es necesario profundizar en la investigación de la corrosión a través de estudios experimentales donde se involucre el concreto y el acero en conjunto, y no por separado como se ha estado desarrollando en estudios anteriores (Gonzales, 1998).

En el año 2008, Loayza presentó un estudio sobre la reparación de un muro de albañilería confinada, tomando como referencia el trabajo de Janampa (2003), en el cual las barras de fibra de vidrio se usaron para reparar muros que habían fallado con el fin de devolverle su resistencia inicial. Se menciona que una de las características importantes de las barras de fibra de vidrio es su resistencia a la corrosión, debido a la humedad existente en la costa peruana. Luego del ensayo de carga lateral, se pudo concluir que la reparación con barras de fibra de vidrio permitió al muro recuperar seis veces la rigidez alcanzada por el muro después de fallar, demostrando así su efectividad. (Loayza, 2008).

En el año 2014, Mufti et al. realizaron un estudio sobre la durabilidad y rendimiento de las barras GFRP en Canadá. En dicho estudio, se analizaron cinco puentes reforzados con barras GFRP expuestos a distintas condiciones ambientales (agua salada de mar y temperaturas extremas) a lo largo del territorio de dicho país. Los resultados mostraron que el deterioro del refuerzo GFRP fueron nulos en las estructuras estudiadas, tampoco hubo degradación del material debido a la alcalinidad del concreto y, por lo tanto, se concluyó que las barras GFRP presentan una buena durabilidad en el concreto. (Mufti et al., 2014).

En el año 2017, Joaquín et al. publicaron en la Revista de Arquitectura e Ingeniería en Cuba, parte de su investigación de diseño de elementos estructurales reforzados con barras de fibra de vidrio en reemplazo del acero, en el cual explican los avances en

conocimiento sobre el uso de este nuevo material y sustentan el reemplazo del acero por PRFV (polímero reforzado de fibras de vidrio) debido a su probada estabilidad corrosiva, alta resistencia a la tracción, bajo peso y transparencia magnética. A pesar de esto, menciona que esta sustitución puede no ser directa debido al menor módulo de elasticidad y baja resistencia al corte de las barras PRFV (Joaquín, Pérez & Rivas, 2017).

En el año 2018, Elshamandy et al. realizaron investigaciones experimentales en elementos reforzados con GFRP, donde se aplicaron cargas laterales cíclicas y carga axial al mismo tiempo a sistemas aporticados. En este estudio, se demostró que el comportamiento del concreto reforzado con GFRP fue adecuado a pesar de no presentar ductilidad, ya que fue capaz de desarrollar mayores deformaciones elásticas en comparación a las deformaciones de fluencia del acero. (Elshamandy, Farghaly, & Benmokrane, 2018).

1.2. Realidad problemática

La corrosión es un fenómeno que causa la degradación de distintos tipos de materiales. Particularmente, la corrosión del acero de construcción es un problema importante ya que, en la actualidad el acero es el material más utilizado debido a sus buenas propiedades mecánicas y a la gran abundancia del mismo (D'Antino & Pisani, 2018).

En la actualidad, la forma tradicional de construir en Perú es con concreto armado, es decir, el concreto reforzado con barras y estribos de acero. Como se sabe, el concreto tiene una considerable resistencia a cargas de compresión, mientras que el acero a las fuerzas de tracción y corte. Sin embargo, algunas estructuras de concreto armado suelen estar más expuestas que otros con respecto a un ambiente agresivo, como lo es la parte costera de nuestro país, lo que las hace más vulnerables a problemas como la corrosión. Este tipo de efecto afecta considerablemente la resistencia mecánica del elemento, reduciendo su tiempo de vida y su performance con cargas efectuadas al mismo (Bonić, et al, 2015).

En la costa del Perú, el agua de mar es un agente agresivo para el concreto armado ya que contiene niebla marina y sales disueltas que están vinculados con la humedad. Para que exista corrosión deben de participar tres elementos: el metal a corroer, electrolito y el agente corrosivo. Cuando existe una humedad relativa significativa, no por debajo del 60-80% se forma una capa muy delgada de electrolito, ocurriendo la corrosión (Guerra, 2014). En la Figura 1 se muestra una publicación del portal web del Senamhi donde

menciona que Lima alcanzó 100% de humedad relativa (Ministerio del Ambiente, 2019). Es importante destacar esta información debido a que es un factor que aumenta la posibilidad de corrosión en el concreto armado.

Figura 1: Humedad relativa en Lima 2019

Fuente: Ministerio del Ambiente (2019)

La Norma Técnica E050 de Suelos y Cimentaciones del 2016 es la normativa vigente en el Perú. En el artículo 30 de dicha norma se mencionan los tipos de ataque químico en el concreto armado por suelos y aguas subterráneas, entre los cuales se encuentra el ataque por cloruros (Norma E050, 2016).

Cuando la presencia de los agentes agresivos tales como cloruros son mayor a 20000 ppm de forma natural en el agua de mar son potencialmente peligrosos cuando el concreto armado es expuesto a este entorno. La capa que envuelve el acero es destruida por el ion cloruro causando el “picado” del mismo generando su corrosión. No solo se puede encontrar cloruros en el mar, sino en el mismo ambiente salino que es transportado por los vientos y penetra los suelos hasta los elementos de concreto armado (Molina, 2009).

En el caso del ataque por cloruros, para cimentaciones que se encuentran inmersas en el agua mediante el NTP 339.076, si el contenido de ion cloro es mayor a 1000 ppm, se recomienda tomar las medidas de protección necesarias (Norma E050, 2016).

La velocidad de corrosión en un pilote clavado en un suelo marino se puede clasificar en zonas. En la Figura 2 se pueden apreciar las zonas mencionadas, las cuales

son: Zona de Salpicadura (Splash), Zona Intermarea, Zona de Inmersión y Zona lodosa de fondo de mar.

Figura 2: Variación de corrosión vs profundidad de la estructura

Fuente: Moscol (2013)

Como se puede apreciar, en la zona de salpicadura (Splash) se presenta la mayor velocidad de corrosión, debido a que dicha zona se mantiene continuamente mojada por una delgada capa de mar altamente aireada (Moscol, 2013).

Tabla 1: Velocidad de corrosión en estructuras marinas según la profundidad

Ambiente corrosivo	Factores de corrosión	Rating de corrosión [mm/año]
Atmósfera marina	Sodio y cloruros, temperatura, humedad, lluvia y viento	0.05-0.2
Zona Splash	Sodio y cloruros, temperatura, humedad, lluvia y marejada	0.2-0.4
Zona Intermarea	Resistividad del agua, temperatura, marejada e influencia de minerales del agua	0.05-0.2
Zona de Inmersión	Resistividad del agua, temperatura, marejada, corrientes e influencia de agua contaminada	0.1-0.2
Zona lodosa de fondo de mar	Resistividad del suelo, bacterias de corrosión y contaminación	0.03-0.07

Fuente: Moscol (2013)

En la Tabla 1 se muestran las velocidades con la que se corroe las estructuras marinas con respecto a la profundidad en la que están sumergidas. Por lo que se concluye que en la zona de splash se tiene una mayor velocidad de corrosión debido al contacto continuo entre el agua de mar y la atmósfera que favorecen a la reacción química de la corrosión.

En la Figura 3 se puede observar el ataque de cloruros en el acero, el cual es casi imposible de detectar a tiempo ya que provienen del ambiente o de la mezcla de concreto.

Figura 3: Representación del acero al ataque de cloruros

Fuente: Molina (2009)

La corrosión en el concreto se encuentra vinculado tanto a la temperatura como a la humedad. Se conoce que el aumento de temperatura favorece la velocidad de las reacciones químicas, por ejemplo, al aumentar 10°C , la velocidad de reacción se duplica, por tanto, en regiones donde el gradiente térmico es grande, el fenómeno de la corrosión se ve potenciado. En términos de humedad, la corrosión por cloruros se suele dar en entornos con humedad relativa de 70 y 90% (Gonzales, 1998).

El problema de la corrosión trae consigo consecuencias tales como la pérdida de adherencia entre el acero y el concreto, produciendo la incapacidad para transmitir la resistencia a la tracción al concreto, la disminución de la capacidad mecánica del acero generando la reducción de tiempo de vida o menor durabilidad y el probable colapso de la estructura de concreto armado ocasionando pérdidas económicas importantes y pérdidas de vidas humanas (Bonić, et al, 2015).

En 2015, Portilla desarrolló en su tesis de maestría un análisis y evaluación de ataques químicos debido a la brisa marina. En dicha investigación, el autor realiza una

investigación sobre los daños que pueden producir los cloruros y sulfatos contenidos en la brisa marina a las viviendas de material noble en el distrito de Santa Rosa, Provincia de Chiclayo, Lambayeque. En la Figura 4 se puede observar el mapa de ubicación del distrito de Santa Rosa en Lambayeque (Portilla, 2015).

Figura 4: Mapa de ubicación del Distrito de Santa Rosa, Provincia de Chiclayo, Lambayeque

Fuente: Google Maps (2018)

Portilla concluye que la concentración de cloruros en suelos naturales de la ciudad de Santa Rosa es de 1753 ppm, por lo tanto, puede ocasionar daños a las estructuras de concreto armado cimentadas en dicho suelo (Portilla, 2015).

Devoto (2015) desarrolla una investigación en su tesis de pregrado sobre la influencia de las patologías del concreto armado que afectan su durabilidad. Entre estas menciona la brisa marina, la cual puede incluso presentar mayor concentración de cloruros y sulfatos que el agua de mar, debido a la evaporación del agua, especialmente a temperaturas altas y baja humedad relativa. Los cloruros de la brisa marina atacan el acero de refuerzo de las estructuras, lo cual disminuye la resistencia mecánica de estas ante cargas sísmicas (Devoto, 2015).

Alrededor del mundo, los países desarrollados gastan entre \$50-\$100 por cada habitante al año debido al problema de la corrosión y prevención, ya que los efectos pueden ser catastróficas como el colapso de las estructuras y causar pérdidas de vidas humanas (Rosario & Yácono, 2003). Un ejemplo sería el país de EE. UU, que en el año 2016 gastó 2.5 billones de dólares americanos debido a la corrosión, y el país de la India,

que en año 2012 gastó 70.3 mil millones de dólares en reparaciones de estructuras debido al mismo problema (Hinostroza, 2018).

Como ejemplo de costo en reparación debido a la corrosión se tiene el Puerto de Huacho, donde se hizo una evaluación de reparación de los daños de los elementos estructurales y el costo directo de la misma. En la Tabla 2 se muestra el costo parcial por la reparación de los pilotes que componen el Puerto de Huacho, donde el costo directo total por la reparación es de S/. 576,518.14 (Fernández, 2013).

Tabla 2: *Costo parcial por reparación de pilotes del Puerto de Huacho*

REPARACIÓN DE PILOTES	PARCIAL
Mantenimiento de pilotes	S/86,805.30
Pilotes con resina epóxica (con fisuras superficiales)	S/31,963.99
Pilotes con encamisetado (mayores daños)	S/26,839.79
TOTAL	S/145,609.08

Fuente: Fernández (2013)

Frente a esta situación, en diversos países del mundo, se han desarrollado nuevas alternativas de reemplazo de las barras de acero tales como las barras de fibra de vidrio (GFRP), las cuales puedan tener un comportamiento estructural similar al acero empleado (Jabbar & Farid, 2018).

Sin embargo, empezar a utilizar esta tecnología para muchos de los ingenieros de nuestro país no suele ser una alternativa viable, debido a la creencia de ser un material costoso y difícil de trabajar, además de la falta de investigaciones y estudios que demuestren su factibilidad en elementos estructurales. Además, por lo general, se teme al cambio y al tipo de falla, debido a que la estabilidad de la estructura depende mucho del refuerzo estructural que se utilice y que puede verse afectada al cambiar el tipo de refuerzo.

Por este motivo, el alcance de la presente investigación se limita a dar a conocer en profundidad los cambios en el comportamiento estructural que pueden presentarse al reemplazar el tipo de refuerzo de barras de acero por barras de polímero de fibra de vidrio (GFRP) en una sección circular de un elemento estructural expuesto a la corrosión por cloruros. Por lo tanto, se tomará como muestra la sección circular equivalente de un pilote existente y se realizará el análisis de la sección con refuerzo de acero y con refuerzo de GFRP bajo carga axial, flexión y cortante. Posteriormente, se realizará un diagrama momento curvatura con el fin de analizar la ductilidad de la sección para los dos tipos de

refuerzo. Por último, el cálculo de la ductilidad en el pilote cuando se le aplica una carga lateral estática. El procesamiento de datos y cálculo se realizará mediante la herramienta de programación Matlab y Excel. Para el análisis, se asumirá que el comportamiento de los materiales será lineal elastoplástico hasta la falla.

Asimismo, el alcance no contempla el análisis comparativo de costos de construcción y/o reparación de pilotes de concreto armado, ni ensayos experimentales en laboratorio de ningún tipo, ni análisis sísmico dinámico, ni modelamiento computacional alguno.

1.3. Formulación del Problema

¿En qué medida se afectará el comportamiento estructural de una sección circular sometida a carga axial, flexión, corte y cómo afecta a la ductilidad de curvatura al reemplazar las barras de acero por barras de fibra de vidrio (GFRP), con la finalidad de prevenir la corrosión en el acero de refuerzo del concreto armado de pilotes en la costa del Perú?

1.4. Hipótesis

El comportamiento estructural de una sección circular reforzada con barras de fibra de vidrio (GFRP) resiste carga axial, flexión y corte de la misma forma que el acero. A pesar de que la ductilidad de curvatura es menor con barras GFRP, es aún una alternativa viable para emplearlo en un ambiente donde el refuerzo es afectado por la corrosión.

1.5. Objetivo General

Realizar el análisis comparativo de la sección circular de concreto armado reforzado con barras de fibra de vidrio (GFRP) como reemplazo de las barras de acero expuestas a la corrosión.

1.6. Objetivos Específicos

- 1) Comparar los diagramas de interacción uniaxial (nominal y de diseño).
- 2) Comparar la cuantía de refuerzo transversal requerida y la influencia de la carga axial en la resistencia al corte.
- 3) Desarrollar la metodología para construir los diagramas momento-curvatura de la sección sometida a carga axial constante y carga lateral.

- 4) Idealizar los diagramas momento-curvatura para evaluar la ductilidad de curvatura de las secciones analizadas.

1.7. Descripción del Contenido

En la Introducción: Se dará a conocer los antecedentes y la realidad problemática de la corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de concreto armado expuestas al ataque por cloruros. Además, se presenta a las barras de fibra de vidrio como una posible alternativa para reemplazar a las barras de acero. Posteriormente, se formula un problema y se plantea una hipótesis que responde al problema y, finalmente, se presentan el objetivo principal y los objetivos específicos de la presente investigación.

En el Capítulo 1: Marco Teórico, se mencionará un breve resumen histórico de las barras GFRP, sus componentes, características y propiedades mecánicas, las ventajas del GFRP como barras de refuerzo estructural en comparación con las barras de acero y principales aplicaciones de las barras de fibra de vidrio.

En el Capítulo 2: Material y métodos, se define la población y la muestra que se estudiarán a partir de los casos de estudios que se abordan en la presente investigación. Además, se detallan el nivel y diseño de investigación, las variables que se estudiarán, las técnicas e instrumentos de recolección de datos, las técnicas de procesamiento y análisis de datos a emplear para realizar la comparación entre el comportamiento estructural de un pilote reforzado con barras de acero y con GFRP.

En el Capítulo 3: Resultados, se desarrollan 4 objetivos específicos planteados. Para el análisis se utiliza la sección circular equivalente de un pilote existente, de donde se obtuvo la información de la geometría de la sección y la distribución de las barras de refuerzo. En primer lugar, se realiza el análisis de la sección con refuerzo de acero y el mismo con barras GFRP por carga axial y flexión. En segundo lugar, se analiza por corte con refuerzo transversal de espirales de acero y GFRP. En tercer lugar, se elaboran los diagramas momento-curvatura de las secciones sometidas a carga axial constante y carga lateral con refuerzo de acero y GFRP. En 4to lugar, se idealizan dichos diagramas para determinar la ductilidad de las secciones.

En el Capítulo 4: Conclusiones, se realizará el análisis y comparación de los resultados obtenidos entre ambos tipos de refuerzo estructural para elaborar las conclusiones.

En el Capítulo 5: Recomendaciones, se brindarán sugerencias sobre el análisis y diseño entre ambos tipos de refuerzo estructural encontradas a lo largo del desarrollo del informe.

2. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se expone la información teórica del GFRP como su historia, clasificación, propiedades mecánicas, ventajas respecto del acero y las metodologías existentes de análisis y diseño de la solución propuesta a la problemática.

2.1. Resumen Histórico

Los primeros usos de polímeros reforzados con fibra (FRP, Fiber Reinforced Polymer en inglés) datan del año 1800 A.C., cuando se reforzaron ladrillos de barro con paja en la construcción. A partir de 1931, la fibra de vidrio fue introducida en el mercado para ser usada en filtros de aire. Sin embargo, el FRP de fibra de vidrio nació en 1942, cuando una cantidad de resina de poliéster termoestable catalizada fue vertida accidentalmente sobre telas de fibra de vidrio y se mantuvieron en contacto hasta el día siguiente. Diez años después, en 1952 se empiezan a producir a gran escala bandejas de pan hechas con un material reforzado con fibra de vidrio y al año siguiente, se empiezan a distribuir los primeros autos deportivos cuyo chasis estaba hecho con FRP. Finalmente, en 1970 fue cuando los FRP empiezan a emerger como una alternativa de solución en el contexto de la construcción como barras de refuerzo en estructuras y siete años más tarde, Certain Teed apertura una enorme fábrica de fibra de vidrio en Texas, USA (De La Cruz, 2004).

2.2. Componentes del GFRP

El Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio (GFRP) es un material compuesto por una matriz de resina de poliéster que funciona como aglomerante para el refuerzo, el cual viene a ser la fibra de vidrio. A continuación, se describen los elementos mencionados previamente.

