

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**“Proyecto de Investigación previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Título del proyecto**

**“Análisis del uso de Polímero Reforzado con fibras (FRP) como material estructural  
para el diseño de puentes peatonales”.**

**Autor:**

Ronny Gabriel Bonilla Silva

**Tutora:**

Ing. Andrea Natali Zárate Villacrés

**Riobamba – Ecuador**

**Año 2021**

## REVISIÓN

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de título: **“ANÁLISIS DEL USO DE POLÍMERO REFORZADO CON FIBRAS (FRP) COMO MATERIAL ESTRUCTURAL PARA EL DISEÑO DE PUENTES PEATONALES”**. presentado por Ronny Gabriel Bonilla Silva y dirigida por la: Ing. Andrea Zárate, MSc. Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Para constancia de lo expuesto firman:

Ing. Andrea Zárate MSc.



Firmado electrónicamente por:  
**ANDREA NATALI  
ZARATE  
VILLACRES**

**Tutor del Proyecto**

**Firma**

Ing. Oscar Cevallos. PhD



Firmado electrónicamente por:  
**OSCAR ALFREDO  
CEVALLOS  
VELASQUEZ**

**Miembro del tribunal**

**Firma**

Dr. Víctor García.

Victor Julio  
García

Digitally signed by Victor Julio Garcia  
DN: cn=Victor Julio Garcia,  
o=Universidad Nacional de  
Chimborazo, ou=Facultad de  
Ingeniería, Carretera de Ingeniería Civil,  
email=vjgarcia@unach.edu.ec, c=EC  
Date: 2021.07.07 15:51:39 -05'00'

**Miembro del tribunal**

**Firma**

## **CERTIFICACIÓN DEL TUTOR**

Yo, Ing. Andrea Zárate, MSc, en calidad de Tutor de Tesis que lleva como título: **“ANÁLISIS DEL USO DE POLÍMERO REFORZADO CON FIBRAS (FRP) COMO MATERIAL ESTRUCTURAL PARA EL DISEÑO DE PUENTES PEATONALES”**, CERTIFICO; que el informe final del trabajo investigativo ha sido revisado y corregido, razón por la cual autorizo a la Señor Ronny Gabriel Bonilla Silva para que se presente ante el tribunal de defensa respectivo para que se lleve a cabo la sustentación de su Tesis.

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:  
**ANDREA NATALI  
ZARATE  
VILLACRES**

.....  
Ing. Andrea Zárate, MSc

**Tutor de tesis**

### **Autoría de la Investigación**

Declaro que la responsabilidad del contenido de este proyecto de graduación corresponde exclusivamente a: Ronny Gabriel Bonilla Silva y al Ing. Andrea Natali Zárate Villacrés, MSc. y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional del Chimborazo.



Firmado electrónicamente por:

**RONNY GABRIEL  
BONILLA  
SILVA**

.....  
Sr. Ronny Gabriel Bonilla Silva

C.I. 0604215087

### **Agradecimiento**

Agradezco primero a Dios por haberme trazado un glorioso y a la vez difícil camino hasta esta prestigiosa carrera de la cual me siento orgulloso de pertenecer, de igual manera a la Universidad Nacional de Chimborazo por haberme otorgado la oportunidad y los medios necesarios para mi formación profesional, a mis docentes que fueron partícipes de mi desarrollo ético y académico, especialmente a mi tutora la Ing. Andrea Zarate ya que por sus conocimientos, paciencia y carisma he podido sacar adelante este proyecto de investigación. Agradezco a las amistades muy bonitas que obtuve en la universidad, Cristhian, Michelle, Karla especialmente, gracias por haber sido un pilar importante en mi desarrollo académico y personal.

## **Dedicatoria**

Este trabajo es el reflejo de toda mi formación académica, personal y profesional como Ingeniero Civil, lo cual se la quiero dedicar especialmente a mi hermano Edison, ya que desde siempre, él ha sido mi fuente de inspiración, mi ejemplo a seguir, quiero que se sienta orgulloso de la persona soñadora y perseverante que formo desde que yo era niño. A mis padres Hugo y Edelmira por haberme dado la vida, por su apoyo económico y emocional ya que han orado y han puesto la fe en Dios para que yo llegue hasta este punto. A mi hermano Roberto por su alegría, carisma y positivismo que siempre me transmite, sin dejar de lado su apoyo económico que me liberó de muchos apuros. A mi hermana Carolina por aconsejarme y darme palabras de aliento en mis momentos difíciles, por ser esa guía espiritual y emocional que me han hecho un hombre de mucha fe y amor. También quiero dedicar este trabajo a mis amigos Dennys, Fernando y Bryan ya que han sido mis amistades más sinceras, en las que pude pasar momentos de calidad donde juntos nos planteamos el ser profesionales y disfrutar de nuestros momentos de triunfo.

## Índice general

1.	CAPITULO I.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1	Planteamiento del problema.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivo General.....	2
1.2.2	Objetivos Específicos.....	2
2.	CAPITULO II.- MARCO TEÓRICO.....	3
2.1	Estado del arte.....	3
2.2	Fibras.....	4
2.2.1	Fibra de Vidrio.....	5
2.2.2	Fibra de Aramida.....	6
2.2.3	Fibra de Carbono.....	7
2.2.3.1	Tipo I (Alto módulo).....	8
2.2.3.2	Tipo II (Alta resistencia).....	8
2.2.4	Ventajas y desventajas de las fibras.....	9
2.3	Matriz.....	10
2.4	Propiedades mecánicas de las fibras FRP.....	12
2.4.1	Efecto de la orientación de las fibras.....	13
2.4.2	Densidad.....	14
2.4.3	Razón de Poisson.....	15
2.4.4	Módulo de Elasticidad.....	16
2.4.5	Resistencia a la tracción.....	18
2.5	Aplicaciones.....	19
2.5.1	Aplicaciones de fibra de vidrio (GFRP).....	19
2.5.2	Aplicaciones de fibra de Aramida (AFRP).....	20
2.5.3	Aplicaciones de fibra de Carbono (CFRP).....	20

2.6	Sostenibilidad del material.....	21
2.6.1	Uso a futuro de los compuestos.....	22
3.	CAPITULO III. METODOLOGÍA.....	23
3.1	Tipo de investigación.....	23
3.2	Selección de información.....	23
3.3	Selección de referentes.....	24
3.4	Esquema metodológico.....	25
3.5	Diseño de elementos estructurales basados en la norma ACI.440-2R.....	26
3.5.1	Consideraciones previas.....	26
3.5.2	Factor de reducción por ambiente <b>CE</b> .....	26
3.5.3	Falla por adherencia.....	28
3.5.4	Disposición de refuerzo FRP por flexión.....	29
3.5.4.1	Lámina externa.....	29
3.5.4.2	Barras de fibra de carbono.....	30
3.5.5	Filosofía de diseño.....	32
3.5.6	Factor de reducción de resistencia $\psi_f$ .....	32
3.5.7	Diseño a flexión.....	33
3.5.7.1	Hipótesis de diseño.....	33
3.5.7.2	Deformación del FRP en estado límite o última <b>ε<sub>fe</sub></b> .....	35
3.5.7.3	Distribución de esfuerzos y deformaciones internas.....	35
3.5.8	Diseño a corte.....	37
3.5.8.1	Consideraciones previas.....	37
3.5.8.2	Resistencia al corte.....	38
3.6	Evaluación de cargas según la AASHTO.....	41
3.6.1	Cargas vivas.....	41

3.6.1.1	Estimación de Cargas peatonales según la AASHTO “FRP Pedestrian Bridge Specification”.....	41
3.6.2	Estimación de Cargas peatonales según el análisis estructural.....	42
3.6.3	Carga vehicular.....	43
3.6.4	Cargas de viento.....	45
3.6.5	Combinaciones de carga.....	47
3.6.6	Control de deflexiones.....	48
3.6.7	Control de vibraciones.....	49
3.6.8	Cargas y deflexiones según el Eurocode.....	49
3.7	Referentes de puentes peatonales construidos a base de FRP.....	50
3.7.1	Dawlish Station Footbridge – Reino Unido.....	50
3.7.1.1	Características de diseño.....	51
3.7.1.2	Compuestos utilizados.....	52
3.7.1.3	Secciones y forma estructural.....	52
3.7.2	SkyPath Pedestrian Bridge – Nueva Zelanda.....	53
3.7.2.1	Características de diseño.....	54
3.7.2.2	Compuestos utilizados.....	55
3.7.2.3	Secciones y forma estructural.....	56
3.7.3	Puente peatonal Tainan-Taiwán.....	57
3.7.3.1	Características de diseño.....	58
3.7.3.2	Compuestos utilizados.....	58
3.7.3.3	Secciones y forma estructural.....	58
3.7.4	Reparación del Puente La Ruedita-Guatemala.....	60
3.7.4.1	Características de diseño.....	61
3.7.4.2	Compuestos utilizados.....	63
3.7.4.3	Secciones y forma estructural.....	64

4.	CAPITULO IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	65
4.1	Material compuesto FRP como alternativa de reforzamiento frente al acero. 65	
4.1.1	Propiedades mecánicas frente al acero.....	65
4.1.1.1	Módulo de elasticidad. ....	65
4.1.1.2	Resistencia a la tracción. ....	67
4.1.1.3	Densidad.....	68
4.1.1.4	Tiempo de vida útil. ....	68
4.2	Diseño de elementos estructurales. ....	69
4.3	Puentes peatonales existentes.....	70
5.	CONCLUSIONES.....	73
6.	RECOMENDACIONES.....	75
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	76
8.	ANEXOS.....	80

## Índice de anexos

<b>Anexo 1</b> Estructura Completa Puente Tainan-Taiwan .....	80
<b>Anexo 2</b> Proceso de ensamblaje del puente de Taiwan. ....	81
<b>Anexo 3</b> Información técnica obtenida para la lámina “SikaCarbodur s1214” .....	83
<b>Anexo 4</b> Datos Necesarios Para El Reforzamiento Del Puente La Ruedita-Guatemala .....	84
<b>Anexo 5</b> Cálculo De Valores Para El Equilibrio Interno De Las Vigas Del Puente La Ruedita-Guatemala .....	85
<b>Anexo 6</b> Cálculo de la capacidad reducida puente la Ruedita-Guatemala .....	86
<b>Anexo 7</b> Comparación de la capacidad reducida con la demanda mayorada según la combinación de cargas del ACI.440-2R .....	87
<b>Anexo 8</b> Aplicación de la resina epoxi sobre la superficie de la viga .....	88
<b>Anexo 9</b> Aplicación de la resina epóxica en el refuerzo CFRP.....	88

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Ventajas Y Desventajas De Los Tipos De FRP.....	9
<b>Tabla 2</b> Propiedades Mecánicas De Las Matrices .....	11
<b>Tabla 3</b> Propiedades Mecánicas De Las Fibras Poliméricas.....	12
<b>Tabla 4</b> Influencia De Orientación De Las Fibras En Compuestos FRP.....	13
<b>Tabla 5</b> Resistencia A La Tracción Y Compresión Del FRP En Sentido Longitudinal Y Transversal.....	19
<b>Tabla 6</b> Coeficiente CE para consideraciones ambientales .....	27
<b>Tabla 7</b> Factor De Reducción De Resistencia Para El Uso De FRP.....	33
<b>Tabla 8</b> Valores De “ZO”Y “VO” Para Condiciones De Puentes Por Encima De Los 9.15m Del Nivel Del Suelo .....	46
<b>Tabla 9</b> Cargas De Viento Aplicadas Horizontalmente Para Una Velocidad Básica De 160 Km/H.....	46
<b>Tabla 10</b> Factor de modificación de carga “n” .....	48
<b>Tabla 11</b> Deflexiones Máximas Permisibles De Acuerdo Con El Eurocode 2.....	50
<b>Tabla 12</b> Características De Diseño De Referentes De Puentes Peatonales En El Mundo ....	71

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Disposición De Fibras Poliméricas .....	4
<b>Figura 2</b> Disposición De Fibras Poliméricas Unidireccionales. ....	5
<b>Figura 3</b> Composición De Fibra De Vidrio .....	6
<b>Figura 4</b> Fibra De Aramida.....	7
<b>Figura 5</b> Fibra De Carbono .....	8
<b>Figura 6</b> Composición De Matriz Polimérica Más FRP .....	11
<b>Figura 7</b> Razón De Poisson En Base A La Orientación De Las Fibras .....	15
<b>Figura 8</b> Esquema Metodológico De La Investigación .....	25
<b>Figura 9</b> Curva Esfuerzo Deformación Del Material Compuesto, Fibras Y Matriz FRP.....	26
<b>Figura 10</b> Desprendimiento Iniciado Por Fisuras De Flexión Y Corte.....	28
<b>Figura 11</b> Esquema De Refuerzo De Lámina Externa.....	29
<b>Figura 12</b> Refuerzo A Flexión Con CFRP-España.....	30
<b>Figura 13</b> Esquema De Refuerzo Con Barras.....	30
<b>Figura 14</b> Formas En Barras De FRP .....	31
<b>Figura 15</b> Dimensiones Mínimas De Los Surcos .....	31
<b>Figura 16</b> Distribución Lineal De Deformaciones.....	34
<b>Figura 17</b> Distribución Interna De Esfuerzos Y Deformaciones En Su Estado Límite.....	36
<b>Figura 18</b> Caso Típico De Reforzamiento A Corte Con FRP.....	37
<b>Figura 19</b> Configuraciones De Reforzamiento A Corte Haciendo Uso De FRP.....	38
<b>Figura 20</b> Esquema Para Diseño A Corte Utilizando Reforzamiento FRP. ....	40
<b>Figura 21</b> Esquema De Camión H-Truck. ....	44
<b>Figura 22</b> Puente Peatonal En FRP De La Estación Dawlish – Reino Unido .....	51
<b>Figura 23</b> Distribución De Elementos Estructurales En El Puente Dawlish Station Footbridge – Reino Unido.....	53

<b>Figura 24</b> Puente Peatonal Skypath-Nueva Zelanda.....	54
<b>Figura 25</b> Frecuencia Fundamental En La Super Estructura Del Puente SkyPath .....	55
<b>Figura 26</b> Disposición De Materiales Compuestos En Puente Skypath. ....	56
<b>Figura 27</b> Composición estructural de SkyPath-Nueva Zelanda. ....	57
<b>Figura 28</b> Problemas De Corrosión En El Puente Peatonal De Tainan-Taiwan.....	58
<b>Figura 29</b> Composición De La Super Estructura Del Puente Peatonal De Taiwán .....	59
<b>Figura 30</b> Esquemmatización De La Super Estructura Y Acceso Al Puente De Taiwán.....	60
<b>Figura 31</b> Vigas Deterioradas Del Puente “La Ruedita-Guatemala”.....	61
<b>Figura 32</b> Esquemmatización De La Viga Del Puente De Guatemala .....	64
<b>Figura 33</b> Diferencias Entre Valores De Módulo De Elasticidad De Los Materiales Compuestos Frente Al Acero.....	66
<b>Figura 34</b> Resistencia A La Tracción De Los Compuestos Frente Al Acero .....	67
<b>Figura 35</b> Densidad De Los Compuestos Y El Acero .....	68

### **Resumen.**

Este trabajo de investigación se basa en el análisis de un material alternativo para el reforzamiento de estructuras de concreto llamado Fiber Reinforced Polymer o por sus siglas FRP, el cual trae consigo ciertas ventajas como alta resistencia a la tracción, ligereza, facilidad de ensamblaje y tiempo prolongado de vida útil frente a los materiales tradicionales, donde se pretende ampliar el conocimiento acerca del diseño de elementos estructurales reforzados con este material. Los documentos que hacen mención al reforzamiento de estructuras con este material, muestran tres distintos tipos de fibras poliméricas compuestas denominadas: fibra de vidrio (GFRP), fibra de aramida (AFRP) y fibra de carbono (CFRP), teniendo cada una distintas propiedades mecánicas y aplicaciones, siendo la fibra de carbono la que mayor aporte tiene en cuanto a eficiencia estructural por su alto módulo y resistencia con relación a su peso, posibilitando la elaboración de pequeñas estructuras tal es el caso de puentes peatonales. Para el diseño de los elementos estructurales principales sometidos a flexión, es necesario conocer las distintas propiedades mecánicas como: la densidad, razón de Poisson, módulo de elasticidad y resistencia a la tracción, parámetros que son utilizados para el diseño, siguiendo la norma ACI.440-2R conjunto con la norma AASHTO “FRP Pedestrian Bridge Specification” para el análisis de cargas actuantes en puentes peatonales. Por último, se analizan referentes de puentes peatonales concebidos en este material, donde se evalúan todos los parámetros de diseño ya estudiados como: tipo de material utilizado, cargas vivas, secciones y formas estructurales.

Palabras clave: Material compuesto, puentes, carbono, aramida, vidrio

## Abstract

This research work is based on the analysis of an alternative material called Fiber Reinforced Polymer or FRP to reinforce concrete structures, which brings some advantages such as high tensile strength, lightness, ease of assembly and long useful life compared to traditional materials, the aim is to broaden the knowledge about the design of structural elements reinforced with this material. The documents that mention this kind of structures reinforcement of with this material, show three different types of composite polymeric fibers called: glass fiber (GFRP), aramid fiber (AFRP) and carbon fiber (CFRP), each one have different mechanical properties and applications, carbon fiber seem to be the one that has the greatest contribution in terms of structural efficiency due to its high modulus and resistance in relation to its weight, allowing the elaboration of small structures such is the case of pedestrian bridges. For the design of the main structural elements subjected to flexural forces, it is necessary to know the different mechanical properties such as: density, Poisson's ratio, elasticity modulus and tensile strength, these parameters are used for the design, following codes such as ACI. 440-2R and AASHTO “FRP Pedestrian Bridge Specification” for the analysis of acting loads on pedestrian bridges. Finally, references of pedestrian bridges conceived in this material were analyzed, all the design parameters already studied were evaluated, such as: type of material used, live loads, sections, and structural forms.

Key words: composite material, bridges, carbon, aramid, glass



Firmado electrónicamente por:  
**EDISON RAMIRO**  
**DAMIAN ESCUDERO**

## **Introducción.**

La industria de la construcción ha ido desarrollándose por más de 100 años con técnicas y materiales tradicionales. Estructuras elaboradas típicamente en concreto reforzado con barras de acero, han causado impactos ambientales importantes, representando más del 35% del uso global de recursos energéticos con el 40% de emisiones de CO<sub>2</sub> (Knippers & Gabler, 2006). Por lo general, estas estructuras tienen 50 años de vida útil, donde se debe procurar un mantenimiento cada 10 años, controlándose: grietas, recubrimientos y humedad de los miembros principales, donde la solución siempre ha sido el ensanchamiento de secciones o un aumento en el refuerzo, perjudicando aún más el medio ambiente (IngenierosAsesores, 2020). Esto ha generado investigaciones donde, se promueve la creación de nuevos materiales, con el objetivo de optimizar el peso y la sección de los miembros estructurales, sin afectar su resistencia, siendo capaces de soportar las disposiciones y combinaciones de carga establecidas por las normativas nacionales e internacionales (NEC, 2015).