2.2.1. Resina de Poliéster

Las resinas son plásticos compuestos mayormente por moléculas gigantes y en menor porcentaje otras de bajo peso molecular, por lo que se le considera como un material de alto peso molecular. Las moléculas de bajo peso molecular mencionadas están compuestas por C, H, O y N, y a estas estructuras se les llama monómeros. Cuando estos monómeros se agrupan en forma lineal, entrecruzada o ramificada y se repiten en una estructura bien definida, se les pasa a denominar polímeros. La cantidad de veces que se repite un monómero dentro de un polímero define su grado de polimerización, el cual

dependiendo de qué tan alto o bajo sea puede conformar materiales en forma de líquidos o sólidos a temperatura ambiente. En la Figura 5 se muestran ejemplos de la estructura de un polímero, donde R representa a un monómero. (Navarro, 2006).

Figura 5: Tipos de Estructuras de Polímeros

Fuente: Navarro (2006)

La polimerización se puede dar de dos formas: por adición, a partir de la cual se puede obtener polietileno y poliestireno, mientras que, por condensación es posible obtener los poliésteres. Normalmente a estos polímeros se les conoce como resinas sintéticas, con el fin de poder diferenciarlas de aquellas presentes en la naturaleza como el ámbar (Navarro, 2006).

Los plásticos que conforman las resinas sintéticas son obtenidas a partir de derivados de petróleo o gas natural y pueden clasificarse en dos grupos después de ser calentados: termoplásticos, los cuales al elevar la temperatura se ablandan y posteriormente al enfriarse regresan a su estado inicial, además dicho proceso es reversible como en el caso del PVC, polietileno y polipropileno; y los termoestables, los cuales al calentarse están en estado líquido, las cuales al enfriarse se solidifican y ya no puede revertirse el proceso como en los termoplásticos, ya que se carbonizan (Navarro, 2006).

Las resinas sintéticas, además, pueden clasificarse por tipos: Resinas de Poliéster, Epoxy y Viniléster. El tipo de resina usado para la fabricación de barras de GFRP es la resina de poliéster. La resina de poliéster puede ser de tipo saturado o insaturado, donde el primero se usa mayormente en materiales textiles, mientras que el segundo es usado para la fabricación de barras de fibra de vidrio y, por lo tanto, son las más usadas en la industria de la construcción y la de mayor interés. A continuación, se muestra en la Figura 6 la estructura química de la resina poliéster insaturada, en la cual se puede observar que está compuesta por poliéster insaturado y estireno monómero (Navarro, 2006).

Figura 6: Estructura química de la resina poliéster insaturada

Fuente: Navarro (2006).

La resina de poliéster insaturado es un plástico termoestable que se suele agregar en estado líquido a otros productos para, de esta forma, poder conformar un compuesto en estado sólido y no revertir el cambio de estado físico. Dicho material no requiere una gran presión para moldearlo y permite obtener diferentes formas y posee gran resistencia a ambientes químicos agresivos, además cuentan con una considerable resistencia a la compresión y a las altas temperaturas. Sin embargo, son muy rígidas y no resisten esfuerzos de tracción ni flexión (Bendezú, 2002).

2.2.2. Fibra de Vidrio

La fibra de vidrio es un material inorgánico natural que se obtiene al filtrar el vidrio fundido en una pieza con agujeros muy finos verticalmente hasta que este se vuelve sólido y tiene la suficiente flexibilidad para poder usarse como fibra. A diferencia de la resina de poliéster, posee una alta resistencia a la tracción y es dicha fibra la que provee al conjunto de GFRP la mayoría de sus propiedades mecánicas (Bendezú, 2002).

Existen diversos tipos de fibra de vidrio, en la Tabla 3 se muestran algunos de estos tipos con su respectiva descripción y propiedades mecánicas.

Tabla 3: Tipos de fibra de vidrio y sus principales propiedades

Tipo de Fibra	Descripción	Peso específico (g/cm ³)	Resistencia a la tracción (GPa)	Modulo de Young (GPa)	Elongación	Coefficiente de expansión térmica (10 ⁻⁷ /°C)
E	Es el tipo más usado en las industrias de polímeros reforzados compuestos debido a su alta resistencia, alta resistividad eléctrica y estar libre de álcalis.	2.58	3.445	72.3	4.8	54
C	Se caracteriza por su alta resistencia a la corrosión debido a su componente de borosilicatos de calcio. Es usado mayormente en ambientes ácidos corrosivos.	2.52	3.310	68.9	4.8	63
S	Su característica principal es su alta resistencia, por lo que suele ser usado donde se requiere alta resistencia mecánica, rigidez, resistencia a la corrosión y resistencia a temperaturas extremas.	2.46	4.890	86.9	5.7	16
A	Vidrio alcalino hecho con silicato de cal soldada. Es usado donde no se requiere resistividad eléctrica del tipo E como envases o ventanas.	2.44	3.310	68.9	4.8	73
D	Posee baja constante dieléctrica, por lo que es usado en aplicaciones eléctricas.	2.11-2.14	2.415	51.7	4.6	25
R	Reforzada con el fin de ser más resistente a la corrosión y mayor resistencia.	2.54	4.135	85.5	4.8	33
EGR	Este tipo es una fibra tipo E modificada con el fin de tener más resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y a la conductividad eléctrica.	2.72	3.445	80.3	4.8	59
AR	Altamente resistente a los álcalis ya que poseen silicato de zirconio. Principalmente usado como sustrato al cemento Portland.	2.70	3.241	73.1	4.4	65

Fuente: Sathishkumar et al. (2014)

Según la norma ASTM D 578, la fibra usada en barras de GFRP es la de tipo E, la cual se compone principalmente por óxidos de calcio, aluminio y silicón. Además, posee una alta resistencia a la tracción, gran elasticidad, considerable resistencia al fuego, agua, a la corrosión y a la intemperie (Navarro, 2006).

Es bastante conocido que el vidrio convencional que se usa en la construcción tiene malas propiedades mecánicas, sin embargo, cuando este se encuentra en forma de

fibras, su comportamiento es completamente diferente. Mientras que, en forma de masa, el vidrio puede en algunos casos presentar una resistencia de 7 Kg/mm², en forma de fibra este puede llegar a 1000 Kg/mm² (Navarro, 2006).

Entre las principales propiedades de la fibra tipo E se pueden mencionar:

- Dependiendo del diámetro de la fibra, la resistencia a la tracción oscila entre 30 y 1000 kg/mm² para un peso específico de entre 2.45 y 2.58 g/cm³ a 25°C.
- Su elongación está en rango elástico está entre 2% y 3%.
- El módulo de elasticidad de 7000 kg/mm² aproximadamente.
- Puede soportar temperaturas de hasta 200°C sin presentar deterioro.
- Altamente resistente a la corrosión.
- Gran resistencia a la humedad.
- Es un material dieléctrico, es decir, un aislante eléctrico.

Cabe resaltar que estas propiedades son de las fibras de vidrio, más no del GFRP, que está compuesto por fibra de vidrio y resina de poliéster insaturada, por lo que estas propiedades mecánicas pueden diferir un poco cuando ambos materiales trabajan en conjunto.

2.3. Características y Propiedades Mecánicas del GFRP

Entre las principales características que presenta el GFRP se puede mencionar:

- Alta resistencia a la corrosión, debido a su composición química no presenta metales que sean afectados por óxidos u otros químicos agresivos, por lo tanto, la durabilidad de este material es alta.
- La adherencia que existe entre las fibras de vidrio y la matriz de resina de poliéster es fuerte, por lo tanto, funcionan como un mismo sistema sin deslizarse una respecto de otra.
- Es un material dieléctrico, es decir, es un aislante eléctrico. Debido a dicha característica es bastante utilizada en la industria eléctrica.
- Es incombustible ante la acción del fuego.
- Presenta una buena relación costo-desempeño en comparación de otros tipos de FRP existentes en el mercado.
- Presenta un comportamiento lineal elástico hasta la falla, es decir, su ductilidad es muy baja por lo que no permite deformaciones en el rango plástico.

- Por lo general, no se ve afectado significativamente ante cambios de temperatura, sin embargo, a partir de los 200°C, se empieza a producir una notable pérdida de resistencia.

Las propiedades mecánicas del GFRP depende exclusivamente de la cantidad de fibra de vidrio que existe en la varilla. Las barras pueden contener fibra de vidrio entre el 50 y 80 por ciento de su peso, lo que genera que su densidad se encuentre entre 1.6 y 2 gramos por centímetro cúbico, con un módulo de elasticidad entre 20 y 55 GPa y una resistencia a la tracción de 400 hasta 1800 MPa (Faizan & Shariq, 2018). Además, en la Figura 7, se puede observar una aproximación del comportamiento lineal elástico de algunos tipos de FRP que no presentan ductilidad a diferencia del acero.

Figura 7: Diagrama esfuerzo - deformación del acero y algunos tipos de FRP

Fuente: Faizan & Shariq (2018)

En general, los FRP son mayormente usados en elementos en los cuales es más importante la resistencia a la tracción. En cambio, no suelen ser usados para cargas de compresión, debido a su baja resistencia en dichas condiciones, que puede variar entre el 40 y 60% de su resistencia a la tracción. También, exhiben un comportamiento lineal elástico en compresión y su resistencia puede variar entre 40 y 55 GPa (Faizan & Shariq, 2018).

Su comportamiento a flexión es bastante adecuado, debido a la gran adherencia y unión mecánica que existe entre las barras y el concreto, y la distribución de las grietas es uniforme sobre la superficie del elemento. Además, el bajo módulo de elasticidad que

presenta este material es la principal causa de que el ancho de las grietas sea mayor en comparación del concreto reforzado con acero. Sin embargo, al aumentar la cantidad de refuerzo, el ancho de las grietas disminuye significativamente (Faizan & Shariq, 2018).

2.4. Ventajas del GFRP como barras de refuerzo estructural

Tradicionalmente, los elementos de concreto armado están constituidos por concreto de cemento Portland y refuerzos de barras de acero. Asimismo, la resistencia a la compresión está soportada por el concreto, en cambio, resistir las cargas de tracción y corte es función de las barras de acero colocadas dentro del concreto (Jabbar S., 2018).

Sin embargo, el problema de la corrosión vulnera el tiempo de vida y comportamiento estructural del refuerzo de acero, y soluciones como recubrimiento de las barras no son viables económicamente (Jabbar S., 2018). Es por ello, que el empleo de tecnologías novedosas resistentes a la corrosión como barras GFRP han sido estudiadas. Se han realizado diversas pruebas para analizar las características mecánicas de barras GFRP en comparación de barras de acero, donde se obtuvo como resultado lo siguiente:

Figura 8: Curvas de resistencia a la tracción de varilla GFRP y varilla de acero

Fuente: Jabbar (2018)

En la Figura 8, se emplearon las normas ASTM D7205-06 para las barras de refuerzo GFRP y ASTM A496-02 para las barras de refuerzo de acero. La gráfica se obtuvo de muestras de 25 cm de longitud y 1,25 cm de diámetro, donde se puede observar que la resistencia a la tracción de la varilla GFRP es alta, sobrepasando en un 13% a la varilla de acero. Además, la deformación de la varilla GFRP se deforma en un 58% más que el acero (Jabbar S., 2018).

Figura 9: Curvas de resistencia a la flexión de varilla GFRP y varilla de acero

Fuente: Jabbar (2018)

En la Figura 9, se midió según la norma ASTM D790 para la varilla GFRP y acero, utilizando las mismas muestras mencionadas líneas arriba. Se muestra la diferencia notoria entre GFRP y acero, donde el punto más elevado de esfuerzo es equivalente al esfuerzo que se genera en la grieta y este disminuirá, pero la grieta se ampliará hasta el momento de la falla. El inicio de la falla es de 16.21% para el acero en tracción y 20.23% para GFRP, por lo que resulta como más tiempo de alerta antes de ocurrir la falla el empleo de barras GFRP (Jabbar S., 2018).

Lo más relevante de ambas gráficas es que las barras de acero incursionan en el rango plástico antes de ocasionar la falla, en otras palabras, poseen ductilidad. En cambio, las barras GFRP mantienen un comportamiento elástico lineal hasta la rotura (Escamilla L. & Loza J., 2004).

Otra diferencia es que las barras GFRP son anisótropas, quiere decir que el eje fuerte será siempre en dirección de las fibras de vidrio por lo que no tiene las mismas

características en sus otras direcciones. Por otro lado, las barras de acero son isotrópicas, donde sí posee las mismas características en todas sus direcciones. A continuación, en la Tabla 4 se muestran algunas de las propiedades mecánicas de las barras GFRP y acero.

Tabla 4: Principales propiedades mecánicas de las barras GFRP y Acero

	ESFUERZO A TENSIÓN			MÓDULO DE ELASTICIDAD		
	MPa	kg/cm ²	ksi	GPa	kg/cm ²	10 ³ ksi
GFRP	480-900	4925.9-9148.1	710-130	40.8	416600	5.92
ACERO	483-690	4200-7037	70-100	200	2100000	29

Fuente: Escamilla & Loza (2004)

Además, se presenta en la Tabla 5, las propiedades físicas de ambas barras, donde se concluye que, frente a elevadas temperaturas, las barras GFRP se dilatan menos que las barras de acero. También, la densidad de las barras GFRP es menor que la densidad del acero, lo que resulta a un peso entre la cuarta o quinta parte de la del acero (Escamilla L. & Loza J., 2004).

Tabla 5: Principales propiedades física de las barras GFRP y Acero

		COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA		DENSIDAD	
		CTE x 10 ⁻⁶ /°C	CTE x 10 ⁻⁶ /°F	kg/cm ³	lb/in ³
GFRP	α L	3.3-5.6	6-10	0.00258	161
	α T	11.7-12.8	21-23		
ACERO	α L	6.5	11.7	0.0078	486.67
	α T	6.5	11.7		

Fuente: Escamilla & Loza (2004)

Según la guía de diseño del comité 440 del ACI, para el diseño con barras GFRP se permiten dos tipos de fallas. La primera consiste en que la falla se debe a la fractura antes de las barras GFRP y luego el aplastamiento del concreto. La segunda es debido al aplastamiento del concreto y luego la rotura de las barras GFRP, la cual parece falla frágil, pero los factores de seguridad que se aplican en el diseño lo controlan (Comité 440 ACI, 2015). Por ello, se recomienda que la falla sea por aplastamiento de concreto. Por otro lado, para el diseño con barras de acero se utilizan tres criterios de falla. La primera es falla dúctil, cuando el acero fluye y luego el elemento de concreto armado colapsa. La segunda es la falla frágil, la cual ocurre cuando el elemento está sobre reforzado y colapsa antes de que el acero fluya. Por último, la falla balanceada, cuando se alcanza la

resistencia del elemento en el mismo instante que el acero fluye. Por lo tanto, cuando se diseña con acero se busca alcanzar una falla dúctil. (Escamilla L. & Loza J., 2004).

Tabla 6: Principales características de las barras GFRP y barras de acero

	BARRA GFRP	BARRA ACERO
Tipo de material	Compuesto anisótropo	Material isotrópico
Flexión	Falla por aplastamiento del concreto	Falla dúctil
Agrietamiento	Se permite mayor agrietamiento teniendo un máximo de 0.07cm	Máximo permitido 0.04cm
Deflexiones	No se toma en cuenta el refuerzo a compresión	Se toma en cuenta el acero a compresión
Cortante	Disminución en la resistencia en los dobleces	Misma resistencia en los dobleces

Fuente: Escamilla & Loza (2004)

En la Tabla 6, se muestra algunas de las diferencias entre las barras de GFRP y barras de acero que se deben tomar en cuenta durante el diseño.

Con respecto a la adherencia entre el refuerzo GFRP y el concreto, esta se produce similar a la del acero con el concreto. Esta unión depende del módulo elástico, la deformación de la superficie y la forma de la varilla. La diferencia entre la adhesión de GFRP y acero es que no es necesario desarrollar la resistencia total de la varilla GFRP, como por ejemplo la capacidad a la flexión está monitoreada por el aplastamiento del concreto y el esfuerzo de tracción requerida en la varilla es menor que su resistencia máxima garantizada (Comité 440 ACI, 2015).

Si se tuviera un elemento de concreto armado reforzado con acero, las fisuras serían de gran preocupación con respecto a la durabilidad de la estructura. En cambio, para el concreto armado reforzado con barras GFRP se puede pasar por alto ya que no se ocasionará corrosión y deterioro del concreto. Además, para asegurar una mejor adherencia GFRP y concreto, se aconseja el recubrimiento de las barras con arena cuarzosa o chorros de arena (De la Cruz C., 2004).

Otro punto importante que considerar son las formas particulares como los estribos o elementos curvos con barras GFRP. Diversos estudios han demostrado que la resistencia a la tracción disminuye en un 60% en elementos curvos a comparación de un elemento recto. Además, todas estas barras GFRP dobladas deben ser producidas en fábrica (Comité 440 ACI, 2015).

También, la longitud de los empalmes cuando se trabaja con barras GFRP, se aconseja una longitud igual a 40 veces el diámetro de las barras. A diferencia del acero,

donde se utiliza una longitud de empalme de 30 veces su diámetro (Comité 440 ACI, 2015).

2.5. Aplicaciones en estructuras existentes

En Canadá existe un amplio aumento del uso de las barras GFRP en construcciones de concreto armado especialmente en muros de contención, losas y vigas de puente. Actualmente existen unas 200 construcciones con barras GFRP en este país (Comité 440 ACI, 2015).

Figura 10: Colocación de barras de GFRP en la losa del puente de Salem, Ohio

Fuente: Comité 440 ACI (2015)

En la Figura 10 se muestra el puente de la Avenida Salem en Ohio (1999), donde se observa la colocación de las barras GFRP en la losa del puente.

Figura 11: Paneles prefabricados con GFRP en Emma Park Bridge, Iowa

Fuente: Comité 440 ACI (2015)

En la Figura 11 las barras GFRP fueron utilizadas para los paneles prefabricados de cubierta de hormigón en Emma Park Bridge.

Ambas construcciones tienen aproximadamente más de 10 años de haber sido realizadas y no se ha reportado ningún signo de deterioro en el refuerzo.

Figura 12: Puente Floodway, Winnipeg, Canadá

Fuente: Malnati (2011)

En la Figura 12 se observa el puente Floodway, Canadá, donde todos los elementos de concreto armado que se encuentran sobre las vigas del puente están reforzadas con barras GFRP.

Figura 13: Puente 18th Street en Brandon, Manitoba, Canadá

Fuente: Malnati (2011)

En la Figura 13 se muestra el puente 18th Street ubicado en Canadá donde la cubierta del puente está reforzada con barras GFRP.

Figura 14: Miami-Dade MetroRail

Fuente: Malnati (2011)

En la Figura 14 se muestra el carril del metro de Miami, el cual transporta carga pesada (pasajeros con equipaje) desde el Aeropuerto Internacional de Miami. La cubierta del metro es la que se encuentra reforzada con barras GFRP para asegurar la durabilidad, reducir costos de mantenimiento y de reparación.

2.6. Costo de construcción de diversos elementos estructurales reforzados con barras GFRP

En el año 2006, Berg et al. realizaron una construcción y análisis comparativo de costo para la cubierta de un puente ubicado en Winsconsin, EE. UU, reforzado con barras de GFRP y acero. Resultó que el costo en materiales de la cubierta reforzada con GFRP sobrepasó en un 60% al del acero. Además, se obtuvo un ahorro del 57% en mano de obra en la construcción de la cubierta del puente reforzado con GFRP siguiendo con la tecnología convencional a comparación de uno realizado con acero (Berg et al., 2006).

En el año 2015, Brown realizó un análisis de costos en un elemento de concreto reforzado con barras GFRP y otro de acero sometidos a compresión donde menciona que el peso ligero de las barras GFRP permite un 20% de reducción en la utilización de horas hombre a comparación del acero. En la Tabla 7 se muestra el costo de ambos tipos de refuerzo, donde se puede analizar que las barras longitudinales GFRP por metro cuestan 15% más que las barras de acero, y la fabricación de estribos GFRP es de 26% más que el de acero.

Tabla 7: Costo del material GFRP VS Acero

	GFRP	ACERO	EXCEDENCIA
Barras Longitudinales	S/. 5.45 por metro	S/. 4.62 por metro	15%
Estribos	S/.7.62 por estribo	S/.5.60 por estribo	26%

Fuente: Brown (2015)

En el año 2016, Ahmed et al. realizaron el diseño y construcción de las losas de concreto armado con GFRP del estacionamiento de La Chancelière en Québec, Canadá. El análisis de costos del proyecto comparando el refuerzo con GFRP y acero se diferenció debido a que el diseño con GFRP se optimizó reemplazando la capa de impermeabilización y asfalto del garaje con una película de poliuretano, el cual impactó significativamente en el costo total haciendo que el diseño con GFRP sea incluso menor que el de acero a pesar del elevado costo de las barras de polímero. Además, otra diferencia fue el tiempo de construcción estimado, donde la losa reforzada con GFRP se estimó 6 860h en comparación de 7 700h de la losa reforzada con acero (Ahmed et al., 2016).

2.7. Consideraciones para control de calidad para la construcción

Las barras de FRP son más susceptibles a sufrir daños en la superficie, lo cual podría ocasionar que se reduzca la resistencia y la durabilidad de esta. Por lo tanto, durante la manipulación, almacenamiento y colocación, se debe tener incluso mayor cuidado que con el acero convencional (Zoghi, 2013).

Es importante tomar en cuenta ciertas consideraciones durante el proceso constructivo para garantizar que la estructura pueda desarrollar la resistencia con la que fue diseñada.

Es recomendable que las barras de FRP no sean colocadas en la tierra, tampoco estar expuestas a altas temperaturas, sustancias químicas o rayos ultravioleta por tiempo prolongado. Para el corte de las barras se debe utilizar un equipo especial como cortador de alta velocidad o sierra de hoja fina. Cualquier extremo cortado debe protegerse con una capa de resina u otros métodos aprobados (Zoghi, 2013).

Figura 15: Vaciado de concreto de losa con GFRP

Fuente: Nanni (2014)

Debido a su baja rigidez y densidad, el refuerzo de FRP debe estar bien asegurado y apoyado con dados u otro tipo de soporte durante el vaciado in situ, con la finalidad de evitar desplazamientos excesivos, es decir, el refuerzo de FRP puede flotar o doblarse excesivamente durante el vaciado, tal como se puede apreciar en la Figura 15, donde las barras no presentan deflexiones excesivas. Es necesario el uso de un vibrador de plástico en lugar de un vibrador convencional para el vibrado de concreto. La flexión de las barras

de FRP generalmente debe realizarse antes de que la resina esté completamente curada (Zoghi, 2013).

El rendimiento de un elemento de concreto con barras de refuerzo FRP bajo fuego depende de la temperatura que experimentan dichas barras. Cuando la superficie de una barra de FRP es expuesta al fuego, cuando se acerca a la temperatura de transición vítrea (T_g) de la matriz de resina, la resina comienza a descomponerse y finalmente no puede transferir las esfuerzos del concreto al refuerzo debido a la pérdida de unión entre la resina de FRP y el concreto que la rodea. Cuando la temperatura de la barra excede dicha temperatura, las fibras individuales aún pueden resistir esfuerzo transferidos del concreto si tiene unión adecuada en las zonas no expuestas al fuego. El colapso del elemento ocurre cuando la temperatura de las fibras alcanza su temperatura crítica. El comportamiento de las barras de FRP en condiciones de incendio se ve afectado por varios parámetros como tipo de fibra, tipo de matriz, diámetro de barra, fracción de volumen de fibra, proceso de fabricación y tratamiento de superficie. Las barras CFRP y GFRP cuando se prueban en tensión bajo temperaturas cercanas a T_g , es decir, aproximadamente 65 a 120 ° C, las cuales experimentan una pequeña reducción en la resistencia a la tracción y el módulo elástico, mientras que, se alcanza una reducción superior al 50% a temperaturas superiores a aproximadamente 325 ° C y 250 ° C para GFRP y CFRP, respectivamente (Nanni, 2014).

Figura 16: Estribos y espirales cerrados de GFRP

Fuente: Nanni (2014)

Los estribos o espirales de GFRP no pueden ser formado a partir de las barras de GFRP. Existen dos métodos con los cuales se obtienen los estribos, el primer método dichos estribos pueden ser fabricados con las dimensiones con una forma cerrada como se observa en la Figura 16, mientras que, el segundo método se puede fabricar las barras con la curvatura necesaria para luego poder colocarla como refuerzo transversal (ATP, 2006).

3. MATERIAL Y MÉTODOS

En el presente capítulo se detalla la población y la muestra, el cual abarca el caso de estudio elegido para el desarrollo de la tesis. Además, se expone el nivel y diseño de investigación, las variables de estudio y operacionalización, técnicas e instrumentos de recolección de datos y las técnicas de procesamiento y análisis de datos.

3.1. Material

3.1.1. Población

La población que se aborda en la presente investigación son aquellas estructuras ubicadas a lo largo de la costa del Perú, cuyos elementos estructurales apoyados sobre suelos marinos, que están sujetos a carga axial, flexión y corte, presentan alta probabilidad de corrosión en la zona de salpicadura o splash de ataque por cloruros.

3.1.2. Muestra

La muestra es la sección de uno de los pilotes del proyecto “Puerto Pesquero Artesanal de Huacho”. La ubicación de dicho muelle es la ciudad de Huacho, a 130 Km de la ciudad de Lima, provincia de Huaura, departamento de Lima. Dicho proyecto está conformado por dos partes, el puente de acceso y el muelle, el primero tiene 88 m de largo y 4.20 m de ancho, mientras que el segundo tiene 49.50m de largo y 8.00m de ancho en la cual se apoya una losa de concreto armado de 40cm de espesor sobre vigas cabezales, la cuales a su vez se apoyan sobre pilotes de sección cuadrada de 35 cm (Fernández, 2013).

Debido a que la sección del pilote es cuadrada de 35 cm, se realizará la conversión respectiva para analizar una sección circular que sea similar en área bruta, área de acero y resistencia axial nominal. Para el análisis se utilizará la sección circular determinada previamente, donde la resistencia a la fluencia del acero de grado 60 es 4200 Kg/cm^2 y la resistencia a la compresión del concreto en los pilotes es 350 Kg/cm^2 (Fernández, 2013).

Figura 17: Sección cuadrada transversal del pilote existente

Fuente: Fernández (2013)

Tabla 8: *Tabla de datos de la sección cuadrada*

Ast(cm ²)	Ag(cm ²)	Pn(ton)
31.67	1225	488.03

Fuente: Propia

Figura 18: Sección transversal del pilote propuesta

Fuente: Propia

Tabla 9: *Tabla de datos de la sección circular*

Ast(cm ²)	Ag(cm ²)	Pn(ton)
27.71	1256	481.99

Fuente: Propia

En la Figura 17 se muestra la sección cuadrada del pilote existente. Asimismo, en la Tabla 8 se muestra los datos de la sección, tales como área de acero (Ast), área bruta de la sección (Ag) y la resistencia axial nominal para carga concéntrica (Pn). De igual manera, en la Figura 18 y la Tabla 9, se muestra la sección circular propuesta y los datos de esta, respectivamente. Adicionalmente, el recubrimiento de los pilotes es de 6 cm, pero para el análisis se tendrá en cuenta lo establecido por la NTP E060, en la cual establece que el mínimo es de 7.5cm (3 pulgadas). De acuerdo con lo mencionado previamente, ambas sección tienen aproximadamente la misma resistencia mecánica a la carga axial, por lo que se procederá a trabajar con la sección circular propuesta para el análisis.

3.2. Método

3.2.1. Nivel de Investigación

El nivel de la investigación es descriptivo, puesto que se espera poder caracterizar el impacto en el comportamiento que puede ocasionar el reemplazo de las barras de acero

convencional por barras de polímero de fibra de vidrio en pilotes de concreto armado expuesto a ambiente marino.

3.2.2. Diseño de Investigación

La estrategia de la presente investigación es documental, debido a que se basa en la obtención y análisis de datos provenientes de materiales impresos u otros tipos de documentos.

3.2.3. Variables de Estudio y Operacionalización

En la Tabla 10 se muestran las variables de estudio con su respectiva dimensión, indicador, unidad de medida e instrumento de investigación.

Tabla 10: *Variables de Estudio*

Variable	Dimensión	Indicador	Unidad de Medida	Instrumento de investigación
Dependiente (VD): Cuantía requerida	ρ : Cuantía requerida	Cuantía necesaria dependiente de la carga última y de momento último.	Toneladas	Programación en Matlab
Independiente (VI): Carga axial última	P_u : Carga última	Carga última transmitida de la super estructura al pilote.	Toneladas	Modelamiento en Software Etabs
Independiente (VD): Momento último	M_u : Momento último de flexión	Momento último transmitida de la super estructura al pilote.	Toneladas-metro	Modelamiento en Software Etabs
Dependiente (VD): Curvatura	Φ : Curvatura	Angulo de curvatura debido a deformaciones.	Radianes	Metodologías propuestas en artículos científicos
Dependiente (VD): Deflexión	θ_i : Deflexión	Efecto no lineal de una gran fuerza de tracción o compresión en el comportamiento de flexión del elemento estructural.	Centímetros	Programación en Matlab

Fuente: Propia

3.2.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Técnica:

- Análisis de diagrama de interacción.
- Análisis de diseño por corte.
- Análisis de diagrama momento-curvatura.

Instrumentos:

- Metodologías de diseño planteados en artículos científicos.
- Metodologías de diseño ACI 318-14 y ACI 440 R1-15.

3.2.5. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos

- Desarrollo de plantillas en Excel.
- AutoCad 2018.
- Programación en Matlab.

4. RESULTADOS

En el presente capítulo se analiza la información existente sobre metodología de análisis de una sección circular por combinación de carga axial, flexión y corte para ambos tipos de refuerzo. Además, se analiza la ductilidad de la sección con dos tipos de refuerzo mediante el diagrama momento curvatura y el análisis de segundo orden de momento curvatura para cargas excéntricas considerando la deflexión debido a la altura media del pilote.

4.1. Metodología para diseño por combinación de carga axial y flexión

4.1.1. Diseño con barras de acero

Para el diseño de una sección que soporta una carga axial y un momento debido a una excentricidad, la metodología más común para diseñar una sección bajo estas condiciones es mediante el desarrollo de un diagrama de interacción, el cual establece una relación entre la resistencia a la compresión y a la flexión nominal o de diseño, para lo cual se establecen los siguientes pasos.

En primer lugar, la resistencia nominal a la compresión para elementos no preesforzados, en el cual el momento es cero, se calcula mediante las ecuaciones 3.1 y 3.2 para refuerzo transversal con espirales y con estribos respectivamente.

$$P_n = 0.85 * 0.85f'_c(A_g - A_{st}) + A_{st}f_y \quad 3.1$$

$$P_n = 0.80 * 0.85f'_c(A_g - A_{st}) + A_{st}f_y \quad 3.2$$

Donde:

A_g : Área de la sección transversal del elemento.

A_{st} : Área de acero longitudinal de la sección transversal.

f'_c : Esfuerzo de compresión del concreto.

f_y : Resistencia a la fluencia del acero.

P_n : Resistencia nominal a la compresión.

Para la resistencia de diseño a la compresión es necesario tener en cuenta el factor de reducción ϕ , cuyo valor se muestra en la Tabla 11, en la cual se observa que depende de la deformación unitaria del elemento ϵ y varía dependiendo del tipo de refuerzo transversal.

Tabla 11: Factor de Reducción de Resistencia

Deformación unitaria ϵ	Clasificación	ϕ	
		Tipo de refuerzo transversal	
		Espirales	Otros
$\epsilon < \epsilon_y$	Controlado a compresión	0.75	0.65
$\epsilon_y < \epsilon < 0.005$	Transición	$0.75 + 0.15(\epsilon - \epsilon_y)/(0.005 - \epsilon_y)$	$0.65 + 0.25(\epsilon - \epsilon_y)/(0.005 - \epsilon_y)$
$\epsilon > 0.005$	Controlado a tensión	0.9	0.9

Fuente: Comité ACI 318 (2014)

Donde:

ϵ : Deformación unitaria

ϵ_y : Deformación unitaria neta en el extremo de la capa del refuerzo longitudinal en tensión.

Con el factor de reducción de resistencia, se calcula la resistencia de diseño ϕP_n a la compresión mediante el producto de dicho factor y la resistencia nominal a la compresión. Para el caso en el que solo actúa carga axial, se considera dicho factor igual a 0.75 y 0.65 para espirales y estribos, respectivamente.

En segundo lugar, para la resistencia nominal a la tracción de un elemento de concreto armado, se desprecia la resistencia a la tracción del concreto y se considera solamente la resistencia del refuerzo. Entonces, la resistencia nominal a la tracción se calcula mediante la Ecuación 3.3.

$$T_n = A_{st} f_y \quad 3.3$$

Donde:

A_{st} : Área de acero longitudinal de la sección transversal.

f_y : Resistencia a la fluencia del acero.

T_n : Resistencia nominal a la tracción.

En tercer lugar, a partir de la relación entre carga axial y momento, es necesario calcular el punto balanceado, en el cual la combinación de resistencia a la flexión y a la compresión poseen su valor más alto y define la zona de falla al a compresión y a la tracción. En la Figura 19, se puede observar las zonas de compresión y tracción separadas por la recta que parte del origen al punto balanceado.

Figura 19: Zonas de falla de en un diagrama de interacción

Fuente: McCormac & Brown (2011)

Según el método de Whitney, la fuerza de compresión en la sección de concreto armado se distribuye uniformemente una longitud de “a”, la cual se encuentra en función a la longitud “c”. En la Figura 20, se puede observar lo asumido según el método de Whitney en cuanto a la distribución del esfuerzo de compresión del concreto y otros parámetros.

Figura 20: Distribución de esfuerzos en una sección según el Método de Whitney

Fuente: McCormac & Brown (2011)

Donde:

- a : Profundidad del bloque equivalente rectangular de tensión.
- A_s : Área de acero longitudinal de la sección transversal.
- c : Punto balanceado
rectangular equivalente con la profundidad del eje neutro.
- f'_c : Esfuerzo de compresión del concreto.
- f_y : Resistencia a la fluencia del acero.
- T : Resistencia nominal a la tracción.
- β_1 : Factor que relaciona la profundidad del bloque de esfuerzo de compresión

El punto balanceado se da cuando el concreto y el acero alcanzan su deformación unitaria máxima. En la Figura 21, el punto balanceado cuando el concreto alcanza la deformación unitaria última ($\epsilon_{cu} = 0.003$ ó 0.004) y la deformación de fluencia del acero ($\epsilon_{fy} = 0.0021$).

Figura 21: Punto Balanceado en una Sección

Fuente: McCormac & Brown (2011)

Donde:

- A_s : Área de acero longitudinal de la sección transversal.
- b : Ancho del alma de la sección.
- c : Distancia al eje neutro desde la fibra superior en compresión.
- c_b : Distancia balanceada.
- d : Peralte de la sección del elemento.
- E_s : Módulo de elasticidad del refuerzo longitudinal de acero.
- f_y : Resistencia a la fluencia del acero.

- ε_{cu} : Deformación unitaria última ($\varepsilon_{cu} = 0.003$).
- ε_y : Deformación unitaria neta en el extremo de la capa del refuerzo longitudinal en tensión.

El valor de “c” en el punto balanceado se convierte en c_b y se calcula mediante la Ecuación 3.4. Una vez calculado dicho c_b , se procede a calcular el valor de P_b y M_b mediante las ecuaciones 3.5 y 3.6, respectivamente. En dichas ecuaciones, los valores de $d_1, d_2, \dots, d_n$ vienen a ser la distancia de la fibra más alejada hasta la recta paralela que cruza el punto medio de la varilla, siendo “ d_n ” la distancia a la varilla que fluye primero a tracción.

$$c_b = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fy}} \times d_n \quad 3.4$$

$$P_b = 0.85f'_c ab - A_{st1}f_{s1} - A_{st2}f_{s2} \dots - A_{stn}f_y \quad 3.5$$

$$M_b = 0.85f'_c ab \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) - A_{st1}f_{s1} \left(\frac{h}{2} - d_1 \right) \dots - A_{stn}f_y \left(\frac{h}{2} - d_n \right) \quad 3.6$$

Donde:

- a : Profundidad del bloque equivalente rectangular de tensión.
- b : Ancho del alma de la sección.
- c_b : Distancia balanceada.
- d_n : Distancia a la barra de acero que fluye primero a tracción.
- f'_c : Esfuerzo de compresión del concreto.
- P_b : Carga axial balanceada.
- A_{st} : Área de acero longitudinal de la sección transversal.
- f_s : Esfuerzo del refuerzo de acero.
- M_b : Momento balanceado.
- h : Altura del elemento de concreto armado.
- ε_{cu} : Deformación unitaria última ($\varepsilon_{cu} = 0.005$).
- ε_{fy} : Deformación de fluencia del acero ($\varepsilon_{fy} = 0.0021$).