En el año de 1990 en países como Dinamarca y Estados Unidos, comienza la analogía de crear elementos estructurales reforzados con FRP (Fiber Reinforced Polymers), donde en un principio fue utilizado en la industria militar, marítima y aeroespacial, principalmente las fibras de vidrio embebidas en poliéster en los cascos de navíos y coberturas de radares; todo esto fue debido a su ligereza y capacidad de resistir la fuerza de empuje del aire manteniendo el material en el rango elástico. Siempre ha existido la tendencia de extrapolar la tecnología militar al campo de la Ingeniería Civil, entonces grandes naciones ya lo han aplicado para la rehabilitación de estructuras y construcción de pequeñas obras, tal es el caso de los puentes peatonales

El material está conformado por una resina, una matriz y fibras de distintos tipos como: vidrio, aramida o carbono (Pecce, 2001) siendo la fibra de carbono, la que más se asemeja e incluso supera los valores de resistencia a la tracción del acero hasta 4 veces, con un peso por unidad de volumen bajo (Alzate, 2012). Al ser tanta la eficiencia del material, el American Concrete Institute (ACI) promueve el diseño de estructuras reforzadas con FRP mediante el análisis de capacidad en elementos, con su código ACI.440-2R (Soudki & Alkhrdaji, 2005) complementándolo con las recomendaciones para el análisis de la demanda propuesta por el AASHTO FRP Pedestrian Bridge Specification (AASHTO, 2008), para un diseño óptimo de puentes peatonales.

Este documento pretende analizar los criterios de diseño, capacidad-demanda, mediante la interpretación de fórmulas matemáticas encontradas en las normas ACI.440-2R y la AASHTO FRP Pedestrian Bridge Specification, enfocando y corroborando toda esta información con referentes de puentes ya construidos alrededor del mundo y haciendo efectiva la viabilidad del uso de este material en Latinoamérica

## 1. CAPITULO I.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Planteamiento del problema.

¿Cuál es la influencia de las fibras FRP como material de reforzamiento para puentes?

Las fibras de polímero para reforzamiento estructural se han convertido en una alternativa viable, por su fácil manejo, adherencia y transporte (Loría Salazaz et al., 2010). Es aplicado en la elaboración de elementos estructurales donde, sus condiciones de borde se presenten como simplemente apoyadas, tal es el caso de puentes y rehabilitaciones estructurales (Rajak et al., 2019).

El material de estudio comprende de investigaciones internacionales acerca de sus propiedades mecánicas; al hablarse de distintos tipos, estos pueden ser de vidrio (GFRP), aramida (AFRP) y carbono (CFRP), siendo el CFRP el polímero que otorga mayor resistencia y rigidez, al ser combinado con el concreto o el acero.

Valores en su módulo de elasticidad  $E_f$  que van desde 215 a 350 MPa con una resistencia a la tensión  $f_{fe}$  desde 2100 a 3500 MPa, da una clara percepción acerca de la capacidad del material y su uso en elementos estructurales, donde se puedan contrarrestar los momentos positivos producidos por la flexión (Loría Salazaz et al., 2010). Por lo tanto, el material puede ser viable para la elaboración de puentes peatonales, y a su vez, servir como punto de partida para futuros diseños, en los que se lo pueda incluir, fomentando así la investigación del FRP para reforzamiento de estructuras con mayor complejidad.

## **1.2 Objetivos.**

### ***1.2.1 Objetivo General***

- Investigar el comportamiento del Polímero Reforzado con Fibras (FRP) como material estructural para el diseño de puentes peatonales a través de una revisión bibliográfica.

### ***1.2.2 Objetivos Específicos.***

- Conocer las propiedades mecánicas, ventajas y desventajas del FRP como material estructural.
- Establecer parámetros de diseño basados en la norma americana (ACI.440-2R-08) y la (AASHTO) FRP Pedestrian Bridge Specification referente al uso de FRP en puentes peatonales que podrán ser utilizados en nuestro país.
- Analizar referentes de puentes peatonales existentes concebidos mediante FRP y sus aplicaciones más significativas
- Comparar el comportamiento estructural del FRP frente a los materiales utilizados tradicionalmente.

## 2. CAPITULO II.- MARCO TEÓRICO

### 2.1 Estado del arte

El Polímero Reforzado con Fibras (FRP) es un material compuesto, esto quiere decir que es una combinación mecánica de varios componentes, con la idea de formar un nuevo material con propiedades óptimas, distintas y mejores que los elementos al actuar por sí solos (Frp, 2007).

Los materiales compuestos típicamente están conformados por fibras muy rígidas y resistentes, impregnadas en otro material llamado matriz que las mantiene unidas, eso hace que el material actúe de manera uniforme tanto para esfuerzos como para deformaciones en cada uno de los puntos donde será sometido a carga (Mejía, 2008).

El FRP nació principalmente en el área militar y aeroespacial para la defensa y refuerzo de navíos (MacDanial, 2004). Los compuestos FRP están ganando gradualmente aceptación en la industria de la construcción donde los ingenieros lo usan tanto para la rehabilitación de estructuras existentes, como para la construcción de nuevas obras.

Sistemas elaborados a base de este material deben ser diseñados con el pensamiento de que se debe resistir esfuerzos de tracción, manteniéndose en equilibrio con el concreto haciendo posible la compatibilidad de deformaciones y dotando de ductilidad a los elementos que lo conforman (Calderón & Donoso, 2017a) .

Existen distintos tipos de FRP que los códigos de investigaciones hacen mención, y son utilizados para reforzamiento, cada uno elaborado a base de materiales poliméricos diferentes como lo son Fibra de Vidrio (GFRP), Fibra de Carbono (CFRP), Fibra de Aramida (AFRP), con sus propiedades mecánicas, aplicaciones y costo de fabricación (Curell, 2014).

## 2.2 Fibras.

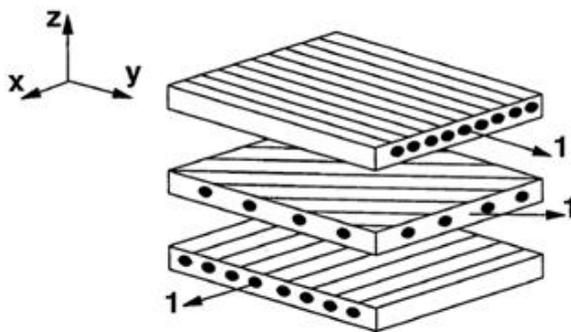
Una fibra es un material que consiste en un filamento largo con un radio entre 5 y 7.5  $\mu\text{m}$ . Las principales funciones de las fibras son soportar la carga y proporcionar rigidez, resistencia, estabilidad térmica y otras propiedades en el FRP (Curell, 2014). Para lograr estas funciones, los compuestos de FRP deben tener las siguientes propiedades mecánicas.

- Alto módulo elástico.
- Alta resistencia a la tracción.
- Baja variación de resistencia entre fibras
- Íntegra estabilidad durante la manipulación.
- Alta uniformidad de diámetro y dimensiones superficiales entre las fibras.

Estos parámetros son estrictamente necesarios debido a que la matriz no tiene propiedades resistivas (véase la **sección 2.3**), es importante la incorporación y disposición de capas de tejidos con diferentes orientaciones como se muestra en la **Figura 1**, con el fin de abastecer a todas las direcciones de las cargas si se lo requiere (Calderón & Donoso, 2017b).

**Figura 1**

*Disposición de fibras poliméricas*

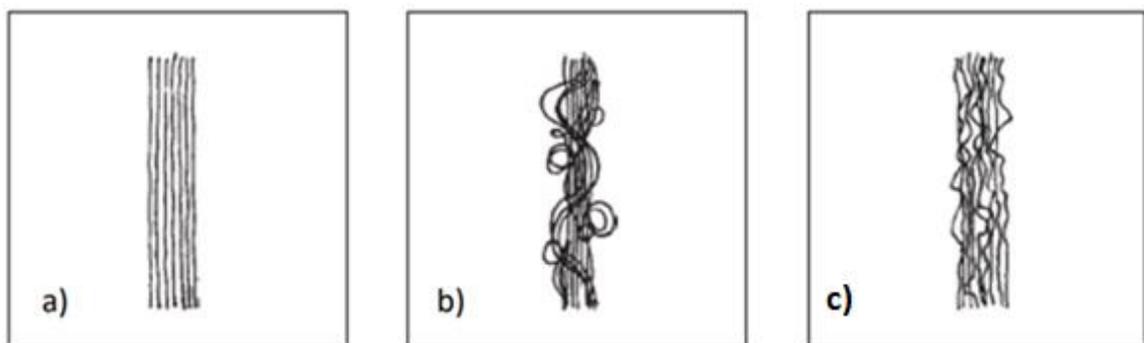


Fuente:(Brothers, 1998)

Las fibras pueden ser una sucesión de filamentos continuos unidireccionales como se muestra en la **Figura 2**. La orientación y distribución de las fibras tiene incidencia importante en las propiedades mecánicas del material. Donde se requiere valores máximos de resistencia y rigidez para los elementos sometidos a tensión donde se requiere que las fibras sean continuas (Mejía, 2008).