Por último, es necesario ubicar puntos adicionales para poder construir el diagrama de interacción. Para dichos puntos, se tomarán valores de “c”, que van desde un valor cercano a cero hasta aproximarse al valor del peralte de la sección. De esta forma, con cada valor de c, se realiza el cálculo de P y M de la misma forma que se realizó para P_b y M_b .

La flexión biaxial se da debido a que existe carga axial sea de compresión o tracción, y flexión respecto a ambos ejes X y Y. En estas condiciones de carga, es necesario considerar un diagrama de interacción para ambas direcciones y de esta forma determinar las condiciones para cada combinación de carga axial y momento en cada eje. Sin embargo, el diagrama de interacción para una sección transversal cuya distribución de acero es idéntica si se toma los momentos respecto de X o Y, el diagrama de interacción también resulta ser idéntico en ambas direcciones. En otros casos, se suele utilizar el Método Simplificado de Bresler. En la Figura 22 se puede apreciar un diagrama de interacción de flexión biaxial, en el cual se toman en cuenta los momentos respecto de X y Y.

Figura 22: Diagrama de interacción para flexión biaxial

Fuente: McCormac & Brown (2011)

Según el AASHTO (2014), se recomienda usar el Método de Bresler para determinar la resistencia a la flexión biaxial. Dicho método establece que se deben satisfacer las ecuaciones 3.7 y 3.8:

$$\text{Si } P_u \geq 0.10P_n$$

$$\frac{1}{P_n} = \frac{1}{P_{nx}} + \frac{1}{P_{ny}} - \frac{1}{P_o} \leq 1 \quad 3.7$$

$$\text{Si } P_u < 0.10P_n$$

$$\frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} \leq 1 \quad 3.8$$

4.1.1.1. Ejemplo de aplicación de diseño con barras de acero

Tabla 12: Datos de la sección circular.

D (cm)	db (pulg)	db,espiral (pulg)	r (cm)	f'c (kg/cm2)	fy (kg/cm2)	ρ
40	5/8	3/8	7.5	350	4200	0.02
Ecu (kg/cm2)	Es (kg/cm2)	εcu	εy	Ag (cm2)	β=	pb
280624	2000000	0.003	0.0021	1256.6	0.80	3.99%

Fuente: Propia

Figura 23: Distribución de refuerzo de la sección circular (unidades en cm)

Fuente: Propia

Donde:

A_g : Área de la sección transversal del elemento.

d_b : Diámetro de la barra transversal.

$d_{b,espir}$: Diámetro de los espirales

- D : Diámetro.
- E_{cu} : Módulo de elasticidad del concreto.
- E_s : Módulo de elasticidad del refuerzo longitudinal de acero.
- f'_c : Esfuerzo de compresión del concreto.
- f_y : Resistencia a la fluencia del acero.
- r : Recubrimiento
- β_1 : Factor que relaciona la profundidad del bloque de esfuerzo de compresión rectangular equivalente con la profundidad del eje neutro.
- ϵ_{cu} : Deformación unitaria última.
- ϵ_y : Deformación unitaria neta en el extremo de la capa del refuerzo longitudinal en tensión.
- ρ_s : Cuantía de acero.

La Tabla 12 presenta los datos de la geometría y las propiedades de los materiales. Además, la distribución del refuerzo de acero y las distancias desde la fibra superior hasta la barra se muestran en la Figura 23.

A continuación, en la Tabla 13 se muestra las distancias a los ejes con refuerzo de acero desde la fibra superior de la sección, además el área de refuerzo en cada eje.

Tabla 13: *Distancias a los ejes de las barras y el área de acero por eje.*

d1 (cm)	d2 (cm)	d3 (cm)	d4 (cm)	d5 (cm)	d6 (cm)	d7 (cm)
9.25	10.69	14.63	20.00	25.38	29.31	30.75
As1 (cm2)	As2 (cm2)	As3 (cm2)	As4 (cm2)	As5 (cm2)	As6 (cm2)	As7 (cm2)
1.98	3.96	3.96	3.96	3.96	3.96	1.98

Fuente: Propia

Donde:

- A_s : Área de acero longitudinal por eje de la sección transversal.
- d_n : Distancia a la varilla de acero que fluye primero a tracción.

Por último, con esa información, se puede calcular los valores de P y M mediante valores arbitrarios de “c” (Distancia al eje neutro), y se muestra los resultados en la Tabla 14, en los cuales, además, se agregan los valores extremos de compresión pura y tensión pura.

Tabla 14: Iteraciones para el cálculo de P y M

c(cm)	P (ton)	M (ton-m)	ϕ	ϕP (ton)	ϕM (ton-m)
Tensión Pura	-99.758	0.000	0.900	-89.782	0.000
1	-97.974	-1.438	0.900	-88.176	-1.294
4.8	-81.434	1.459	0.900	-73.290	1.313
8.6	-38.623	6.844	0.900	-34.761	6.160
12.4	18.166	12.172	0.871	15.823	10.602
16.2	76.420	15.813	0.781	59.668	12.347
20	139.632	17.669	0.750	104.724	13.252
23.8	198.249	18.526	0.750	148.687	13.894
27.6	250.866	18.302	0.750	188.149	13.726
31.4	298.847	17.001	0.750	224.135	12.750
35.2	342.352	14.688	0.750	256.764	11.016
39	380.928	11.536	0.750	279.925	8.652
Compresión Pura	466.541	0.000	0.750	279.925	0.000

Fuente: Propia

Donde:

c : Distancia al eje neutro desde la fibra superior en compresión.

P : Carga axial nominal.

M : Momento nominal.

ϕ : Factor de reducción de resistencia del material.

Finalmente, en la Figuras 24 y 25 se muestran los diagramas de interacción nominal y de diseño calculados con los datos obtenidos del análisis.

Figura 24: Diagrama de interacción uniaxial nominal de una sección de concreto reforzado con acero
Fuente: Propia

Figura 25: Diagrama de interacción uniaxial de diseño de una sección de concreto reforzado con acero
Fuente: Propia

4.1.2. Diseño con barras de GFRP

La metodología para el diseño de una sección por flexocompresión con refuerzo de GFRP es bastante similar que la del acero. Sin embargo, existen ciertas consideraciones importantes que deben ser tomadas en cuenta para el desarrollo del diagrama de interacción.

El punto más importante es el comportamiento del GFRP bajo cargas de compresión, el cual, a diferencia del acero, es un material anisotrópico, lo que dificulta el cálculo de su resistencia a la compresión, las cuales pueden ser imprecisas (Jawaheri & Nanni, 2013).

Según ensayos experimentales, Wu concluyó que la resistencia a la compresión y su módulo de elasticidad son 45% y 20% respecto a los valores de dichos parámetros en tensión (Wu, 1990). De la misma forma, Deitz et al. (2003) reportó reducciones del 50% y 100% de la resistencia a la tensión y su módulo de elasticidad cuando se evaluó bajo compresión (Deitz et al., 2003). Dicha información puede ser brindada por el proveedor del producto, el cual, a partir de ensayos experimentales, puede establecer una resistencia a la compresión y módulo de elasticidad para su producto en particular. El comité ACI 440 1R-15 (2015) recomienda no considerar el aporte del GFRP en los cálculos (Comité ACI 440, 2015). Según Jawaheri et al. (2013), considera reemplazar el área de las barras en compresión por área de concreto (Jawaheri & Nanni, 2013). Se asumirá lo expuesto en la línea anterior para el desarrollo de los cálculos en la presente investigación.

Otro punto importante es considerar una deformación de diseño del GFRP. El GFRP suele tener una deformación última de falla mayor al 2%, sin embargo, dicha deformación es muy grande y no se puede considerar que la sección alcanzará esa deformación en el diseño. Así que, se asume una deformación máxima de diseño de 0.01 y, de la misma forma, se establece un valor de resistencia de diseño. La deformación de diseño y la resistencia a la tensión de diseño pueden calcularse con las ecuaciones 3.9 y 3.10 (Jawaheri & Nanni, 2013).

$$\varepsilon_{fd} = \text{Min}(\varepsilon_{fu}, 0.010) \quad 3.9$$

$$f_{fd} = \text{Min}(f_{fu}, 0.010E_f) \quad 3.10$$

Donde:

- f_{fd} : Resistencia a la tracción para diseño con barras GFRP.
 f_{fu} : Resistencia a la tracción última de barras GFRP.
 E_f : Módulo de elasticidad del refuerzo longitudinal GFRP.
 ε_{fd} : Deformación de diseño de ruptura para el refuerzo GFRP.
 ε_{fu} : Deformación última de ruptura para el refuerzo GFRP.

Según el comité ACI 440 1R-15 (2015), la sección de diseño por flexión menciona que dicha metodología está enfocada en elementos estructurales de geometría rectangular debido a que la mayoría de los trabajos experimentales e investigaciones se han desarrollado para elementos con dicha geometría. Sin embargo, el manual dice que se puede aplicar igualmente si tiene cualquier tipo de geometría, pero especifica que aún no se ha podido confirmar mediante ensayos experimentales que se vaya a comportar de la misma manera que si tuviera geometría rectangular (Comité ACI 440, 2015).

Para poder determinar el factor de reducción del elemento, es necesario conocer quién controla la falla para lo cual se calcula la cuantía balanceada, la cual define la deformación en la cual el concreto sufre aplastamiento y el FRP falla. Mediante la ecuación 3.11 se calcula la cuantía balanceada.

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad 3.11$$

Donde:

- ρ_{fb} : Cuantía balanceada.
 β_1 : Factor que relaciona la profundidad del bloque de esfuerzo de compresión rectangular equivalente con la profundidad del eje neutro.
 f'_c : Esfuerzo de compresión del concreto
 f_{fu} : Resistencia a la tracción última de barras GFRP.
 E_f : Módulo de elasticidad del refuerzo longitudinal GFRP.
 ε_{cu} : Deformación unitaria última.

Si $\rho_f < \rho_{fb}$, el FRP controla la falla, de otra manera, es el concreto quien la controla. Debido a la falta de ductilidad del FRP, es bastante conservador y varía dependiendo de en qué zona se ubique la cuantía balanceada como se puede observar en la Figura 26:

Figura 26: Gráfico de la función del factor de reducción dependiente de la cuantía

Fuente: Comité ACI 440, 2015

Donde:

ϕ : Factor de reducción de resistencia del material

ρ_{fb} : Cuantía balanceada.

A partir del gráfico de la Figura 26 se establecen funciones para cualquier valor de ρ_{fb} , que se puede observar en la Figura 27.

$$\begin{aligned} \phi &= 0.55 \text{ para } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ \phi &= 0.3 + 0.25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \text{ para } \rho_{fb} < \rho_f < 1.4\rho_{fb} \\ \phi &= 0.65 \text{ para } \rho_f \geq 1.4\rho_{fb} \end{aligned}$$

Figura 27: Función del factor de reducción de resistencia a la tracción

Fuente: Comité ACI 440, 2015

Por último, la cantidad de refuerzo mínimo establecido para una sección controlada por la falla a tracción del FRP se da para prevenir la falla del concreto por agrietamiento. El área de refuerzo mínimo ($A_{f,min}$) se calcula mediante la ecuación 3.12 definida para unidades en el sistema internacional (SI).

$$A_{f,min} = \frac{0.41\sqrt{f'_c}}{f_{fu}} b_w d \geq \frac{2.3}{f_{fu}} b_w d \quad 3.12$$

Donde:

$A_{f,min}$: Área del refuerzo longitudinal mínimo de refuerzo GFRP.

b_w : Ancho del alma de la sección.

d : Peralte de la sección del elemento.

f'_c : Esfuerzo de compresión del concreto.

f_{fu} : Resistencia a la tracción última de barras GFRP.

Otras consideraciones muy similares al diseño con acero son las siguientes:

- La deformación del concreto y del FRP es proporcional a la distancia desde el eje neutro, es decir, la sección se mantiene plana después de recibir cargas.
- La deformación máxima a la compresión del concreto será de 0.003 o 0.004.
- La resistencia a la tracción del concreto se considera despreciable.
- La resistencia a la tracción del refuerzo de FRP se considera elástico lineal hasta la falla.
- Existe una unión perfecta entre el concreto y el FRP.

El diagrama de interacción de una sección circular con refuerzo de barras de GFRP se puede construir a partir del cálculo de 5 puntos importantes, los cuales se enumeran a continuación. En la Figura 28, se muestran los parámetros que se usan en el cálculo de diagrama de interacción, en el cual “x” representa la posición del eje neutro desde la fibra superior de la sección. “D” es el diámetro de la sección “d”, la distancia de la fibra superior al refuerzo más alejado.

Figura 28: Sección transversal de una columna circular.

Fuente: Comité ACI 440, 2015

Donde:

A_f : Área total de la sección transversal de las barras GFRP.

C.L. : Línea central de la sección circular.

d : Peralte de la sección del elemento.

D : Diámetro.

h : Altura del elemento de concreto armado.

N.A. : Línea del eje neutro.

x : Posición del eje neutro desde la fibra superior de la sección.

β_1 : Factor que relaciona la profundidad del bloque de esfuerzo de compresión rectangular equivalente con la profundidad del eje neutro.

θ_c : Ángulo de la zona de compresión.

θ_T : Ángulo de la zona de tracción.

1. $x \rightarrow -\infty$

En este punto, la sección se encuentra a tracción pura, donde el único que aporta resistencia son las barras de GFRP. Además, representa la máxima resistencia a la tracción de la sección. De manera similar al acero, se calcula mediante las Ecuaciones 3.13 y 3.14.

$$P_n = T_{max} = -A_f f_{fd} \quad 3.13$$

$$M_n = 0 \quad 3.14$$

Donde:

A_f : Área total de la sección transversal de las barras GFRP.

f_{fd} : Resistencia a la tracción para diseño con barras GFRP.

M_n : Momento nominal.

P_n : Carga axial nominal.

T_{max} : Resistencia máxima a la tracción.

2. $x = 0$

En este punto, el refuerzo más alejado en tensión falla, es decir, la deformación del refuerzo más alejado alcanza la deformación máxima de diseño. ($\varepsilon_f = \varepsilon_{fd}$).

La carga axial y momento se calculan mediante las Ecuaciones 3.15 y 3.16.

$$P_n = \frac{-A_f f_{fd}}{2\gamma} \quad 3.15$$

$$M_n = \frac{(2\gamma - 1)^2}{8\gamma} A_f f_{fd} D \quad 3.16$$

Donde $\gamma = d/D$.

A_f : Área total de la sección transversal de las barras GFRP.

D : Diámetro.

f_{fd} : Resistencia a la tracción para diseño con barras GFRP.

P_n : Carga axial nominal.

M_n : Momento nominal.

3. $x_b \leq x \leq d$

En este rango inicia cuando se tiene el punto balanceado de falla de concreto y GFRP. Para calcular dicho punto, se utiliza la Ecuación 3.17.

$$x_b = \frac{d}{1 + e} \quad 3.17$$

Donde $e = \frac{\varepsilon_{fd}}{\varepsilon_{cu}}$.

d : Peralte de la sección del elemento.

x_b : Distancia al punto balanceado de falla de concreto y GFRP.

La ecuación 3.18 establece un rango de valores para “ α ”, el cual está en función a “ x ”.

$$\text{Max}\left(\frac{1}{\gamma} - 1; \frac{1}{1 + e}\right) \leq \alpha = \frac{x}{d} \leq 1 \quad 3.18$$

Donde:

d : Peralte de la sección del elemento.

e : Relación entre la deformación de diseño de las barras GFRP y la deformación última del concreto.

x : Posición del eje neutro desde la fibra superior de la sección.

α : Relación entre la posición del eje neutro desde la fibra superior de la sección y distancia a la varilla de acero que fluye primero a tracción.

Γ : Relación entre el peralte y el diámetro del elemento.

Para cualquier valor arbitrario de “ α ” en ese rango, se calcula la carga axial y momento mediante las Ecuaciones 3.19, 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24.

$$C = 0.85 \frac{(\theta_c - \sin\theta_c \cos\theta_c)D^2}{4} \quad 3.19$$

$$M_c = 0.85f'_c \frac{\sin^3\theta_c D^3}{12} \quad 3.20$$

Donde $\cos \theta_c = 1 - 2\alpha\beta\gamma$ y $0 \leq \theta_c \leq \pi$

C : Carga axial.

D : Diámetro.

f'_c : Esfuerzo de compresión del concreto, MPa

M_c : Momento en zona de compresión.

θ_c : Ángulo de la zona de compresión.

α : Relación entre la posición del eje neutro desde la fibra superior de la sección y distancia a la varilla de acero que fluye primero a tracción.

β_1 : Factor que relaciona la profundidad del bloque de esfuerzo de compresión rectangular equivalente con la profundidad del eje neutro.

γ : Relación entre el peralte y el diámetro del elemento.

$$T = \frac{\pi \cos \theta_T - \theta_T \cos \theta_T + \sin \theta_T}{\pi(1 + \cos \theta_T)} \frac{1 - \alpha}{\alpha} \varepsilon_{cu} E_f A_f \quad 3.21$$

$$M_T = \frac{\pi - \theta_T + \sin \theta_T \cos \theta_T}{2\pi(1 + \cos \theta_T)} \frac{1 - \alpha}{\alpha} \left(\gamma - \frac{1}{2}\right) \varepsilon_{cu} E_f A_f \quad 3.22$$

Donde $\cos \theta_T = (1 - 2\alpha\gamma)/(2\gamma - 1)$ y $0 \leq \theta_T \leq \pi$

A_f : Área total de la sección transversal de las barras GFRP.

E_f : Módulo de elasticidad del refuerzo longitudinal GFRP.