## Figura 2

*Disposición de fibras poliméricas unidireccionales.*



Fuente:(Fiberline, 2003)

*Nota: a) Fibras rectas, b) Fibras helicoidales, c) Fibras torcidas.*

### 2.2.1 Fibra de Vidrio.

Las fibras de vidrio se forman a partir de filamentos delgados de vidrio a base de sílice u otra formulación extruida en muchas fibras con diámetros pequeños (véase la **Figura 3**) adecuados para el procesamiento textil he incluso la fabricación de perfiles (Curell, 2014). Las propiedades favorables de esta fibra son aplicadas en ciertas áreas de la construcción donde la cantidad y calidad de refuerzo no sea tan relevante. Al hablarse de láminas de fibra de vidrio, estas son utilizadas principalmente para refuerzo mínimo o acabados a nivel no-estructural mostrados en la **sección 2.5.1**.

Existen distintos tipos de fibras de vidrio: E, S las cuales presentan valores similares en su módulo de elasticidad, pero distintos valores de resistencia a la tracción (véase la **Tabla 2**) y efectos ambientales diferentes (Mejía, 2008).

### **Figura 3**

*Composición de fibra de vidrio*



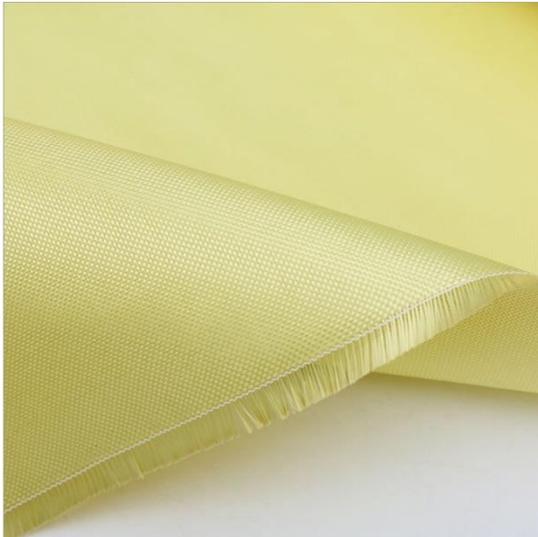
Fuente:(L. Hitex Insulation Co, 2008)

#### **2.2.2 Fibra de Aramida.**

La fibra de aramida o poli aramida se realiza extruyendo una solución del mismo material a temperaturas entre  $-59^{\circ}\text{C}$  y  $80^{\circ}\text{C}$  en un cilindro caliente a  $200^{\circ}\text{C}$  (véase la **Figura 4**) es una de las dos fibras más utilizadas en aplicaciones de Ingeniería Civil para obras emergentes o temporales mostrada en la **sección 2.5.2** como puentes de acceso temporal o cubiertas para albergues, debido a su pérdida sustancial de resistencia al paso del tiempo (Curell, 2014). Esta fibra posee particularidades muy interesantes y aplicables sobre todo en los tableros de la super estructura de los puentes. Son más resistentes que las fibras de vidrio y presentan un módulo de elasticidad 50% superior. Todas estas propiedades hacen que las fibras de aramida posean mayor resistencia y tenacidad (Villalón et al, 2008).

**Figura 4**

*Fibra de aramida.*



Fuente: (Frp, 2007)

**2.2.3 Fibra de Carbono.**

Las fibras de carbono, o CF consisten en fibras aproximadamente de 5 a 10  $\mu\text{m}$  de diámetro, están compuestas principalmente de átomos de carbono (Curell, 2014). Para producir esta fibra, los átomos de carbono se unen en cristales de grafito estratificado, que están alineados en paralelo al eje largo de la fibra como el cristal, la alineación de la fibra crea una relación de alta resistencia a volumen (haciéndola fuerte para su tamaño) (Alampalli et al., 2000). Las fibras de carbono se las fabrica mediante oxidación, carbonización y grafificación a altas temperaturas a más de  $2000^{\circ}\text{C}$ , formando láminas de material compuesto, agrupándose para formar una estopa como se muestra en la **Figura 5** (Alzate, 2012).

## Figura 5

### *Fibra de carbono*



Fuente: (Franco Mejía, 2008)

Son muy populares en la industria aeroespacial, ingeniería civil, militar y deportes de motor, junto con otros. Sin embargo, son relativamente más costosas en comparación con fibras similares (vidrio y aramida) (López, 2013). Las fibras de carbono tienen un alto módulo de elasticidad y fatiga; también teniendo en cuenta la vida útil, los estudios sugieren que los polímeros reforzados con fibra de carbono tienen mayor potencial que otros materiales. Se han desarrollado dos tipos de CFRP donde sus aplicaciones dependerán de los requerimientos de la obra y de las solicitaciones que influirán en el elemento (Mejía, 2008).

#### **2.2.3.1 Tipo I (Alto módulo).**

Posee mayor capacidad de oponerse a las deformaciones con limitaciones resistivas o de soportar cargas aplicadas donde su módulo de elasticidad oscila entre los 300 y 370 GPa con una resistencia a la tracción de 2700 MPa. Existe una relación directa entre el aumento de grafito y su módulo de elasticidad (Alzate, 2012).

#### **2.2.3.2 Tipo II (Alta resistencia)**

Por otra parte, existe los de alta resistencia que están directamente proporcionados a la orientación de las fibras, en donde, al obtenerse fibras cruzadas a 45° se obtienen resistencias

superiores sacrificando su capacidad de rigidez. Con un módulo de elasticidad entre 200 – 230 GPa y resistencia a la tracción entre 3000 – 3600 MPa (Alzate, 2012).

Entre sus aplicaciones, son las fibras más utilizadas para el reforzamiento de elementos estructurales debido a sus propiedades mecánicas y su alta resistencia a la tracción mostrada en la **sección 2.5.3**, donde se requiera refuerzo para momentos positivos, siendo una alternativa viable mas no económica (Fonseca, 2008). Se la puede utilizar para la rehabilitación de estructuras y para la elaboración de puentes simplemente apoyados (Villalón et al, 2008).

#### 2.2.4 *Ventajas y desventajas de las fibras*

Cada compuesto presenta características propias de acuerdo con el tipo de fibra afectando directamente sus propiedades mecánicas y costos de fabricación, lo que conlleva a aplicaciones distintas con ventajas y desventajas propias para cada tipo como se muestra en la

**Tabla 1**

**Tabla 1**

*Ventajas y desventajas de los tipos de FRP.*

	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Vidrio (GFRP)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El uso del material fomenta el cuidado ambiental</li> <li>• Costos de fabricación más bajos que las otras fibras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Módulo de elasticidad bajo</li> <li>• Alta probabilidad de rotura por fatiga</li> <li>• Baja resistencia a la humedad y ambientes alcalinos</li> </ul>
<b>Aramida (AFRP)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta resistencia a la abrasión donde prevé el desgaste y raspaduras del material por tráfico peatonal</li> <li>• Alta resistencia a solventes</li> <li>• Material no conductor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja resistencia a la compresión</li> <li>• Reducción a largo plazo fuerza (rotura por tensión)</li> <li>• Sensibilidad a la radiación UV</li> <li>• Difíciles de cortar y mecanizar.</li> </ul>

---

<b>Carbono (CFRP)</b>	• Alta rigidez.	• Anisotropía inherente (fuerza radial reducida) el grafito es altamente anisótropo.
	• Alta resistencia a la tracción.	
	• Bajo peso.	• Altos costos.
	• Alta resistencia química.	• No existen muchos estudios sobre su resistencia a la compresión.
	• Tolerancia a medianas temperaturas.	
	• Bajo nivel de expansión.	

---

Fuente: Adaptado de (Mejía, 2008), (Villalón et al, 2008) y (López, 2013)

### 2.3 Matriz.

La matriz polimérica es parte del compuesto junto con las fibras (mostrado en la **Figura 6**) es sumamente importante tener un control de calidad de la matriz ya que esta se encarga de:

- Brindar protección a las fibras contra daños químicos y mecánicos.
- Mantener las fibras juntas y fijarlas en la geometría deseada.
- Proporcionar color final y acabado superficial para las conexiones.
- Transferir la carga a las fibras por adherencia y/o fricción.
- Proporcionar rigidez y forma al miembro estructural.
- Aislar las fibras para que puedan actuar por separado, resultando en grietas lentas o nulas.
- Influir en las características de rendimiento como la ductilidad, la resistencia al impacto.

Por otra parte, las matrices son excelentemente resistentes a ataques químicos y ambientales lo que evita la corrosión del material conjunto (López, 2013).

**Figura 6**

*Composición De Matriz Polimérica Más FRP*



Fuente: (Neetesuela, 2013)

Las resinas más utilizadas en la industria de la construcción son los termoestables: epoxis, poliéster y viniléster (Curell, 2014). La diferencia que existe con las resinas termoplásticas es la respuesta a la acción de la temperatura ya que no se funden mediante la aplicación del calor con una pérdida sustancial de rigidez a una temperatura límite (Alzate, 2012).

La **Tabla 2** muestra que las matrices no soportan cargas a compresión ni transversales por lo que es necesario tomar en cuenta, que no puede actuar por si sola (Curell, 2014).

**Tabla 2**

*Propiedades mecánicas de las matrices*

<b>Material</b>	<b>Módulo de Elasticidad (GPa)</b>	<b>Resistencia a Tracción (MPa)</b>	<b>Deformación Última (%)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Poliéster	2.1- 4.1	20 - 100	1.0 – 6.5	1000 - 1450
Viniléster	3.2	80 - 90	4.0 – 5.0	-
Epoxi	2.5 – 4.1	55 - 130	1.5 – 9.0	1100 - 1300

Fuente: Fuente: (Alzate, 2012)

## 2.4 Propiedades mecánicas de las fibras FRP.

Básicamente, las propiedades mecánicas de los compuestos reforzados con FRP dependen de las propiedades de sus componentes obteniéndose distintos valores dependiendo de la fibra a tratar (Aramida, Carbón o Vidrio) como se muestra en la **Tabla 3** (Alampalli et al, 2000):

- Volumen espesor de la matriz.
- Disposición geométrica interna del compuesto.

Las fibras dan resistencia al material. Esta depende del volumen y orientación de las fibras (Curell, 2014).

**Tabla 3**

*Propiedades mecánicas de las fibras poliméricas.*

Propiedades mecánicas		Densidad $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidad E (GPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Deformación última a la tensión (%)
Vidrio	Vidrio Tipo E	2.6	72	1900 - 3000	3.0 – 4.5
	Vidrio Tipo S	2.5	87	3500 - 4800	4.5 – 5.5
Carbón	Alta Resistencia	1.8	230	3500 - 4800	1.4 – 2.0
	Alto Módulo	1.9	370 - 500	2500 - 3100	0.5 – 0.9
Aramida	Bajo Módulo	1.44	70 - 80	3500 - 4100	4.3 – 5.0
	Alto Módulo	1.44	115 - 130	3500 - 4000	2.5 – 3.5

Fuente: (Fonseca, 2008)

Las propiedades mecánicas más importantes que definen el uso, el comportamiento y la capacidad resistiva del FRP son:

- Efecto de orientación de las fibras.
- Densidad.
- Módulo de elasticidad.
- Coeficiente de Poisson.
- Resistencia a la tracción.

#### 2.4.1 Efecto de la orientación de las fibras.

La resistencia a la tracción y la rigidez de un material FRP depende de la composición física del mismo como: orientación de las fibras, cantidad de fibras y método de fabricación (Soudki & Alkhrdaji, 2005). Esto afecta directamente al módulo de elasticidad y al coeficiente de Poisson, siendo la fibra de carbono con resinas epoxi el material que tiene mejor comportamiento en todas las direcciones (véase la **Tabla 4**).

**Tabla 4**

*Influencia de orientación de las fibras en compuestos FRP.*

Compuesto	Orientación	Módulo elástico E (GPa)	Falla última a tensión (MPa)	Relación de Poisson “v”
Carbón/Epoxi	0°	100-140	1020-2080	0.30
	0°-90°	55-76	100-1030	0.03
	45°-45°	14-28	180-280	0.60
Vidrio E/Epoxi	0°	20-40	520-1400	0.25
	0°-90°	14-34	520-1020	0.02
	45°-45°	14-21	180-280	0.55
Aramida/Epoxi	0°	100-140	700-1720	0.34
	0°-90°	55-76	280-550	0.05
	45°-45°	14-28	140-210	0.65

Fuente: (ACI-440.2R-08)

### 2.4.2 Densidad.

La densidad de los compuestos juega un papel importante en el trabajo de la configuración del material y la transferencia de cargas. Como consecuencia de esto, una de las ventajas del compuesto FRP es una baja densidad, que trae consigo particularidades únicas como: facilidad de manipulación y montaje, facilidad de transporte de material al sitio de construcción, y reducción de cargas a los elementos que son soportados. Como resultado; hay una reducción de costos en los conceptos anteriores (Alzate, 2012).

Generalmente, la densidad de los compuestos para varios tipos de fibras varía entre 0.9 y 2.3  $\frac{g}{cm^3}$ , aunque en la mayoría de los casos se sitúa entre 1.2 y 1.8  $\frac{g}{cm^3}$

Para determinar la densidad del material compuesto de fibras y resina de propiedades conocidas, se aplica una regla simple, basándose en la fracción de volumen de cada uno de los componentes mostrados en la **Ecuación 1** (Curell, 2014).

$$\rho_c = \rho_m * V_m + \rho_f * V_f \quad (1)$$

Donde:

$\rho_c$ : Densidad del compuesto.

$\rho_m$ : Densidad de la matriz.

$V_m$ : Volumen de la matriz.

$\rho_f$ : Densidad de las fibras.

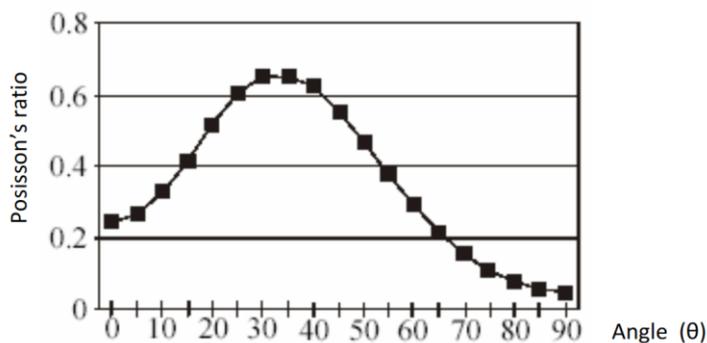
$V_f$ : Volumen de las fibras.

### 2.4.3 Razón de Poisson.

Cuando el ángulo entre la dirección de las fibras y la dirección de la carga es  $0^\circ$ , la relación de Poisson suele tener valores similares a los metales, en el rango de 0.25 a 0.35. Para diferentes orientaciones de fibras, la relación de Poisson puede variar considerablemente, alcanzando 0.02 a 0.05 cuando este ángulo es de  $90^\circ$ . Esto se debe a que la mayoría de las fibras rígidas resisten la contracción de la resina. De lo contrario, cuando las fibras están orientadas con un ángulo entre  $30^\circ$  y  $40^\circ$ , "v" podría alcanzar valores de 0.65, todos estos valores se reflejan en la curva mostrada en la **Figura 7** (Curell, 2014). El valor "v" podría diferir dependiendo también del material utilizado en la fabricación del compuesto, ya que las fibras intentan alinearse una vez aplicada la carga (Alampalli et al, 2000).

#### Figura 7

*Razón de Poisson en base a la orientación de las fibras*



Fuente: (Mori, 2008)

Independientemente de estos valores, la relación de Poisson de un compuesto podría calcularse aplicando los mismos criterios utilizados para obtener el módulo de deformación, utilizando la **Ecuación 2** (Curell, 2014).

$$v = v_f * V_f + v_m * V_m \quad (2)$$

Donde:

$v$ : Relación de Poisson del compuesto.

$v_f$ : Relación de Poisson de las fibras

$V_f$ : Volumen de las fibras.

$v_m$ : Relación de Poisson de la matriz.

$V_m$ : Volumen de la matriz.

#### 2.4.4 *Módulo de Elasticidad*

Es la Razón entre el esfuerzo normal y su deformación correspondiente para esfuerzos de tensión-compresión donde existe límite proporcional en la curva esfuerzo-deformación siguiendo la ley de Hook expresado en la **Ecuación 3**; también llamado módulo de Young (López, 2013). Este módulo no depende de las condiciones ambientales o de exposición

$$E_f = \frac{f_{fe}}{\varepsilon_{fe}} \quad (3)$$

Donde:

$E_f$ : Módulo de elasticidad del compuesto por fibra de carbono.

$f_{fe}$ : Esfuerzo a tensión del FRP

$\varepsilon_{fe}$ : Deformación unitaria del FRP

El valor del módulo depende del tipo de fibras que refuerzan el material compuesto y su orientación. La fracción de volumen de las fibras tiene un efecto significativo sobre los valores del módulo del compuesto final, tanto longitudinal como transversal. Para reforzarlo unidireccionalmente, los módulos longitudinales y transversales se pueden estimar con la **Ecuación 4** (Curell, 2014).

$$E_L = E_f * V_f + E_m * V_m \quad (4)$$

Donde:

$E_L$ : Módulo longitudinal de deformación del compuesto en dirección de las fibras.

$E_m$ : Módulo de deformación de la matriz.

$V_m$ : Volumen de la matriz.

$E_f$ : Módulo de deformación del FRP.

$V_f$ : Volumen de las fibras.

El módulo longitudinal alcanza su máximo cuando el ángulo de inclinación de las fibras es igual a  $0^\circ$  (es decir, en refuerzo unidireccional compuestos), mientras que el módulo transversal alcanza su valor máximo cuando el ángulo de inclinación de las fibras es igual a  $90^\circ$  (Pecce, 2001). Para la orientación irregular del refuerzo, la estimación del módulo de Young es mucho más complicado y depende no solo de los ángulos entre las fibras, sino también sus diámetros (Curell, 2014).

### 2.4.5 Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción es una de las propiedades más importantes que tiene el compuesto debido a sus valores elevados, con múltiples usos en la ingeniería Civil y aeroespacial, muy usado para dar ductilidad los frontales de los cohetes ante las fuerzas de empuje generadas por la presión atmosférica y en la industria de la construcción muy utilizados para contrarrestar momentos traccionantes en elementos estructurales (MAPEI, 2015).

La **Tabla 5** se encuentran los valores típicos de resistencia a la tracción en la dirección longitudinal y transversal de los compuestos. En este tipo de material la resistencia longitudinal es entre 30 y 40 veces mayor que la fuerza transversal. Esto se debe a la probabilidad de falla sin agrietamiento de las fibras en la dirección transversal. La resistencia a la tracción en la dirección longitudinal está determinada por la fuerza aportada por la resina, que se podría obtener aproximadamente con la **Ecuación 5** (Curell, 2014).

$$T_s = T_{sf} * V_f + T_{Sm} * V_m \quad (5)$$

Donde:

$T_s$ : Resistencia a la tracción última del compuesto

$T_{sf}$ : Resistencia a la tracción última de las fibras.