M_T : Momento en zona de tracción.

T : Resistencia a la tracción

θ_T : Ángulo de la zona de tracción.

α : Relación entre la posición del eje neutro desde la fibra superior de la sección y distancia a la varilla de acero que fluye primero a tracción.

γ : Relación entre el peralte y el diámetro del elemento.

ε_{cu} : Deformación unitaria última.

$$P_n = C - T \quad 3.23$$

$$M_n = M_c + M_T \quad 3.24$$

Donde:

P_n : Carga axial nominal.

4. $d < x \leq h$

Cuando el Eje neutro se encuentra en la zona del recubrimiento de la sección. En este punto, las barras de GFRP se encuentran en compresión, por lo tanto, se desprecia su aporte en compresión. Se determina la carga axial y el momento mediante las ecuaciones 3.25 y 3.26

$$P_n = 0.85f'_c \frac{(\theta_T - \sin\theta_c \cos\theta_c)}{4} D^2 \quad 3.25$$

$$M_n = 0.85f'_c \frac{\sin^3\theta_c D^3}{12} \quad 3.26$$

5. $x = +\infty$

Cuando toda la sección se encuentra en compresión pura y alcanza su máxima resistencia a la compresión. Dicha carga axial y flexión se calculan mediante las Ecuaciones 3.27 y 3.28.

$$P_n = 0.85f'_c \frac{\pi D^2}{4} \quad 3.27$$

$$M_n = 0 \quad 3.28$$

Además, el factor de reducción de esfuerzo se calcula mediante un método simplificado, aplicando parámetros adimensionales calculados previamente, es decir, mediante la Ecuación 3.29.

$$0.55 \leq \phi = 0.30 + 0.25e(1 + e) \frac{\alpha^2}{(1 - \alpha)} \leq 0.65 \quad 3.29$$

Donde:

- e : Relación entre la deformación de diseño de las barras GFRP y la deformación última del concreto.
- ϕ : Factor de reducción de resistencia del material
- α : Relación entre la posición del eje neutro desde la fibra superior de la sección y distancia a la varilla de acero que fluye primero a tracción.

4.1.2.1. Ejemplo de aplicación de diseño con barras de GFRP.

La Tabla 15 presenta los datos de la geometría y las propiedades de los materiales para la sección circular reforzada con barras GFRP.

Tabla 15: Datos de la sección circular reforzada con GFRP

D (cm)	db (pulg)	db,espiral (pulg)	r (cm)	f'c (kg/cm ²)	ffu* (kg/cm ²)
40	5/8	3/8	7.5	350	10193
CN	Ef (kg/cm ²)	ϵ_{cu}	d (cm)	Aft (cm ²)	β
0.80	713634	0.003	30.75	23.75	0.8
ffu (kg/cm ²)	ϵ_{fu}	ϵ_{fd}	ffd (kg/cm ²)	Ag (cm ²)	ρ_f/pb
8154.21	0.015	0.010	7136	1256.6	1.89% / 1.76%

Fuente: Propia

Donde:

- A_g : Área de la sección transversal del elemento.
- A_{ft} : Área total de la sección transversal de las barras GFRP.
- β : Factor que relaciona la profundidad del bloque de esfuerzo de compresión rectangular equivalente con la profundidad del eje neutro.
- CN : Factor de reducción ambiental.
- d : Peralte de la sección del elemento.
- d_b : Diámetro de la barra longitudinal.
- $d_{b,espiral}$: Diámetro de la barra transversal (espirales)
- D : Diámetro.
- E_f : Módulo de elasticidad del refuerzo longitudinal GFRP.
- ϵ_{cu} : Deformación unitaria última.
- ϵ_{fd} : Deformación de diseño de ruptura para el refuerzo GFRP.
- ϵ_{fu} : Deformación última de ruptura para el refuerzo GFRP.
- f'_c : Esfuerzo de compresión del concreto.

- f_{fd} : Resistencia a la tracción para diseño con barras GFRP.
 f_{fu} : Resistencia a la tracción última de barras GFRP.
 ρ_b : Cuantía del refuerzo balanceada.
 ρ_f : Cuantía del refuerzo a tracción efectiva.
 r : Recubrimiento

A continuación, en la Tabla 16 y Tabla 17, se muestran los cálculos de los 5 puntos de cálculo para el diagrama de interacción nominal y de diseño de GFRP, respectivamente.

Tabla 16: *Cálculo de valores del diagrama de interacción Nominal*

NOMINAL		
Mn (ton.m)	Pn(ton)	
0.00	373.85	5
8.12	320.62	4
9.76	306.08	
11.26	290.73	
12.59	274.72	
13.72	258.17	
14.62	241.21	3
14.62	241.21	
15.90	204.71	
16.22	165.98	
15.66	125.97	
14.36	85.17	2
12.59	43.37	
10.84	-1.28	
3.19	-110.23	1
0.00	-193.68	

Fuente: Propia

Tabla 17: Cálculo de valores del diagrama de interacción de diseño

DISEÑO		
Mn (ton.m)	Pn(ton)	
0.00	194.40	5
5.28	194.40	
6.34	194.40	
7.32	188.97	4
8.18	178.57	
8.92	167.81	
9.50	156.79	
9.50	156.79	3
10.34	133.06	
10.54	107.89	
10.18	81.88	
9.34	55.36	
8.18	28.19	
7.05	-0.83	
1.75	-60.63	2
0.00	-106.52	1

Fuente: Propia

Con la información obtenida, se construye el diagrama de interacción nominal y de diseño, los cuales se muestran en la Figura 29 y 30, respectivamente.

Figura 29: Diagrama de interacción uniaxial nominal de la sección reforzada con GFRP

Fuente: Propia

Figura 30: Diagrama de interacción uniaxial de diseño de la sección reforzada con GFRP

Fuente: Propia

4.1.3. Comparación entre metodologías de diseño de secciones

- La contribución del GFRP en compresión es despreciado, por lo tanto, es un diseño conservador, puesto que, a pesar de su dificultad para medir la resistencia a la compresión debido a la naturaleza anisotrópica del material, este si presenta un aporte a compresión en la sección.
- La deformación unitaria máxima del GFRP excede el 2%, sin embargo, para el diagrama de interacción se asume que la deformación máxima de las barras será de 1%, por lo tanto, en la realidad, las barras de GFRP pueden resistir mayores cargas de tracción, es decir, una resistencia adicional implícita y de esta forma, el diseño resulta ser más conservador.
- En la Figura 31 se aprecia la interpolación lineal con su respectiva ecuación y coeficiente de determinación del diagrama de interacción uniaxial nominal en la zona de falla dúctil para el acero y GFRP, en la cual dicha interpolación tiene un ajuste mayor al 95% en ambos casos. En la Tabla 18 se puede apreciar que la variación de resistencia a la carga axial disminuye en

promedio en 21% para una sección reforzada con GFRP respecto de una sección reforzada con acero.

Donde:

P_n : Carga axial nominal.

M_n : Momento nominal.

Figura 31: Comparación de diagramas uniaxiales de interacción nominal con Acero y GFRP en la zona de falla dúctil

Fuente: Propia

Tabla 18: Valores calculados de las ecuaciones interpoladas del diagrama de interacción uniaxial nominal de acero y GFRP

Mn (ton-m)	Pn (ton) (Acero)	Pn (ton) (GFRP)	%
0.0	468.080	375.040	20%
1.0	459.904	367.873	20%
2.0	451.728	360.705	20%
3.0	443.551	353.538	20%
4.0	435.375	346.371	20%
5.0	427.199	339.204	21%
6.0	419.023	332.036	21%
7.0	410.847	324.869	21%
8.0	402.670	317.702	21%
9.0	394.494	310.534	21%
10.0	386.318	303.367	21%
Promedio			21%

Fuente: Propia

- En la Figura 32, se puede apreciar los diagramas de interacción uniaxial nominal de los dos tipos de refuerzo, en la cual se señala los puntos máximos de P_n y M_n para cada material de refuerzo. En el acero se observa que para su P_n máximo es de 220 ton asociado a un M_n máximo de 18.5 ton-m, mientras que, para el GFRP, para el P_n máximo de 175 ton asociado a un M_n máximo de 16.1 ton-m. Por lo tanto, se puede apreciar una reducción del momento máximo de 13% en el GFRP respecto del acero aproximadamente.

Figura 32: Comparación de diagramas uniaxiales de interacción nominal con Acero y GFRP

Fuente: Propia

- En la Figura 33, se puede apreciar los diagramas de interacción uniaxial de diseño de los dos tipos de refuerzo, en la cual se señala los puntos máximos de P_n y M_n para cada material de refuerzo. En el acero se observa que para su P_n máximo es de 170 ton asociado a un M_n máximo de 13.9 ton-m, mientras que, para el GFRP, para el P_n máximo de 115 ton asociado a un M_n máximo de 10.5 ton-m. Por lo tanto, se puede apreciar una reducción del P_n de 32% en el acero respecto al GFRP y, del momento máximo, de 24% en el GFRP respecto del acero aproximadamente.

Figura 33: Comparación de diagramas uniaxiales de interacción diseño con Acero y GFRP

Fuente: Propia

- En la Figura 34, se puede apreciar las plataformas de los diagramas de interacción uniaxial de diseño de los dos tipos de refuerzo, en la cual se señala los puntos máximos de P_n para cada material de refuerzo. En el acero se observa que su P_n máximo es de 279.93 ton, mientras que, para el GFRP, el P_n máximo es de 194.40 ton. Por lo tanto, se estima una reducción de carga axial máxima de 31% en el GFRP respecto del acero aproximadamente.

Figura 34: Comparación de las plataformas de los diagramas uniaxiales de interacción de diseño con Acero y GFRP.

Fuente: Propia

4.2. Diseño por corte

Cuando se diseña por corte, es poco frecuente analizar cuando se produce la combinación de las fuerzas cortantes, flexión y axial cuando solo actúa la gravedad. Sin embargo, cuando existe carga sísmica, los elementos estructurales verticales como los pilotes se someten a grandes sollicitaciones de fuerzas cortantes de flexión y también de carga axial. Asimismo, la compresión axial puede aumentar o disminuir la capacidad a cortante de los miembros de concreto reforzado debido a su relación con la tensión diagonal de la fuerza cortante (Park & Paulay, 1991). Las ecuaciones presentadas en esta parte del capítulo están en el sistema internacional.

4.2.1. Diseño por corte con acero

Al diseñar por corte se trata de evitar la falla frágil, de tal forma que tenga mayor resistencia por corte que resistencia a la flexión y así llevar al elemento estructural a una falla dúctil por flexión.

La fuerza de cortante nominal de una sección es la suma de las fuerzas proporcionadas por el concreto y las del refuerzo estructural, cuya expresión se muestra en la Ecuación 3.30.

$$V_n = V_c + V_s$$

3.30

Donde:

V_c : Fuerza cortante del concreto.

V_n : Fuerza cortante nominal.

V_s : Fuerza cortante del refuerzo de acero.

Las dimensiones de la sección transversal se seleccionarán para cumplir con la Ecuación 3.31 y $\phi = 0.75$. Donde la resistencia de diseño por cortante del elemento estructural debe ser menor o igual al minorado de las fuerzas brindadas por el concreto y refuerzo.

$$V_u \leq \phi(V_c + V_s)$$

3.31

Donde:

V_u : Fuerza cortante última.

ϕ : Factor de reducción de resistencia del material

El tipo de falla que sufre el concreto es por tracción diagonal y no por corte directo, que depende de la resistencia a tracción del concreto mismo. Para calcular la fuerza de corte proporcionada por el concreto en elementos no pre esforzados con compresión axial se utiliza la Ecuación 3.32.

$$V_c = 0.53(1 + \frac{N_u}{140A_g})\sqrt{f'_c}b_wd$$

3.32

Donde:

A_g : Área de la sección transversal del elemento.

b_w : Ancho del alma de la sección.

d : Peralte de la sección del elemento.

f'_c : Esfuerzo de compresión del concreto.

N_u : Carga axial última.

V_c : Fuerza cortante del concreto.

En cada sección donde $V_u > \phi V_c$, el refuerzo transversal deberá satisfacer la Ecuación 3.33.

$$V_s \geq \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad 3.33$$

Donde el refuerzo transversal deberá ser calculada con la Ecuación 3.34.

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad 3.34$$

Se planteará un cortante último en función del cortante mínimo, el cual está respecto al área mínima establecido por el ACI 318-14 descrita en la Ecuación 3.35.

$$A_{vmín} = 0.2 \sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad 3.35$$

El área mínima no debe ser menor que la Ecuación 3.36.

$$A_{vmín} = 3.5 \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad 3.36$$

Donde:

A_v : Área de corte de acero transversal.

$A_{v,mín}$: Área del refuerzo transversal mínimo de refuerzo GFRP.

b_w : Ancho del alma de la sección.

d : Peralte de la sección del elemento.

f'_c : Esfuerzo de compresión del concreto.

f_{yt} : Resistencia a la fluencia del acero transversal.

s : Espaciamiento entre refuerzos transversales.

En el caso de estudio del pilote a analizar se emplearán zunchos con un espaciado continuo según norma de 1 a 3 pulgadas. Además, compatibilizando con respecto a la sección circular del pilote, el área efectiva por cortante se deberá calcular como un área rectangular equivalente según las Ecuaciones 3.37 y 3.38.

$$b_w = D \quad 3.37$$

$$d = 0.8D \quad 3.38$$

Donde:

- b_w : Ancho del alma de la sección.
 d : Peralte de la sección del elemento.
 D : Diámetro.

4.2.1.1. Ejemplo de aplicación de diseño con barras de acero

A continuación, se muestran los datos con los que se trabajó el diseño por corte del pilote del caso de estudio. El valor de la carga axial última se obtuvo del Diagrama de Interacción nominal con barras GFRP debido a que era el valor con el que se podía comparar ambas alternativas. El espaciamiento considerado fue de 5 cm para zunchos y la carga por corte última se consideró 8, 12 y 24 veces la fuerza cortante mínima. En la Tabla 19 se muestran los datos utilizados para el diseño por corte de la sección circular reforzada con barras de acero.

Tabla 19: Datos de la sección circular reforzada con barras de acero

$b_w=D$ (cm)	d (cm)	f_c (kg/cm ²)	f_y (kg/cm ²)	A_g (cm ²)	ϕ
40	32	350	4200	1256.64	0.75
P_u (Tn)	S_o (cm)	$A_{v \min (1)}$ (cm ²)	$A_{v \min (2)}$ (cm ²)	$A_{v \min}$ (cm ²)	$V_{\min}$ (Tn)
373.85	5	0.18	0.17	0.18	4.79

Fuente: Propia

Donde:

- A_g : Área de la sección transversal del elemento.
 $A_{v, \min}$: Área del refuerzo transversal mínimo de refuerzo de acero.
 b_w : Ancho del alma de la sección.
 D : Diámetro.
 f'_c : Esfuerzo de compresión del concreto.
 f_y : Resistencia a la fluencia del acero.
 P_u : Carga axial última.
 S_o : Espaciamiento entre refuerzos transversales.
 $V_{\min}$: Fuerza cortante mínimo.
 ϕ : Factor de reducción de resistencia del material

En la Tabla 20 se muestran los resultados obtenidos para el diseño por corte de la sección circular reforzada con barras de acero.

Tabla 20: Resultados del diseño por corte de la sección circular reforzada con barras de acero

CASO 1: 15% CARGA AXIAL						Pn=	56.08	Tn
						Vc=	16.74	Tn
CASO A			CASO B			CASO C		
Para:	Vu=	8 V _{mín}	Para:	Vu=	12 V _{mín}	Para:	Vu=	24 V _{mín}
	Vu=	38.31 Tn		Vu=	57.47 Tn		Vu=	114.94 Tn
	Vs=	34.35 Tn		Vs=	59.89 Tn		Vs=	136.52 Tn
	Av=	1.28 cm ²		Av=	2.23 cm ²		Av=	5.08 cm ²
	ρ _s =	0.0010		ρ _s =	0.0017		ρ _s =	0.0040
CASO 2: 30% DE LA CARGA AXIAL ÚLTIMA						Pn=	112.16	Tn
						Vc=	20.78	Tn
CASO A			CASO B			CASO C		
Para:	Vu=	8 V _{mín}	Para:	Vu=	12 V _{mín}	Para:	Vu=	24 V _{mín}
	Vu=	38.31 Tn		Vu=	57.47 Tn		Vu=	114.94 Tn
	Vs=	30.30 Tn		Vs=	55.85 Tn		Vs=	132.48 Tn
	Av=	1.13 cm ²		Av=	2.08 cm ²		Av=	4.93 cm ²
	ρ _s =	0.0009		ρ _s =	0.0016		ρ _s =	0.0039
CASO 3: 45% DE LA CARGA AXIAL ÚLTIMA						Pn=	168.23	Tn
						Vc=	24.83	Tn
CASO A			CASO B			CASO C		
Para:	Vu=	8 V _{mín}	Para:	Vu=	12 V _{mín}	Para:	Vu=	24 V _{mín}
	Vu=	38.31 Tn		Vu=	57.47 Tn		Vu=	114.94 Tn
	Vs=	26.26 Tn		Vs=	51.80 Tn		Vs=	128.43 Tn
	Av=	0.98 cm ²		Av=	1.93 cm ²		Av=	4.78 cm ²
	ρ _s =	0.0008		ρ _s =	0.0015		ρ _s =	0.0037
CASO 4: 60% DE LA CARGA AXIAL ÚLTIMA						Pn=	224.31	Tn
						Vc=	28.87	Tn
CASO A			CASO B			CASO C		
Para:	Vu=	8 V _{mín}	Para:	Vu=	12 V _{mín}	Para:	Vu=	24 V _{mín}
	Vu=	38.31 Tn		Vu=	57.47 Tn		Vu=	114.94 Tn
	Vs=	22.21 Tn		Vs=	47.76 Tn		Vs=	124.38 Tn
	Av=	0.83 cm ²		Av=	1.78 cm ²		Av=	4.63 cm ²
	ρ _s =	0.0006		ρ _s =	0.0014		ρ _s =	0.0036

Fuente: Propia

Donde:

ρ_s : Cuantía de acero.