$V_m$ : Volumen de la matriz.

$T_{Sm}$ : Resistencia a la tracción última de la matriz.

$V_f$ : Volumen de las fibras

**Tabla 5**

*Resistencia a la tracción y compresión del FRP en sentido longitudinal y transversal*

Material	Resistencia		Resistencia		Cortante (MPa)
	Longitudinal		Transversal		
	Tensión (MPa)	Compresión (MPa)	Tensión (MPa)	Compresión (MPa)	
Carbón/Epoxi	1448	600	52	206	93
Vidrio/Vinil	610	215	49	49	16
Aramida/Epoxi	1400	235	12	53	34

Fuente: (Mori, 2008)

## 2.5 Aplicaciones.

### 2.5.1 Aplicaciones de fibra de vidrio (GFRP).

La fibra de vidrio es el compuesto con menos capacidad resistiva, sin embargo se lo ha utilizado para fines no estructurales al tratarse de láminas, donde, su uso se hace factible a nivel ambiental, ya que puede ser fabricado a base de materia prima reciclable (Plaresma, 2016). Entre sus usos para obras civiles se encuentran:

- Obras menores mediante el reforzamiento con perfiles poltruidos.
- Rejillas pluviales.
- Rejillas para piso.
- Aislamiento térmico y acústico
- Tanques de almacenamiento pequeños.

Para otras aplicaciones se tiene como referencia la elaboración de:

- Fibra óptica

- Transporte de luz natural.
- Creación de partes de automóviles.

### **2.5.2 Aplicaciones de fibra de Aramida (AFRP).**

Este compuesto posee altas propiedades mecánicas llegando a compararse con la fibra de carbono, el inconveniente que presenta es, en su resistencia a largo plazo, ya que disminuye con el pasar del tiempo (Tecno Peg, 2019). Se la puede utilizar para reforzamiento de obras temporales o emergentes

- Albergues.
- Faenas.

Para otras aplicaciones se tiene como referencia la elaboración de:

- Reforzamiento de frentes aeroespaciales.
- Chalecos antibalas.
- Compuestos balísticos.
- Neumáticos de bicicleta.

### **2.5.3 Aplicaciones de fibra de Carbono (CFRP).**

Es el compuesto más aplicado en la industria de la construcción debido a su alta versatilidad para reforzar elementos mediante barras de refuerzo interno y láminas para refuerzo externo, posee propiedades mecánicas favorables como una alta resistencia a la tracción como se muestra en la **Tabla 3**, y capacidad de absorber energía de deformación (Alampalli et al, 2000). Entre las aplicaciones más comunes se encuentran:

- Reforzamiento tanto interno como externo de elementos estructurales sometidos a tracción.
- Restauración de edificaciones antiguas o deterioradas.
- Elaboración de puentes con luces moderadas de hasta 20 metros.
- Perfiles prefabricados.

## 2.6 Sostenibilidad del material.

Los compuestos FRP son completamente benéficos al medio ambiente, debido a que no se produce humo, residuos o toxinas y pueden ser fabricados con materiales reciclados como, por ejemplo; la fibra de vidrio, que se la puede encontrar de manera muy excesiva a nivel mundial. Son resistentes a cambios climáticos, no se descomponen ni se oxidan por su alta resistencia a la corrosión. Su larga vida útil de alrededor de 50 años hace que sea minúscula la necesidad de ser reparados o sustituidos a diferencia de los materiales tradicionales (BFG Arquitectura, 2017). Entre las propiedades sostenibles de los compuestos FRP entre los ingenieros y diseñadores son:

- **Durabilidad:** Poca frecuencia para mantenimiento y pocas o casi nulas probabilidades de reemplazo
- **Resistencia a la corrosión:** Lo que resulta en un menor índice patológico en el material.
- **Bajo peso:** Ayuda a reducir el impacto en el uso del transporte e instalación, debido a su maleabilidad se requieren de equipo más pequeño para su ensamblaje.
- **Reducción de secciones:** Esto principalmente referido a la fibra de carbono CFRP con su alta resistencia a la tracción ya sea en barras o láminas, se utiliza

menos cantidad de material para alcanzar los niveles deseados de resistencia en cualquier elemento sometido a flexión.

### ***2.6.1 Uso a futuro de los compuestos.***

Si bien la fibra de carbono (CFRP) es el material más utilizado en la construcción también es el más costoso debido a la complejidad en su producción, además a la falta de conocimiento acerca de las propiedades y diseño de estos elementos estructurales en Latinoamérica. Cabe recalcar que para su ensamblaje la mano de obra debe ser calificada (Fuentes, 2018).

Existen ya referentes de obras civiles como puentes peatonales realizadas en FRP con muy buenos resultados sobre todo en su eficiencia estructural y ambiental, donde el análisis de estas promoverá el uso y la fabricación del FRP ampliando su conocimiento en el diseño, ensamblaje y mantenimiento, ya sea para el uso insitu o la elaboración de elementos prefabricados a nivel local. Estableciendo tendencias del uso en el material, se prevé optimizaciones en su fabricación y de la misma forma una reducción significativa en costos de producción.

### 3. CAPITULO III. METODOLOGÍA

#### 3.1 Tipo de investigación.

La metodología utilizada es de carácter no experimental ya que se pretende analizar las variables y fórmulas matemáticas propuestas por los códigos para el diseño de elementos estructurales reforzados con FRP, con los enfoques:

**Descriptivo:** Para entender el comportamiento del material, sus características, propiedades, ventajas y desventajas.

**Explorativo:** Ya que se pretende aportar con información de diseño y dar alternativas de reforzamiento, en este caso, para pequeñas estructuras como puentes peatonales y promover a que en el futuro se puedan diseñar y elaborar estructuras más complejas y eficientes en Latinoamérica.

**Explicativo:** De esta manera se puede corroborar toda la información recabada concatenando y relacionando las fórmulas y dictámenes normativos internacionales con referentes construidos a base de este material alrededor del mundo, efectivizando su viabilidad en Latinoamérica.

#### 3.2 Selección de información.

La información obtenida proviene de 9 artículos científicos, 12 tesis, 6 ensayos, 3 reportes técnicos, 6 códigos, 4 catálogos y 2 videos haciendo un total de 42 referencias bibliográficas véase la **sección 7**. Ya conociéndose la capacidad, tanto en módulo de elasticidad, resistencia a la tracción, deformaciones y composición de los distintos tipos de FRP, se puede buscar e interpretar los códigos y/o recomendaciones internacionales entre ellos el ACI-318-08, ACI.440-2R-08, AASHTO Puentes LRFD, AASHTO FRP Pedestrian

Bridge Specification, Eurocode 1 parte 2, y la NEC-15 para el diseño de los elementos principales, haciendo énfasis en el reforzamiento a flexión y corte con láminas; ya que “Sika” es la principal empresa de fabricación de elementos laminados de FRP en Latinoamérica.

Este trabajo de investigación se enfoca en el código ACI.440-2R “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.” Es la norma americana encargada de establecer parámetros de diseño para elementos a flexión y cortante, evaluando la capacidad de los elementos y obteniéndose la cantidad requerida en área de refuerzo por FRP “ $A_f$ ” si se hace un análisis pertinente de la distribución de esfuerzos y deformaciones del material reforzado. Posteriormente se compara la capacidad con la demanda enfocada a puentes peatonales con las recomendaciones del AASHTO “FRP Pedestrian Bridge Specification” de la cual se obtienen las cargas vivas, muertas y estableciendo vibraciones y deflexiones máximas permisibles en los puentes peatonales a diseñar. Se hace necesario también un breve análisis del Eurocode 1 part 2 “Traffic loads on bridges” ya que existen referentes de puentes peatonales en Europa.