4.2.2. Diseño por Corte con GFRP

Para el diseño por corte en elementos reforzados con FRP es bastante similar al diseño por corte con acero convencional. La diferencia se encuentra en la baja rigidez axial de las barras GFRP en flexión después del agrietamiento, donde se tiene una profundidad más pequeña al eje neutro. Como consecuencia, se tiene una fuerza cortante del concreto más pequeña de la que se obtiene con barras de acero.

Primero, se calcula la resistencia al corte del concreto mediante la Ecuación 3.39 en unidades SI.

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w (kd) \quad 3.39$$

Donde el parámetro k puede ser obtenido con la Ecuación 3.40. Según el ACI 440-1R.15 se asume un valor de $k = 0.2$ para empezar a iterar.

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad 3.40$$

Y el ratio modular se describe en la Ecuación 3.41 como:

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} \quad 3.41$$

Además, se define el ratio de refuerzo a la tracción efectiva en la Ecuación 3.42.

$$\rho_f = \rho_{f1} + \frac{\gamma(1 - k_c)}{2\gamma - 1} \rho_{f2} \quad 3.42$$

Donde:

- b_w : Ancho del alma de la sección.
- d : Peralte de la sección del elemento.
- E_c : Módulo de elasticidad del concreto.
- E_f : Módulo de elasticidad del refuerzo longitudinal GFRP.
- f'_c : Esfuerzo de compresión del concreto.
- k_c : Relación entre la profundidad del eje neutro y distancia al refuerzo.
- n_f : Ratio modular.
- V_c : Fuerza cortante del concreto.
- ρ_f : Cuantía del refuerzo a tracción efectiva.
- γ : Relación entre el peralte y el diámetro del elemento.

Estos parámetros ayudan a estimar un valor de cortante del concreto conservador si el elemento estructural está sometido a una fuerza axial. Es por ello que el uso de esta ecuación no es recomendado en el caso de fuerzas axiales a tracción. En este caso, la Ecuación 3.43 ayuda al cálculo de la ubicación del eje neutro cuando existe la combinación de cargas axiales y de flexión.

$$0 \leq \frac{c}{d} = k_c + \frac{k_c^2 \left(1 - \frac{k_c}{3}\right)}{2} * \left(\frac{P_u d}{M_u}\right) \leq 1 \quad 3.43$$

Luego, cuando se utilizan refuerzos transversales de FRP como estribos o espirales, la fuerza cortante aportante del refuerzo se calcula mediante la Ecuación 3.44.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \quad 3.44$$

Con el fin de limitar y controlar el ancho de las grietas por corte y mantener la integridad de la resistencia al corte del concreto y evitar la falla, una porción de la resistencia a la tracción del FRP para el diseño por corte se calcula con la Ecuación 3.45.

$$f_{fv} = 0.004 E_f \leq f_{fb} \quad 3.45$$

El cálculo de la fuerza de la zona doblada del estribo f_{fb} se expresa en la Ecuación 3.46 la cual depende de la relación $\frac{r_b}{d_b}$, el cual se recomienda según el ACI 440-1R.15 un valor mínimo igual a 3.

$$f_{fb} = \left(0.05 \frac{r_b}{d_b} + 0.3\right) f_{fu} \leq f_{fu} \quad 3.46$$

Cuando se utilizan refuerzos perpendiculares al eje principal del elemento, el área de refuerzo por corte y el espaciamiento pueden ser calculados mediante la ecuación 3.47.

$$\frac{A_{fv}}{s} = \frac{(V_u - \phi V_c)}{\phi f_{fv} d} \quad 3.47$$

El valor del factor de reducción de resistencia en el diseño por corte es de $\phi=0.85$ según el ACI 440-1R.15. Por último, para el cálculo del refuerzo mínimo $A_{fv,min}$ para evitar la falla por corte o formación de grietas por corte, se establece que puede ser calculado mediante la ecuación 3.48 en unidades SI.

$$A_{fv,min} = 0.35 \frac{b_w s}{f_{fv}} \quad 3.48$$

Donde:

- A_{fv} : Área de corte de GFRP transversal.
- b_w : Ancho del alma de la sección.
- c : Distancia al eje neutro desde la fibra superior en compresión.
- d : Peralte de la sección del elemento.
- d_b : Diámetro de la barra longitudinal.
- E_f : Módulo de elasticidad del refuerzo longitudinal GFRP.
- f_{fb} : Resistencia a la tracción para la zona doblada del estribo GFRP.
- f_{fu} : Resistencia a la tracción última de barras GFRP.
- f_{fv} : Resistencia a la tracción barras GFRP transversal.
- k_c : Relación entre la profundidad del eje neutro y distancia al refuerzo.
- M_u : Momento último.
- P_u : Carga axial última.
- r_b : Radio de la zona doblada del estribo.
- s : Espaciamiento entre refuerzos transversales.
- V_f : Fuerza cortante del refuerzo GFRP.
- V_u : Fuerza cortante última.
- ϕ : Factor de reducción de resistencia del material

4.2.2.1. Ejemplo de aplicación de diseño con barras GFRP

A continuación, se muestran los datos con los que se trabajó el diseño por corte del pilote del caso de estudio. Tener en cuenta que el esfuerzo último de las barras y el módulo de elasticidad son datos que deben ser brindados por el fabricante y para el ejemplo se consideró 815.42 MPa y 71.36 GPa respectivamente. En la Tabla 21 se muestran los datos empleados de la sección circular reforzada con barras de GFRP.

Tabla 21: Datos de la sección circular reforzada con barras de GFRP

bw=D (cm)	d (cm)	f _c (MPa)	E _c (GPa)	A _g (cm ²)	P _u (Tn)	S _o (mm)
40	32	35	28	1256.64	373.85	50
db (pulg)	d _{estribo} (pulg)	recubrimiento (cm)	A1 (cm ²)	A2 (cm ²)	γ	E _f (GPa)
5/8	3/8	7.5	5.94	5.94	0.80	71.36
nf	CN	f _{fu} * (MPa)	ε _{fu}	ε _{fd}	f _{fd} (MPa)	ε _c
1.5	0.8	815.42	0.011	0.010	713.60	0.003

Fuente: Propia

Donde:

A : Área parcial de la sección transversal de las barras GFRP.

A_g : Área de la sección transversal del elemento.

b_w : Ancho del alma de la sección.

CN : Factor de reducción por condición ambiental.

d : Peralte de la sección del elemento.

d_b : Diámetro de la barra longitudinal.

d_{estribo}: Diámetro de la barra transversal.

E_c : Módulo de elasticidad del concreto.

E_f : Módulo de elasticidad del refuerzo longitudinal GFRP.

f'_c : Esfuerzo de compresión del concreto, MPa

f_{fd} : Resistencia a la tracción para diseño con barras GFRP.

f_{fu} : Resistencia a la tracción última de barras GFRP.

ε_c : Deformación unitaria última.

ε_{fd} : Deformación de diseño de ruptura para el refuerzo GFRP.

ε_{fu} : Deformación última de ruptura para el refuerzo GFRP.

P_u : Carga axial última.

S_o : Espaciamiento entre refuerzos transversales.

γ : Relación entre el peralte y el diámetro del elemento.

En la Tabla 22 se muestra el procedimiento previo necesario para el diseño de la sección circular reforzada con barras de GFRP.

Tabla 22: Procedimiento previo del diseño de la sección circular reforzada con barras de GFRP

$\rho_{f1}=$	0.00464		
$\rho_{f2}=$	0.00464		
Asumiendo:			
$K_c=$	0.2	Según el ACI	
$\rho_f=$	0.010		
De acuerdo al ACI 440:			
$K_c=$	0.198		
Tabulando otra vez:			
$K_c=$	0.18		
$\rho_f=$	0.00701		
De acuerdo al ACI 440:			
$K_c=$	0.172		
Entonces:			
$c=$	5.49 cm		
$V_c=$	52.0	kN	CONSERVADOR
$f_{fv}=$	285.45	MPa	Esfuerzo a tracción por corte
$r_b/db(MIN)=$	3	(ACI)	
$f_{fb}=$	321.12	MPa	
$f_{fv} = 0.004E_{fv} \leq f_{fb}$			
285.4536	<	321.12	
$f_{fv}=$	285.4536	MPa	
$A_{fv,mín}=$	24.52	mm ²	$V_{mín}= 4.48 \quad \text{Ton}$

Fuente: Propia

En la Tabla 23 se muestran los resultados del diseño de la sección circular reforzada con barras de GFRP.

Tabla 23: Resultados del diseño por corte de la sección circular reforzada con barras de GFRP

						Pn=	560.78	kN
						Mn=	143.67	kN.m
						c/d=	0.189	< 1
						c=	6.05	cm
						Vc=	5.7	Tn
CASO 1: 15% CARGA AXIAL								
<u>CASO A</u>			<u>CASO B</u>			<u>CASO C</u>		
Para:	Vu=	8 Vmín	Para:	Vu=	12 Vmín	Para:	Vu=	24 Vmín
Vu=	35.84	Tn	Vu=	53.76	Tn	Vu=	107.52	Tn
Vf=	42.06	Tn	Vf=	65.95	Tn	Vf=	137.63	Tn
Afv=	2.30	cm2	Afv=	3.61	cm2	Afv=	7.53	cm2
ρf=	0.0018		ρf=	0.0028		ρf=	0.0059	
						Pn=	1121.55	kN
						Mn=	143.68	kN.m
						c/d=	0.206	< 1
						c=	6.61	cm
						Vc=	6.3	Tn
<u>CASO A</u>			<u>CASO B</u>			<u>CASO C</u>		
Para:	Vu=	8 Vmín	Para:	Vu=	12 Vmín	Para:	Vu=	24 Vmín
Vu=	35.84	Tn	Vu=	53.76	Tn	Vu=	107.52	Tn
Vf=	41.53	Tn	Vf=	65.43	Tn	Vf=	137.11	Tn
Afv=	2.27	cm2	Afv=	3.58	cm2	Afv=	7.50	cm2
ρf=	0.0018		ρf=	0.0028		ρf=	0.0059	
						Pn=	1682.33	kN
						Mn=	162.19	kN.m
						c/d=	0.218	< 1
						c=	6.97	cm
						Vc=	6.6	Tn
<u>CASO A</u>			<u>CASO B</u>			<u>CASO C</u>		
Para:	Vu=	8 Vmín	Para:	Vu=	12 Vmín	Para:	Vu=	24 Vmín
Vu=	35.84	Tn	Vu=	53.76	Tn	Vu=	107.52	Tn
Vf=	41.19	Tn	Vf=	65.08	Tn	Vf=	136.76	Tn
Afv=	2.25	cm2	Afv=	3.56	cm2	Afv=	7.49	cm2
ρf=	0.0018		ρf=	0.0028		ρf=	0.0058	
						Pn=	2243.10	kN
						Mn=	158.97	kN.m
						c/d=	0.234	< 1
						c=	7.50	cm
						Vc=	7.1	Tn
<u>CASO A</u>			<u>CASO B</u>			<u>CASO C</u>		
Para:	Vu=	8 Vmín	Para:	Vu=	12 Vmín	Para:	Vu=	24 Vmín
Vu=	35.84	Tn	Vu=	53.76	Tn	Vu=	107.52	Tn
Vf=	40.69	Tn	Vf=	64.58	Tn	Vf=	136.26	Tn
Afv=	2.23	cm2	Afv=	3.53	cm2	Afv=	7.46	cm2
ρf=	0.0017		ρf=	0.0028		ρf=	0.0058	
CASO 4: 60% DE LA CARGA AXIAL ÚLTIMA								

Fuente: Propia

En la Tabla 24 se muestra un cuadro resumen de semejanzas y diferencias de las consideraciones que se tomaron en cuenta para el diseño por corte con barras GFRP respecto al diseño convencional con barras de acero.

Tabla 24: *Parámetros y criterios de aceptación para procedimientos no lineales en columnas de concreto armado*

DISEÑO POR CORTE ACERO Y GFRP	
SEMEJANZAS	<p>La ecuación para calcular la cortante del refuerzo es la misma.</p> <p>La cortante última tiene que ser menor igual al minorado del aporte del cortante del concreto más la cortante del refuerzo.</p> <p>Se emplea la misma ecuación para el cálculo del área mínima de corte.</p>
DIFERENCIAS	<p>En la ecuación de cortante en concreto para el diseño de corte con GFRP se considera una variable k para estimar la profundidad al eje neutro.</p> <p>La deformación última de las varillas GFRP al ser muy grande con respecto al concreto se considera para el diseño un valor de 0.010.</p>

Fuente: Propia

4.2.3. Comparación de resultados del Diseño por Corte de la ST con barras de acero y GFRP

A continuación, se muestran las Tablas 25, 26, 27, 28 y 29 las cuales contienen cuadros resúmenes de los resultados obtenidos para los diferentes valores de carga axial analizados.

Tabla 25: *Resumen de resultados obtenidos para $P_n = 56.08T_n$*

V_u	ρ_s	ρ_f	Razón % (ρ_s/ρ_f)
8	0.00100	0.00180	55%
12	0.00174	0.00282	62%
24	0.00397	0.00589	67%

Fuente: Propia

Figura 35: Gráfico Cuantía VS $V_u/V_{mín}$ para $P_n = 56.08T_n$ comparativo entre diseño por corte de barras de acero y GFRP

Fuente: Propia

Tabla 26: Resumen de resultados obtenidos para $P_n = 112.16Tn$

V_u	ρ_s	ρ_f	Razón % (ρ_s/ρ_f)
8	0.00088	0.00178	50%
12	0.00162	0.00280	58%
24	0.00385	0.00586	66%

Fuente: Propia

Figura 36: Gráfico Cuantía VS $V_u/V_{mín}$ para $P_n = 112.16Tn$ comparativo entre diseño por corte de barras de acero y GFRP

Fuente: Propia

Tabla 27: Resumen de resultados obtenidos para $P_n = 168.23Tn$

V_u	ρ_s	ρ_f	Razón % (ρ_s/ρ_f)
8	0.00076	0.00176	43%
12	0.00151	0.00278	54%
24	0.00385	0.00585	66%

Fuente: Propia

Figura 37: Gráfico Cuantía VS Vu/Vmín para $P_n = 168.23T_n$ comparativo entre diseño por corte de barras de acero y GFRP

Fuente: Propia

Tabla 28: Resumen de resultados obtenidos para $P_n = 224.31T_n$

Vu	ρ_s	ρ_f	Razón % (ρ_s/ρ_f)
8	0.00065	0.00174	37%
12	0.00139	0.00276	50%
24	0.00362	0.00583	62%

Fuente: Propia

Figura 38: Gráfico Cuantía VS $V_u/V_{mín}$ para $P_n= 224.31T_n$ comparativo entre diseño por corte de barras de acero y GFRP

Fuente: Propia

En las Figuras 35, 36, 37 y 38 se obtuvieron las gráficas comparativas entre el diseño por corte con barras de acero y GFRP. En las Tablas 25, 26, 27 y 28 se aprecia que para las diferentes cargas axiales aplicadas se necesita en promedio un 56% más en cuantía cuando se emplean las barras GFRP con respecto del acero.

4.3. Diagrama Momento-Curvatura

El diagrama momento-curvatura representa la relación que existe entre el momento al que está sometido la sección y, la curvatura, que es el ángulo que se genera en el diagrama de deformaciones, el cual se puede definir como el cociente de la deformación en la fibra superior y la distancia desde dicha fibra hasta el eje neutro.

4.3.1. Metodología para la Construcción del Diagrama-Momento Curvatura de una sección circular

Generalmente, las deformaciones debido a la flexión en una sección de concreto armado suelen ser las más predominantes. La curvatura se puede definir como el cambio de ángulo por unidad de longitud en una ubicación dada, a lo largo de un eje sometido a cargas que producen flexión.

Figura 39: Curvatura de un elemento.

Fuente: Otazzi (2004)

En la Figura 39, se muestra una sección sometida a carga axial y flexión, y la curvatura generada. A partir de dicha curvatura, la cual está representada con el símbolo Ψ , se puede establecer lo conocido como ductilidad por curvatura.

En el diseño de elementos estructurales de concreto armado, es de gran importancia que dichos elementos tengan un comportamiento dúctil ante cargas de servicio y especialmente de sismo. Dicha ductilidad permite que el elemento no falle abruptamente y también que exista una redistribución de esfuerzo en estructuras hiperestáticas. La capacidad de disipación de energía y comportamiento inelástico de una sección son características que pueden entenderse de mejor forma si se construye un diagrama momento curvatura (Otazzi, 2004).

El procedimiento que se seguirá es el enfoque capa por capa donde se consideran las siguientes asunciones para el análisis:

- Las secciones planas permanecen planas en flexión, de manera que la tensión del concreto y el refuerzo es proporcional al eje neutro.
- Se suponen las tensiones en el centroide de cada tira o capa constante en todo su espesor.
- Existe un vínculo perfecto entre el refuerzo y el concreto que lo rodea.
- No se considera el aporte del concreto en tracción.

Figura 40: Perfil de esfuerzos y deformaciones de una sección circular

Fuente: Abdeldayem & Benmokrane (2018)

En la Figura 40 se muestran las fuerzas internas en tracción y compresión de una sección transversal circular reforzada con GFRP y las distancias al eje neutro en la cual se desprecia el aporte de las barras en compresión.

A continuación, se describe los pasos a seguir para el cálculo de un solo punto (M y Ψ) del diagrama momento curvatura:

1. Definir el diámetro de la sección, cantidad, disposición y diámetro de las barras de refuerzo transversal y longitudinal, su resistencia a la tracción de fluencia o última y módulo de elasticidad. Además, la resistencia a la compresión del concreto y su respectivo módulo de elasticidad.
2. Dividir la sección en números finitos de fibras pequeñas con un espesor constante de 1mm.
3. Determinar la resistencia a la compresión de diseño ϕP_n de la sección. Dicho valor se calcula dependiendo del material de refuerzo, es decir, acero o GFRP y, a partir del ϕP_n , se establece un porcentaje del mismo. En este caso se considerará de 15%, 30%, 45% y 60%.
4. Asumir un valor inicial de deformación del concreto (ϵ_{c1}) de la fibra superior y un valor tentativo para la distancia al eje neutro (c_1).
5. Calcular el área total (A_{ci}), la deformación (ϵ_{ci}), el esfuerzo (f_{ci}) de cada fibra y la fuerza resultante (F_{ci}) de cada una. Se considerará una sección confinada,

por lo tanto, se debe calcular el área del recubrimiento y el área del núcleo rodeada por los espirales. Las Ecuaciones 3.51, 3.52, 3.53 y 3.54 pueden ser usadas para el cálculo del área total y el área del núcleo.

$$z_i = i * t - \frac{t}{2} \quad 3.51$$

$$y_i = R - z_i \quad 3.52$$

$$b_i = 2 * \sqrt{R^2 - y_i^2} \quad 3.53$$

$$A_{ci} = b_i * t \quad 3.54$$

Donde:

A_{ci} = Área total de la fibra “i”.

b_i = Base de la fibra “i”.

R = Radio de la sección circular.

t = Espesor de la fibra.

y_i = Distancia desde el centro de la fibra hacia el centro de la sección circular.

z_i = Distancia de la superficie superior de la sección hacia el centro de la fibra “i”.

Para el cálculo del esfuerzo de cada fibra se presenta dos modelos. El primero es para concreto no confinado, y, el segundo, para concreto confinado. El modelo propuesto por Popovics (1973) para un concreto no confinado está dado por la Ecuación 3.55:

$$f_c = f'_c \frac{x^r}{(r - 1) + x^r} \quad 3.55$$

Donde: $x = \epsilon_c / \epsilon_{co}$; $\epsilon_{co} = 0.002$; $r = 0.8 + f'_c / 17$

f_c = Esfuerzo a compresión de la fibra correspondiente a una deformación.

f'_c = Esfuerzo a la compresión del concreto.

El modelo propuesto por Mander et al. (1988) para el efecto del concreto confinado está dado por las siguientes Ecuaciones:

$$f_c = f'_{cc} \frac{zn}{(n-1) + z^n} \quad 3.56$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right] \quad 3.57$$

$$f'_{cc} = f'_c \left[-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_c}} - 2 \frac{2 f'_l}{f'_c} \right] \quad 3.58$$

$$f'_l = 0.5 k_e f_y \frac{4 A_t}{s' d_s} \quad 3.59$$

Donde: $z = \epsilon_c / \epsilon_{cc}$; $n = E_c / (E_c - E_{sec})$; $E_{sec} = f'_{cc} / \epsilon_{cc}$

$$k_e = \left(1 - \frac{s'}{2 d_s} \right) / (1 - \rho_{cc}) \quad 3.60$$

Donde:

A_t = Área de la sección transversal de espirales.

d_s = Diámetro de núcleo del concreto.

E_{sec} = Relación entre el esfuerzo del concreto confinado y la deformación máxima del esfuerzo a compresión del concreto confinado.

f_c = Esfuerzo a compresión de la fibra correspondiente a una deformación.

f'_{cc} = Esfuerzo del concreto confinado.

f'_c = Esfuerzo a la compresión del concreto.

f_y = Esfuerzo de fluencia del acero, el cual es reemplazado por la resistencia del doblé de los espirales GFRP, f_{fb} , el cual no debe exceder el 0.004 el módulo de elasticidad de las barras GFRP, E_{ft} .

k_e = Coeficiente de confinamiento para espirales.

n = Relación entre el módulo de elasticidad del concreto y la diferencia entre el módulo de elasticidad del concreto y el módulo de elasticidad secante.

s' = Espaciamiento vertical entre espirales.

z = Relación entre la deformación del concreto correspondiente a un esfuerzo del concreto y la deformación máxima del esfuerzo a compresión del concreto confinado.

ϵ_{cc} = Deformación máxima del esfuerzo a compresión del concreto confinado.

$\epsilon_{co} = 0.002$

ρ_{cc} = Ratio del área del refuerzo longitudinal y el área del núcleo de la sección.

Para el cálculo de las deformaciones de cada fibra se emplea la Ecuación 3.61 obtenida de la relación de deformaciones y el eje neutro de la Figura 39.

$$\epsilon_{ci} = \epsilon_{c1} * \frac{c_1 - z_i}{c_1} \quad 3.61$$

6. Calcular la contribución de las barras de acero en la zona de tracción y compresión mediante las distancias (z_{sj} y y_{fj}), área (A_{sj}), la deformación (ϵ_{sj}), esfuerzo (f_{sj}), y la fuerza (F_{sj}) de cada barra de refuerzo.

Para las barras ubicadas en la zona de tracción se tiene la Ecuación 3.62.

$$f_{sj} = \epsilon_{sj} * E_{st} \quad 3.62$$

Para las barras ubicadas en la zona de compresión se tiene la Ecuación 3.63.

$$f_{sj} = \epsilon_{sj} * E_s \quad 3.63$$

Donde $f_{sj} < f_y = 4\,200 \text{ kg/cm}^2$ (para barras de acero).

7. Realizar la sumatoria de todas las fuerzas de las fibras de concreto y de las barras de refuerzo ($\sum F_{ci}$ y $\sum F_{sj}$) para obtener la carga axial P1. A su vez, de

la suma de los momentos de las fibras de concreto y las barras de refuerzo se obtiene el momento M1.

8. Si el valor P1 es igual al porcentaje de carga axial última establecido, entonces el valor de c_1 es el correcto, de no ser así, se asume otro valor de c_1 y repite el proceso del paso 5 al 7.
9. Una vez establecido el valor correcto de c_1 , se determina la curvatura Ψ como el cociente de la deformación del concreto en la fibra superior ε_{c1} y c_1 , como se muestra en la Ecuación 3.64, y así establecer una relación entre estos.

$$\Psi_1 = \varepsilon_{c1}/c_1 \quad 3.64$$

10. Este proceso se repite para un rango de valores ε_{c1} . En este caso, se escogieron valores desde 0.0005 hasta 0.008 con un incremento de 0.00025 con el fin de construir el diagrama Momento-Curvatura.

4.3.2. Ejemplo de aplicación de Diagrama Momento Curvatura de la ST con barras Acero y GFRP

En las Tablas 29 y 30 se muestran los datos de la sección circular reforzado con cada tipo de barra. Además, en la Figura 41, se observa la distribución y distancia entre barras dentro de la sección circular a analizar.

Tabla 29: Datos de la sección circular reforzado con acero

D (cm)	Db (pulg)	Dspiral (pulg)		R (cm)
40	5/8	3/8		7.5
f'c (kg/cm2)	f _y (kg/cm2)	Ec (kg/cm2)	Es (kg/cm2)	εfy
350	4200	280624.3	2000000	0.0021

Fuente: Propia

Tabla 30: Datos de la sección circular reforzado con GFRP

f _{fu} * (MPa)	f _{fu} (MPa)	E _c (MPa)	E _{ft} (GPa)	E _{fc} (GPa)	ε _{fu}
552	441.6	28062	54.9	43.92	0.0107

Fuente: Propia

Donde:

D : Diámetro de la sección.

D_b : Diámetro de la barra longitudinal.

D_{spiral} : Diámetro de la barra transversal.

E_c : Módulo de elasticidad del concreto.

E_{fc} : Módulo de elasticidad del refuerzo longitudinal GFRP reducido.

E_{ft} : Módulo de elasticidad del refuerzo longitudinal GFRP.

E_s : Módulo de elasticidad del refuerzo longitudinal del acero.

f'_c : Esfuerzo de compresión del concreto.

$ffu *$: Esfuerzo último de la fibra GFRP.

f_y : Resistencia a la fluencia del acero.

R : Recubrimiento

ε_{fy} : Deformación unitaria del acero

ε_{fu} : Deformación última de ruptura para el refuerzo GFRP.

Figura 41: Geometría y distribución de la sección circular en cm

Fuente: Propia

Figura 42: Diagrama Momento-Curvatura para sección reforzada con acero
Fuente: Propia

Figura 43: Diagrama Momento-Curvatura para sección reforzada con GFRP
Fuente: Propia

Figura 44: Diagrama Momento-Curvatura para 15% de resistencia máxima a la compresión de diseño
Fuente: Propia

Figura 45: Diagrama Momento-Curvatura para 30% de resistencia máxima a la compresión de diseño
Fuente: Propia

Figura 46: Diagrama Momento-Curvatura para 45% de resistencia máxima a la compresión de diseño
Fuente: Propia

Figura 47: Diagrama Momento-Curvatura para 60% de resistencia máxima a la compresión de diseño
Fuente: Propia

En las Figuras 42 y 43 se obtuvieron los Diagramas Momento-Curvatura para cada sección circular con refuerzo de acero y GFRP (enfoque B) analizados según el porcentaje de carga última de diseño aplicada de 15%, 30%, 45% y 60% respectivamente. Además, en las Figuras 44, 45, 46 y 47 se muestran las comparaciones de Diagramas Momento-Curvatura entre las secciones reforzadas de acero y GFRP para cada porcentaje de carga última de diseño mencionados.

4.3.3. Comparación de resultados del Diagrama Momento-Curvatura de la ST reforzada con barras de acero y GFRP

- En la Figura 42 y Figura 43, se observan que, en ambos casos, a mayor carga axial, el momento máximo de la sección aumenta, mientras que, su respectiva curvatura disminuye para ambos tipos de refuerzos.
- En la Figura 44, cuando se tiene un 15% de resistencia máxima a la compresión de diseño, para la sección reforzada con acero se tiene un momento máximo de 15.9 ton-m y una curvatura de 0.023 1/m. En cambio, para la sección reforzada con GFRP, se tiene un momento máximo de 12.8 ton-m y una curvatura de 0.029 1/m.
- En la Figura 45, cuando se tiene un 30% de resistencia máxima a la compresión de diseño, para la sección reforzada con acero se tiene un momento máximo de 18.23 ton-m y una curvatura de 0.020 1/m. En cambio, para la sección reforzada con GFRP, se tiene un momento máximo de 13.83 ton-m y una curvatura de 0.024 1/m.
- En la Figura 46, cuando se tiene un 45% de resistencia máxima a la compresión de diseño, para la sección reforzada con acero se tiene un momento máximo de 19.76 ton-m y una curvatura de 0.018 1/m. En cambio, para la sección reforzada con GFRP, se tiene un momento máximo de 14.97 ton-m y una curvatura de 0.021 1/m.
- En la Figura 47, cuando se tiene un 60% de resistencia máxima a la compresión de diseño, para la sección reforzada con acero se tiene un momento máximo de 20.59 ton-m y una curvatura de 0.016 1/m. En cambio, para la sección reforzada con GFRP, se tiene un momento máximo de 16.05 ton-m y una curvatura de 0.018 1/m.

4.4. Idealización de los Diagramas Momento-Curvatura para el cálculo del índice de ductilidad de curvatura

Los parámetros de ductilidad son analizados para asegurar una buena capacidad de deformación de los elementos de concreto armado ubicados en lugares con alta actividad de movimientos telúricos y así evaluar su respuesta sísmica. Se conoce que los índices convencionales relacionan la deformación en el estado final con la deformación cuando empieza el estado plástico. Es por ello, que el estado elástico y plástico deben estar bien definidos cuando se trabaja con barras GFRP (Elshamandy, 2017).

Para secciones reforzadas con acero, la zona elástica concluye con la fluencia del mismo. Por otro lado, en pilotes con GFRP, la zona elástica concluye al inicio de la inelasticidad del concreto en el extremo comprimido. Por lo tanto, la gran diferencia de emplear barras de GFRP en lugar de acero, es la falta de ductilidad en las mismas por lo que se plantea un punto virtual de fluencia para este caso (Elshamandy, 2017).

Para el cálculo de los parámetros de ductilidad, se analizará el índice de ductilidad de curvatura ($\mu\Psi$). Para ello, se define un punto de curvatura de fluencia virtual Ψ_y mediante la idealización del diagrama Momento-Curvatura. En la Figura 48 se muestran tres tipos de curvas idealizadas, donde el tipo 1 es trilineal apropiada para miembros dúctiles con alguna capacidad residual. El tipo 2 para elementos de concreto armado con cierta ductilidad, sin embargo, se pierde capacidad para amplias deformaciones laterales en el punto 3. El tipo 3, la curva bilineal se utiliza para representar la respuesta de elementos frágiles. Es relevante mencionar que las curvas tipo 1 y 2 son dúctiles porque la curvatura “e” ubicado en el punto 2, es al menos dos veces la deformación en “g” ubicado en el punto 1 (Huaco, 2013).

Figura 48: Tipos de curvas idealizadas de Momento-Curvatura

Fuente: Huaco (2013)

Como se muestra en la Figura 49, la curva a analizar será de tipo 2, el cual se asemeja a los resultados presentados en el objetivo previo, donde el primer segmento de línea de la curva idealizada comienza en el origen y tiene una pendiente igual a la rigidez lateral efectiva. La rigidez lateral efectiva se calcula como la rigidez secante del cortante en la base igual al 60% del momento de fluencia. El segundo segmento representa la post fluencia de pendiente positiva (Ψ_d ; M_d) unido al punto de intersección con el primer segmento de forma que las áreas por encima y por debajo de la curva real estén equilibrados. Por último, el tercer segmento de línea representa la pendiente negativa de fluencia hasta el punto donde se intercepta con el 60% del momento de fluencia (ASCE, 2017).

Figura 49: Curva Idealizada

Fuente: ASCE (2017)

Donde:

K_e = Rigidez lateral efectiva.

M_d = Momento máximo.

M_y = Momento de fluencia.

Ψ_y = Curvatura virtual de fluencia.

Ψ_d = Curvatura de inicio de degradación.

El índice de ductilidad de curvatura se expresa con la Ecuación 3.65:

$$\mu_\Psi = \Psi_d / \Psi_y \quad 3.65$$

4.4.1. Ejemplo de aplicación de idealización de Diagrama Momento-Curvatura para cálculo del índice de ductilidad de la sección reforzada con barras de acero y GFRP.

Empleando los Diagramas Momento-Curvatura obtenidos en el objetivo anterior, se idealizaron las curvas mostradas en las Figuras 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56 y 57 para la estimación del índice de ductilidad de la sección para cada caso planteado.

Figura 50: Diagrama Momento-Curvatura idealizado para refuerzo de acero con 15% de resistencia máxima a la compresión de diseño

Fuente: Propia

Figura 51: Diagrama Momento-Curvatura idealizado para refuerzo de GFRP con 15% de resistencia máxima a la compresión de diseño

Fuente: Propia

Figura 52: Diagrama Momento-Curvatura idealizado para refuerzo de acero con 30% de resistencia máxima a la compresión de diseño

Fuente: Propia

Figura 53: Diagrama Momento-Curvatura idealizado para refuerzo de GFRP con 30% de resistencia máxima a la compresión de diseño

Fuente: Propia

Figura 54: Diagrama Momento-Curvatura idealizado para refuerzo de acero con 45% de resistencia máxima a la compresión de diseño

Fuente: Propia

Figura 55: Diagrama Momento-Curvatura idealizado para refuerzo de GFRP con 45% de resistencia máxima a la compresión de diseño

Fuente: Propia

Figura 56: Diagrama Momento-Curvatura idealizado para refuerzo de acero con 60% de resistencia máxima a la compresión de diseño

Fuente: Propia

Figura 57: Diagrama Momento-Curvatura idealizado para refuerzo de GFRP con 60% de resistencia máxima a la compresión de diseño

Fuente: Propia

4.4.2. Comparación del índice de ductilidad de la sección reforzada con barras de acero y GFRP.

- En la Figura 50, para una sección reforzada con barras de acero cargada con $15\% \phi P_n$, se obtiene un índice de ductilidad de 5.00. Por otro lado, en la Figura 51, con barras GFRP se tiene una ductilidad de 6.67.
- En la Figura 52, para una sección reforzada con barras de acero cargada con $30\% \phi P_n$, se obtiene un índice de ductilidad de 4.88. Por otro lado, en la Figura 53, con barras GFRP se tiene una ductilidad de 6.38.
- En la Figura 54, para una sección reforzada con barras de acero cargada con $45\% \phi P_n$, se obtiene un índice de ductilidad de 3.98. En la Figura 55, por otro lado, con barras GFRP se tiene una ductilidad de 5.50.
- En la Figura 56, para una sección reforzada con barras de acero cargada con $60\% \phi P_n$, se obtiene un índice de ductilidad de 3.40. En la Figura 57, por otro lado, con barras GFRP se tiene una ductilidad de 4.68.

En la Tabla 31 se muestra un cuadro resumen con los índices de ductilidad curvatura para la sección con acero y GFRP sometidos a los porcentajes de resistencia máxima a la compresión de diseño.

Tabla 31: Índice de ductilidad de curvatura para sección con acero y GFRP sometido a carga axial

	15% ϕP_n	30% ϕP_n	45% ϕP_n	60% ϕP_n
ACERO	5.00	4.88	3.98	3.40
GFRP	6.67	6.38	5.50	4.68

Fuente: Propia

- La pendiente del segundo tramo del diagrama Momento-Curvatura idealizado para la sección reforzado con acero, que representa la rigidez a la flexión en el rango plástico, es en promedio 17.2% la pendiente del primer tramo, la cual representa la rigidez a la flexión efectiva de la sección en cada caso.
- Para la sección reforzada con GFRP sometido a 15%, 30%, 45% y 60% de la resistencia máxima a la compresión de diseño, la pendiente que representa la rigidez a la flexión en el rango plástico del segundo tramo de línea del diagrama Momento-Curvatura idealizado es 20.3%, 17.3%, 10.0% y 9.4% la pendiente del primer tramo, respectivamente.

En la Tabla 32 se muestra un cuadro resumen con los ratios porcentuales de la rigidez a la flexión efectiva para las secciones reforzadas con acero como GFRP sometidos a los porcentajes de resistencia máxima a la compresión de diseño.

Tabla 32: Ratio porcentual de la rigidez a la flexión para sección con acero y GFRP respecto a carga axial

	15% ϕP_n	30% ϕP_n	45% ϕP_n	60% ϕP_n
ACERO	17.3%	17.6%	17.8%	16.2%
GFRP	20.3%	17.3%	10.0%	9.4%

Fuente: Propia

5. CONCLUSIONES

Se realiza el análisis y comparación de resultados obtenidos a lo largo del informe para el desarrollo de las siguientes conclusiones.