### **3.3 Selección de referentes.**

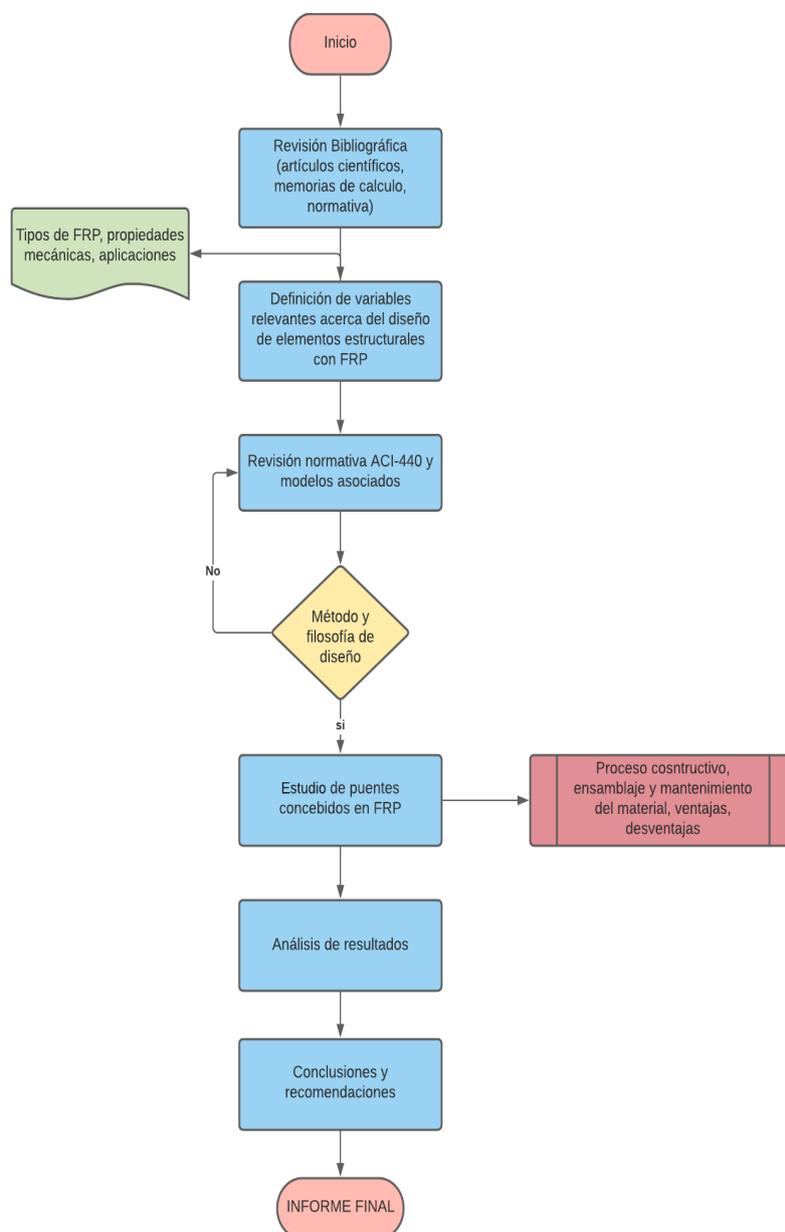
Luego de entender por completo la capacidad, el comportamiento y el diseño de los elementos reforzados con FRP; el analizar referentes de puentes peatonales construidos alrededor del mundo, es la mejor estrategia para consolidar los conocimientos obtenidos y generar criterios de diseño adecuados, para la concepción de este tipo de obras extrapoladas a nuestra región. Los referentes pertenecen a los continentes de Europa (Dawlish Station Footbridge – Reino Unido), Oceanía (SkyPath Pedestrian Bridge – Nueva Zelanda), Asia (Puente peatonal Tainan-Taiwán) y América (Reparación del Puente La Ruedita-Guatemala). Teniendo claro conocimiento de que, debido a sus ubicaciones diferentes, estos tendrán

distintos criterios de diseño de acuerdo con que tanto conocimiento tiene la región acerca de este material.

### 3.4 Esquema metodológico.

#### Figura 8

##### *Esquema metodológico de la investigación*



Fuente: Elaboración propia

### 3.5 Diseño de elementos estructurales basados en la norma ACI.440-2R.

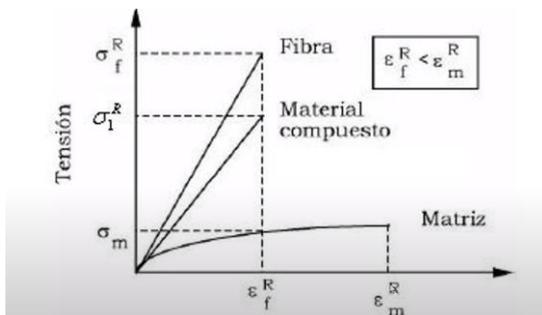
#### 3.5.1 Consideraciones previas.

Si el elemento estructural se lo somete a cargas más allá de las previstas; el material compuesto tiene a desprenderse y generar pérdida sustancial de la ductilidad al sistema (Guzmán, 2015).

Se puede utilizar todas las teorías elásticas y de resistencia de materiales debido a que el material se comporta en su gran parte en el rango elástico evidenciado en la **Figura 9**. El compuesto será sometido a fuerzas por flexión, corte, carga axial y momento flector, donde los elementos deberán ser diseñados para resistir todos los estados de carga (Curreri, 2016).

#### Figura 9

*Curva esfuerzo deformación del material compuesto, fibras y matriz FRP*



Fuente: (Curreri, 2016)

#### 3.5.2 Factor de reducción por ambiente $C_E$ .

El ACI 440-2R-08 aclara que el material compuesto tiende a perder resistencia al ser expuesto a efectos medioambientales los cuales pueden ser: humedad, agua salada, temperaturas altas o bajas, fuego, impacto, rayos UV (Curreri, 2016).

Para considerar estas anomalías, la normativa plantea que la resistencia a la tracción proporcionada por el fabricante del compuesto debe ser multiplicada por coeficiente de reducción ambiental  $C_E$  expresado en la **Ecuación 6** (ACI-440-2R-08).

$$f_{fe} = C_E * f_{fe}' \quad (6)$$

Donde

$f_{fe}$ : Es el esfuerzo a tracción último modificado por el factor ambiental.

$f_{fe}'$ : Es el esfuerzo a tracción último del FRP otorgado por el fabricante.

$C_E$ : Factor de reducción ambiental.

La **Tabla 6** presenta los factores ambientales asociados con el coeficiente  $C_E$ .

**Tabla 6**

*Coeficiente CE para consideraciones ambientales*

<b>Factor de reducción para el sistema FRP según el tipo de exposición ambiental</b>		
Consideraciones Ambientales	Tipo de fibra	Factor de reducción "CE"
Interior	CFRP	0.95
Exterior: Puentes, Muelles y Estacionamientos abiertos	CFRP	0.85
Ambientes agresivos: Plantas Químicas y plantas de tratamiento	CFRP	0.85

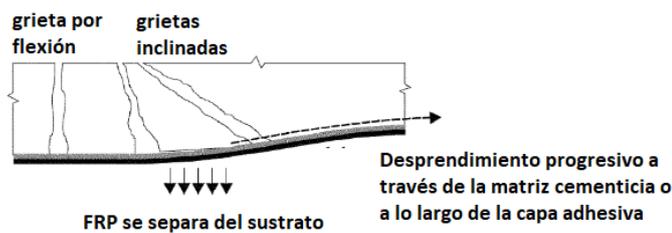
Fuente: Adaptado del (ACI-440-2R-08)

### 3.5.3 Falla por adherencia.

Las grietas que se generen en el miembro estructural por sobrecarga, tanto verticales como inclinadas (véase en la **Figura 10**), afectan significativamente la capacidad de adherencia del FRP al elemento, por lo tanto la norma americana (ACI-440-2R-08) promueve; limitar la capacidad de deformación unitaria del compuesto reduciéndola para su posterior diseño, haciendo que la compatibilidad entre materiales sea más efectiva en caso de grietas.

**Figura 10**

*Desprendimiento iniciado por fisuras de flexión y corte*



Fuente: Adaptado de (ACI-440-2R-08) traducción propia.

La ecuación que limita la deformación última obtenida por ensayos de laboratorio del FRP está dada por:

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 * \sqrt{\frac{f'c}{n * E_f * t_f}} \leq 0.9 * \varepsilon_{fu} \quad (7)$$

Donde:

$\varepsilon_{fd}$ : Deformación efectiva (utilizada para el diseño)

$f'c$ : Resistencia a la compresión del concreto (MPa)

$n$ : Numero de láminas o capas

$E_f$ : Módulo de elasticidad de la fibra (MPa)

$t_f$ : Espesor de la fibra (mm)

$\varepsilon_{fu}$ : Deformación última obtenida de ensayos

### 3.5.4 Disposición de refuerzo FRP por flexión.

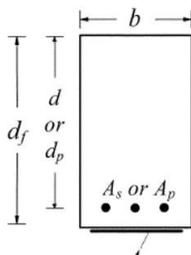
Según el diseño de la estructura: la disposición del refuerzo en una sección de concreto varia en dos categorías: como lámina externa o barras de fibra de carbono (Guzmán, 2015). El uso de estas dependerá de la adquisición del material o la disposición que tenga el fabricante en ese momento.

#### 3.5.4.1 Lámina externa.

Prevista en el uso de elementos que tengan secciones grandes, donde resulta más factible adquirir la lámina entera para sellar completamente la sección para su reforzamiento (Curreri, 2016).

### Figura 11

*Esquema de refuerzo de lámina externa.*



Fuente: (ACI 440.2R-08).

Estas láminas típicamente se las utiliza para el refuerzo en elementos estructurales destinados al uso de puentes debido a que en gran parte de la superestructura se encuentran las secciones con mayor tamaño como se muestra en la **Figura 12**.

**Figura 12**

*Refuerzo a flexión con CFRP-España*



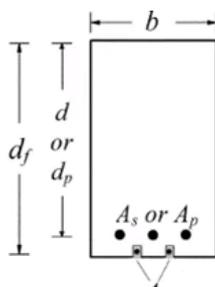
Fuente: (Diego Villalón et al., 2008)

### 3.5.4.2 Barras de fibra de carbono.

Las barras de fibras de carbono son utilizadas para elementos estructurales de sección pequeña donde será necesario la inserción de pequeños surcos o aberturas donde estará ubicado el refuerzo como se observa en la **Figura 13** (Curreri, 2016).

**Figura 13**

*Esquema de refuerzo con barras.*

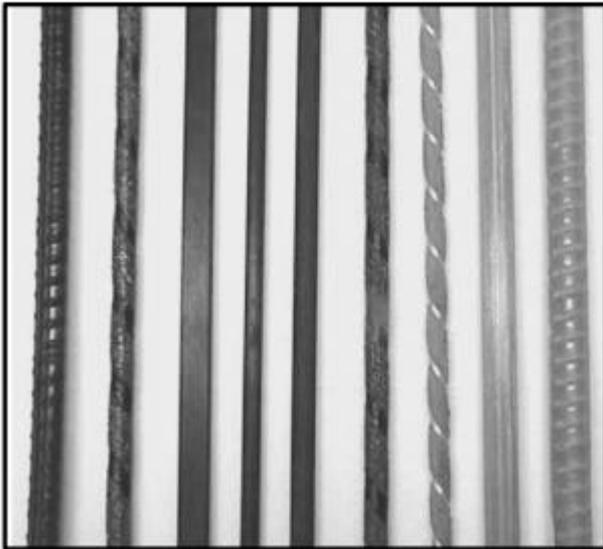


Fuente: (ACI-440-2R-08)

Barras de FRP son fabricadas para la sustitución total del acero de refuerzo dispuestas en varias formas redondas, rectangulares, cuadradas como lo indica la **Figura 14**.