- En la Figura 31, analíticamente, la resistencia a la carga axial del diagrama de interacción nominal uniaxial de la sección reforzada con GFRP disminuye en promedio 21% con respecto a la sección reforzada con acero.
- En la Figura 32, el diagrama de interacción nominal uniaxial para una misma carga axial máxima, el momento máximo asociado se reduce en 17% en la sección reforzada con GFRP respecto de la reforzada con acero.
- En la Figura 33, el diagrama de interacción de diseño uniaxial, la carga axial máxima de la sección reforzada con GFRP es un 32% menos respecto al acero y el momento máximo asociado es un 24% menos con respecto al acero.
- En la Figura 34, las plataformas de los diagramas de interacción uniaxial de diseño se estima una reducción de carga axial máxima de 31% en la sección reforzada con GFRP respecto del acero.
- En el diseño por corte, se obtiene en promedio un aumento del 56% en cuantía cuando se emplean espirales GFRP con respecto del acero para las diferentes cargas axiales aplicadas en el análisis.
- En la Figura 42 y Figura 43, se observan que, en ambos casos, a mayor carga axial, el momento máximo de la sección aumenta, mientras que, su respectiva curvatura disminuye para ambos tipos de refuerzos.
- A pesar de que las secciones reforzadas con GFRP, en las Figuras 44, 45, 46 y 47, se obtengan mayor curvatura respecto a la reforzada con acero, los momentos máximos asociados a dichas curvaturas son menores en 22% en promedio.
- Los índices de ductilidad de curvatura obtenidos para la sección refuerzo de GFRP, presentados en las Figuras 51, 53, 55, y 57, son mayores en 26% en promedio con respecto a las del acero presentados en las Figuras 50, 52, 54 y 56. Por lo tanto, se concluye que, para el caso de estudio, la sección reforzada con GFRP presenta una ductilidad de curvatura ligeramente mayor que una reforzada con acero.
- La pendiente del segundo tramo, que representa la rigidez a la flexión en el rango plástico, es en promedio 17.2% la pendiente del primer tramo, que representa la rigidez a la flexión efectiva para los casos estudiados con barras de refuerzo de acero.

- La rigidez a la flexión en el rango plástico para la sección reforzada con GFRP sometido a 15%, 30%, 45% y 60% de la resistencia máxima a la compresión de diseño es 20.3%, 17.3%, 10.0% y 9.4% la pendiente del primer tramo, respectivamente. Por lo que, a menor carga axial, dicha sección puede desarrollar aporte de tracción de las barras GFRP y la rigidez a la flexión efectiva aumenta.

6. RECOMENDACIONES

A continuación, se presentan recomendaciones sobre el análisis y diseño entre ambos tipos de refuerzo estructural encontradas a lo largo del desarrollo del informe.

- Para obtener un diseño conservador se recomienda despreciar la contribución de las barras GFRP en compresión debido a su naturaleza anisotrópica, quiere decir, que la fuerza varía según la dirección en la que es analizada, por lo que no asegura un análisis exacto.
- A pesar de que la deformación unitaria máxima de las barras GFRP excede el 2%, el comité 440 ACI (2015) recomienda trabajar con una deformación máxima de 1%, por lo tanto, las barras GFRP poseen una resistencia a la tracción adicional implícita que es reducida, pero que lo vuelve un diseño conservador.
- En el diseño por corte con barras GFRP se considera una fuerza cortante del concreto menor de la que se obtiene con barras de acero debido a la baja rigidez axial de las barras GFRP en flexión luego del agrietamiento, por lo que se tiene una profundidad menor al eje neutro.
- En el análisis se debe considerar el esfuerzo a la tracción última de las barras GFRP, el cual es un dato brindado por el fabricante.
- Se recomienda realizar un análisis integral que verifique el comportamiento de la sección del pilote en conjunto con el suelo en contacto.
- Debido a que el informe presenta un análisis y diseño teórico, se recomienda comparar los resultados con ensayos experimentales.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdeldayem A. & Benmokrane B. (2018). Flexural Stiffness of GFRP and CFRP -RC Circular Members under loads based on Experimental and Curvature Analysis. *Aci Estructural Journal*, 115. <https://doi.org/10.14359/51702235> [Consulta: 18 de octubre de 2018].
- ACI Committe 318. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14)*. Recuperado de: http://uoqasim.edu.iq/e_Learning/lec_file/ACI%20318R-14.pdf [Consulta: 18 de octubre de 2018].
- Ahmed E. (2016). Case study: Design, Construction, and Performance of the La Chancelière Parking Garage's Concrete Flat Slabs Reinforced with GFRP bars. *Journal of Composites for Construction*, 21(1). [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000656](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000656) [Consulta: 22 de mayo de 2019].
- ASCE (2017). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. Recuperado de: <https://doi.org/10.1061/9780784414859>. [Consulta: 17 de junio de 2019].
- ASSTHO (2014). *ASSTHO LRFD Bridge Design Specifications*. Recuperado de <https://www.dot.state.mn.us/bridge/pdf/lrfdmanual/lrfdbridgedesignmanual.pdf> [Consulta: 18 de setiembre de 2018].
- Avanzate Tecnologie Plastiche (2006). GFRP systems for diaphragm walls and piles. Angri, Italia. Recuperado de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=14&ved=2ahUKEwjgxaffi4LnAhWGELkGHYVzCUoQFjANegQIBRAC&url=http%3A%2F%2Falb-rebar.com%2Fdoc%2FBrochure_Soft_Eye_rev03_-_Manuale_def-1_rid.pdf&usg=AOvVaw3Linmfl6zKCEUOXgPhz9Ay [Consulta: 13 de enero de 2020].
- Bendezú, J. (2002) *Los plásticos reforzados con fibra de vidrio (PFRV), sus aplicaciones y desarrollo en la Industria Nacional* (Tesis de pregrado). Universidad Mayor de San Marcos, Lima, Perú. Recuperado

- de http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/1641/Bendezu_rj.pdf?sequence=1 [Consulta: 18 de setiembre de 2018].
- Berg A. et al. (2006). Construction and cost analysis of an FRP reinforced concrete bridge deck. *Construction and Building Materials*, 20, 515-526. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.007> [Consulta: 20 de octubre de 2018].
- Bonić, Z., Ćurčić, G. T., Davidović, N., & Savič, J. (2015). Damage of concrete and reinforcement of reinforced-concrete foundations caused by environmental effects. *Procedia Engineering*, 117, 411-418. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.187> [Consulta: 20 de octubre de 2018].
- Brindis, E. A. (2002). Biblioteca Virtual de las Ciencias de Cuba. Recuperado de http://www.bibliociencias.cu/gsd/collect/libros/import/Polimeros_Propiedades_Basicas.pdf [Consulta: 14 de setiembre de 2018].
- Brown J. (2015). Glass fibre reinforced polymer bars in concrete compression members. *International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering*. 1590-1599 <https://doi.org/10.14264/uql.2016.767> [Consulta: 20 de octubre de 2018].
- Comité 440 ACI (2015). *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-15)* [https://doi.org/10.1061/40753\(171\)158](https://doi.org/10.1061/40753(171)158) [Consulta: 22 de setiembre de 2018].
- D'Antino, T., & Pisani, M. A. (2018). Influence of sustained stress on the durability of glass FRP reinforcing bars. *Construction and Building Materials*, 187, 474–486. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.175>. [Consulta: 21 de setiembre de 2018].
- Deitz, D., Harik, I, & Gesund, H. (2003). Physical properties of glass fiber reinforced polymer rebars in compression. *Journal of Composites for Construction*, 7(4), 363–366. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2003\)7:4\(363\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2003)7:4(363)). [Consulta: 21 de setiembre de 2018].
- De La Cruz, C. (2004). *Resistencia a la flexión y adherencia en vigas de hormigón armado con barras de polímeros reforzados con fibra FRP*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Recuperado de

<http://bdigital.unal.edu.co/39912/1/43086657.20044.pdf> [Consulta: 18 de setiembre de 2018].

Devoto, J. (2015) *Influencia de las patologías en la durabilidad del concreto armado de edificaciones en zonas cercanas al mar en la ciudad de Paita – Piura 2015*. (Tesis de pregrado, Universidad Católica Los Ángeles de Chimbote) Recuperado de http://repositorio.uladech.edu.pe/bitstream/handle/123456789/3799/EDIFICACIONES_CONCRETO_ARMADO_DEVOTO_PATINO_JORGE_ANTONIO.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Consulta: 18 de octubre de 2018].

Elshamandy, M. (2017). *GFRP reinforced concrete columns under simulated seismic loading*. (Tesis de doctorado). Universidad de Sherbrooke. Recuperado de https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/10242/Mohammed_Mohammed_Gaber_Elshamandy_PhD_2017.pdf?sequence=6&isAllowed=y [Consulta: 31 de mayo de 2019].

Elshamandy, M., Farghaly, A. S., & Benmokrane, B. (2018). Experimental behavior of glass fiber-reinforced polymer-reinforced concrete columns under lateral cyclic load. *ACI Structural Journal*, 115(2), 337–349. <https://doi.org/10.14359/51700985> [Consulta: 15 de noviembre de 2018].

Escamilla L. & Loza J. (2004). Estado del arte en barras corrugadas de fibra de vidrio “GFRP” para refuerzo en elementos de concreto. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Recuperado de: http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_13/te_02/ar_16.pdf [Consulta: 18 de octubre de 2018].

Eyzaguirre C. (2014). *Diseño y construcción de un muelle para embarque de minerales*. (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería). Recuperado de http://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_4f87833136bb658620194865167b1e07 [Consulta: 15 de noviembre de 2018].

Faizan, S. & Shariq, M. (2018). GFRP bars for RC structures-A Review. International Conference on Advances in Construction Materials and Structures (ACMS-2018) Conference paper. India. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/323096663_GFRP_bars_for_RC_structures-A_Review [Consulta: 16 de octubre de 2018].

- Fernández S. (2013). *Evaluación y proceso constructivo de reparación del puerto artesanal Huacho*. (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería). Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/3763> [Consulta: 14 de setiembre de 2018].
- Gonzales de la Cotera S. (1998). Corrosión. Conferencia organizada por el American Concrete Institute, Capítulo Peruano. Recuperado de web.asocem.org.pe/asocem/bib_img/67826-8-1.pdf [Consulta: 15 de setiembre de 2018].
- Guerra C. (2014). *Estudio de la corrosión atmosférica sobre dos tipos de acero de bajo carbono en instalaciones industriales petroleras cercanas al mar en el noroeste del Perú*. (Tesis de maestría, Universidad Nacional mayor de San Marcos). Recuperado de <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/3689> [Consulta: 15 de setiembre de 2018].
- Hinostroza J. (2018). Estudio del comportamiento estructural de vigas de concreto reforzadas con barras de basalto. (Tesis de posgrado, Pontificia Católica del Perú). Recuperado de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/11604> [Consulta: 16 de setiembre de 2018].
- Huaco G. (2003). *Procedure to rehabilitate extremely damaged concrete members using innovative materials and devices*. (Tesis doctoral). Universidad de Texas en Austin, EE.UU. Recuperado de <https://fsel.engr.utexas.edu/pdfs/DISSERTATION%20GUILLERMO%20HUACO%20rs1.pdf> [Consulta: 17 de junio de 2019].
- Jabbar, S. A., & Farid, S. B. H. (2018). Design of RC Columns Using Glass FRP Reinforcement. *Journal of Composites for Construction*. <https://doi.org/10.1016/j.kijoms.2018.02.002> [Consulta: 8 de setiembre de 2018].
- Jawaheri H. & Nanni A. (2013). Influence of sustained stress on the durability of glass FRP reinforcing bars. *Construction and Building Materials*, 187, 474–486. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000354](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000354) [Consulta: 8 de setiembre de 2018].

- Jawaheri H. & Nanni A. (2017). Flexural Stiffness and Second-Order effects in FRP-RC frames. *ACI Structural Journal*, 114 (2), 533-543. <https://doi.org/10.14359/51689257> [Consulta: 15 de setiembre de 2018].
- Joaquim, F., Pérez, D., Carmen, I., & Rivas, W. (2017). Estructuras de hormigón armado con barras de Polímero Reforzado con Fibras de Vidrio (PRFV). Estado del arte. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 11(3), 1-16. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/1939/193955164003.pdf> [Consulta: 8 de setiembre de 2018].
- Larralde, J., & Silva Rodríguez, R. (1992). Nuevo tipo de hormigón para refuerzo. *Revista de Obras Públicas*, 3(315). Recuperado de http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1992/1992_noviembre_3315_05.pdf [Consulta: 5 de setiembre de 2018].
- Loayza J. (2008). *Reparación de un Muro de Albañilería Confinada mediante barras de Fibra de Vidrio*. (Tesis de pregrado, Pontificia Católica del Perú). Recuperado de http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/182/LOAYZA_JUAN_REPARACION_MURO_ALBA%C3%91ILERIA_CONFINADA_BARRAS.pdf?sequence=1 [Consulta: 14 de setiembre de 2018].
- Malnati P. (1 de diciembre de 2011) A hidden revolution: composite rebar gains strength [Mensaje en un blog]. CompositesWorld. Recuperado de https://www.compositesworld.com/articles/a-hidden-revolution-frp-rebar-gains-strength?fbclid=IwAR3FvlenKO_Z24WEqNtKFW_F8PL3QjvFm6gO9k-W7DR1xBsBAatIITUKm5OU [Consulta: 18 de mayo de 2019].
- McCormac, J & Brown, R. (2011). *Diseño de concreto reforzado*. México D.F, México. Editorial Alfaomega Grupo Editor. Recuperado de https://www.u-cursos.cl/usuario/037b375d320373e6531ad8e4ad86968c/mi_blog/r/DiseA_o_de_Concreto_Reforzado_8_edicion_.pdf [Consulta: 20 de octubre de 2018].
- Ministerio del Ambiente (2019). Distritos de Lima alcanzan hasta 100% de humedad relativa. Lima: *Senamhi*. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=prensa&n=969> [Consulta: 25 de mayo de 2019].
- Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento. (2016). *Norma Técnica peruana E050 de suelos y cimentaciones*. Recuperado de

<http://www3.vivienda.gob.pe/DGPRVU/docs/RNE/T%C3%ADtulo%20III%20Edificaciones/53%20E.050%20SUELOS%20Y%20CIMENTACIONES.pdf>

[Consulta: 16 de noviembre de 2018].

Molina E. (2009). *Monitoreo y diagnóstico de estructuras de concreto armado afectadas por corrosión de cloruros*. (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería). Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/439> [Consulta: 16 de setiembre de 2018].

Moscol T. (2013). *Mejoras para la protección anticorrosiva en la zona splash de los pilotes en el muelle del terminal Bayóvar*. (Tesis de pregrado, Universidad de Piura). Recuperado de: https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2758/IME_169.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Consulta: 8 de abril de 2019].

Mufti, A. et al (2005). Durability of GFRP reinforced concrete in field structures. Proceedings of the 7th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures - FRPRCS-7, (June 2014), 889–895. Recuperado de http://isiscanada.com/news/durability/GFRP_Durability_-_2005_Nov.pdf [Consulta: 5 de setiembre de 2018].

Nanni A, De Luca A and Jawaheri H (2014) Reinforced concrete with FRP bars (London: CRC Press) p 24,57 Recuperado de <https://www.crcpress.com/Reinforced-Concrete-with-FRP-Bars-Mechanics-and-Design/Nanni-De-Luca-Jawaheri-Zadeh/p/book/9780415778824> [Consulta: 13 de enero de 2020].

Nanni, A. & Faza, A (2014). Design and construction of concrete reinforced with FRP bars: An emerging technology. Concrete International, (March 2014), Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/288882978_Designing_and_constructing_with_FRP_bars_An_emerging_technology [Consulta: 13 de enero de 2020].

Navarro, C. (2006), *Soldaduras de uniones de cañerías de plástico reforzado con fibra de vidrio de uso industrial*. (Tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile). Recuperado de: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcin322s/doc/bmfcin322s.pdf> [Consulta: 12 de octubre de 2018].

- Ottazzi G. (2004). Material de Apoyo para la Enseñanza de los Cursos de Diseño y Comportamiento del Concreto Armado (Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú). Recuperado de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/1055> [Consulta: 15 de marzo de 2019].
- Park R. & Pauley T. (1991). Estructuras de concreto reforzado. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/349253666/Estructuras-de-Concreto-Reforzado-R-Park-T-Paulay> [Consulta: 10 de marzo de 2019].
- Portilla, J. (2015) *Análisis, evaluación de ataques químicos externos y propuestas de medidas de mitigación a las construcciones de concreto en el distrito de Santa Rosa, provincia de Chiclayo, región Lambayeque*. (Tesis de postgrado, Universidad Nacional Federico Villareal). Recuperado de: <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/UNPRG/1801> [Consulta: 13 de noviembre de 2018]
- Rosario S. & Yácono J. (2003). Materiales: La corrosión, su tradición y alcances. *Revista del Instituto de Investigación*. 6(11), 71-77. Recuperado de http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v06_n11/material_corrosion.htm [Consulta: 16 de setiembre de 2018].
- Sathishkumar, TP. et al. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites – a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 33(13), 1258-1275. <https://doi.org/10.1177/0731684414530790> [Consulta: 16 de setiembre de 2018].
- Wu, W. P. (1990). Thermomechanical properties of fiber reinforced plastic (FRP) bars. Recuperado de https://books.google.com.pe/books/about/Thermomechanical_Properties_of_Fiber_Rei.html?id=2AXCNwAACAAJ&redir_esc=y [Consulta: 20 de marzo de 2019].
- Zoghi, M. (2013). *The International Handbook of FRP composites in civil engineering*. México D.F, USA. Editorial Taylor and Francis Group. Recuperado de https://books.google.com.pe/books?id=NubGAAAQBAJ&pg=PA461&lpg=PA461&dq=FRP+quality+control+ACI&source=bl&ots=nlOb2i7_Uq&sig=ACfU3U2DJZTIGjTY4NmVQAO1AI3ur1wY-w&hl=es-

[419&sa=X&ved=2ahUKEwizsL-
ku__mAhVwELkGHW5wCEcQ6AEwCnoECAkQAQ#v=onepage&q=FRP%20
quality%20control%20ACI&f=false](#) [Consulta: 13 de enero de 2020].