#### Figura 14

*Formas en barras de FRP*

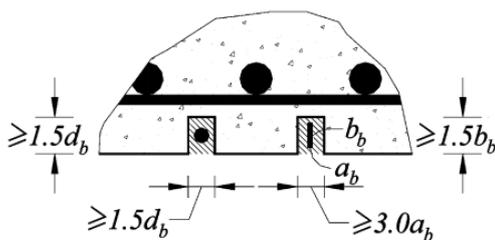


Fuente: (Lorenzis, 2007)

El ACI.440-2R recomienda que estos surcos también sean normados como se muestra en la **Figura 15**, de tal forma que se evite el desprendimiento de las barras de refuerzo y estas tenga el efecto deseado en el elemento.

#### Figura 15

*Dimensiones mínimas de los surcos*



Fuente: (ACI 440.2R-08)

### 3.5.5 *Filosofía de diseño.*

El (ACI.440-2R-08) basado en sistemas FRP como refuerzo estructural en su sección 9.1 propone niveles aceptables de seguridad mediante el diseño basados en dos estados límites de servicio.

El primer estado límite referente a las deflexiones excesivas y agrietamiento, el segundo a la falla, rotura por tensión y fatiga. Para ello se debe evaluar la resistencia nominal del miembro y sus posibles modos de falla (ACI 440.2R-08).

La normativa permite utilizar los factores de mayoración de carga del (ACI-318-08) adicionando una combinación de carga (véase **Ecuación 8**) donde, se debe utilizar el mayor efecto producido por dichas combinaciones.

$$\phi R_n \geq 1.1S_{DL} + 0.75S_{LL} \quad (8)$$

Donde:

$\phi R_n$ : Resistencia nominal del elemento reducida.

$S_{DL}$ : Efecto de cargas muertas.

$S_{LL}$ : Efecto de cargas vivas.

Para estructuras de almacenamiento donde la carga viva sea igual o superior a los  $730 \text{ kg/cm}^2$  el factor de 0.75 se lo puede subir a 1 (ACI.440-2R-08)

### 3.5.6 *Factor de reducción de resistencia $\psi_f$*

El ACI promueve el uso de un factor de reducción de resistencia para el FRP el cual está basado en un análisis estadístico referente a ensayos de tracción y corte. El valor de este

coeficiente da una percepción más congruente de cuan exhaustivo fue el análisis, donde, mientras menor sea el valor significa que se tiene cierto grado de incertidumbre aún sobre el comportamiento (ACI.440-2R-08).

**Tabla 7**

*Factor de reducción de resistencia para el uso de FRP*

<b>Factor “<math>\psi_f</math>”</b>	<b>Descripción</b>
0.85	Elementos sometidos a flexión
0.85	Elementos sometidos a corte
0.95	Elementos para rehabilitación con alto grado de cizalladura

Fuente:(ACI.440-2R-08)

### 3.5.7 *Diseño a flexión.*

#### 3.5.7.1 **Hipótesis de diseño.**

Las hipótesis de concreto reforzado con CFRP y acero son muy similares, debido a que ambos materiales tienden a cumplir características elásticas ideales aplicando la teoría de resistencia de materiales (Curreri, 2016); las hipótesis son las siguientes:

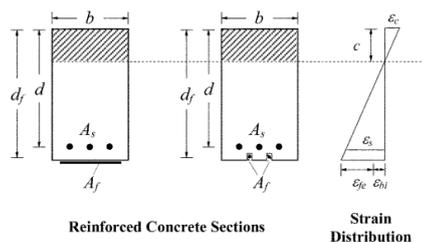
- Los cálculos de diseño se basan en las dimensiones y disposición de láminas FRP, así como las propiedades del material y del miembro existente (ACI.440-2R-08).

- Las deformaciones unitarias en el refuerzo y el concreto son directamente proporcionales al eje neutro. Es decir, una sección plana después de la aplicación de la carga sigue permaneciendo plana (ACI-318-08)
- No existe deslizamiento relativo entre el refuerzo de FRP externo y el concreto (ACI.440-2R-08)
- La deformación por corte dentro de la capa adhesiva es despreciable porque la capa adhesiva es muy delgada con ligeras variaciones en su espesor (ACI.440-2R-08)
- La máxima deformación unitaria a compresión del concreto  $\epsilon_{cu} = 0.003$  (ACI-318-08)
- Se desprecia la resistencia a tracción del concreto (ACI-318-08)
- El esfuerzo de FRP tiene un comportamiento en la curva de tensión-deformación lineal elástica hasta la rotura (ACI.440-2R-08).

Todas estas hipótesis apuntan a la generación de perfiles de deformaciones donde se permite realizar el equilibrio interno haciendo efectiva la compatibilidad entre esfuerzos y deformaciones entre el concreto y el CFRP como se muestra en la **Figura 16**

**Figura 16**

*Distribución lineal de deformaciones*



Fuente: (ACI.440-2R-08)

*Nota: La ilustración muestra una sección para rehabilitación donde actúa el acero de refuerzo ( $A_s$ ) y el FRP ( $A_f$ ); si se quisiera diseñar un elemento solo con refuerzo FRP el esquema sigue siendo válido tomando en cuenta solo el material en cuestión.*

### **3.5.7.2 Deformación del FRP en estado límite o última $\epsilon_{fe}$ .**

Se debe determinar el nivel de deformación en el refuerzo FRP para su estado límite último “ $\epsilon_{fe}$ ” donde el hormigón se agrieta y la fibra se rompe, pero sin exceder la deformación efectiva “ $\epsilon_{fd}$ ” para evitar el desprendimiento por agrietamiento encontrada en la **Ecuación 9** (ACI.440-2R-08).

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left( \frac{d_f - c}{c} \right) \leq \epsilon_{fd} \quad (9)$$

Donde:

$\epsilon_{fe}$ : Deformación unitaria última del FRP

$\epsilon_{cu}$ : Deformación unitaria del concreto 0.003

$d_f$ : Peralte efectivo de la sección

$c$ : Distancia al eje neutro

$\epsilon_{fd}$ : Deformación efectiva limitante para desprendimiento por grietas

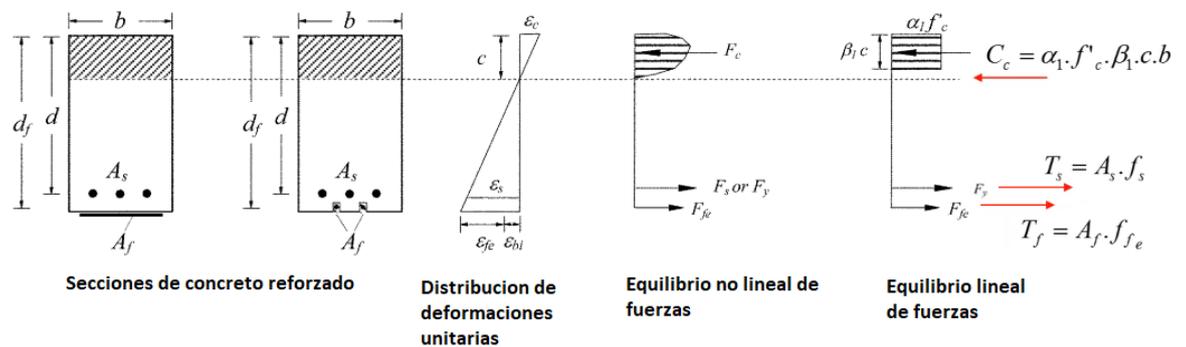
### **3.5.7.3 Distribución de esfuerzos y deformaciones internas.**

Como lo mencionado en el apartado **3.5.7.1**, gracias a las hipótesis de diseño promovidas por el (ACI.440-2R-08), los diseñadores tienen toda la libertad de construir un diagrama de esfuerzos y deformaciones mostrado en la **Figura 17**, donde se pueden

relacionar y establecer ecuaciones de equilibrio y facilitar la comprensión del comportamiento del miembro estructural y la cantidad de refuerzo FRP que este requiere (Curreri, 2016).

**Figura 17**

*Distribución interna de esfuerzos y deformaciones en su estado límite.*



Fuente: (ACI.440-2R-08)

Realizando el equilibrio de fuerzas se puede llegar a la **Ecuación 10** que rige el comportamiento a flexión del elemento y por ende se puede despejar la cantidad de refuerzo FRP que se necesita para satisfacer la demanda mayorada.

$$\phi Mn = \phi * A_s * f_s * \left( d - \frac{\beta_1 * c}{2} \right) + \psi_f * A_f * f_{fe} * \left( df - \frac{\beta_1 * c}{2} \right) \quad (10)$$

Si no existe contribución de acero de refuerzo “As” en el miembro estructural la formula se reduciría como se muestra en la **Ecuación 11**

$$\phi Mn = \phi * \psi_f * A_f * f_{fe} * \left( df - \frac{\beta_1 * c}{2} \right) \quad (11)$$

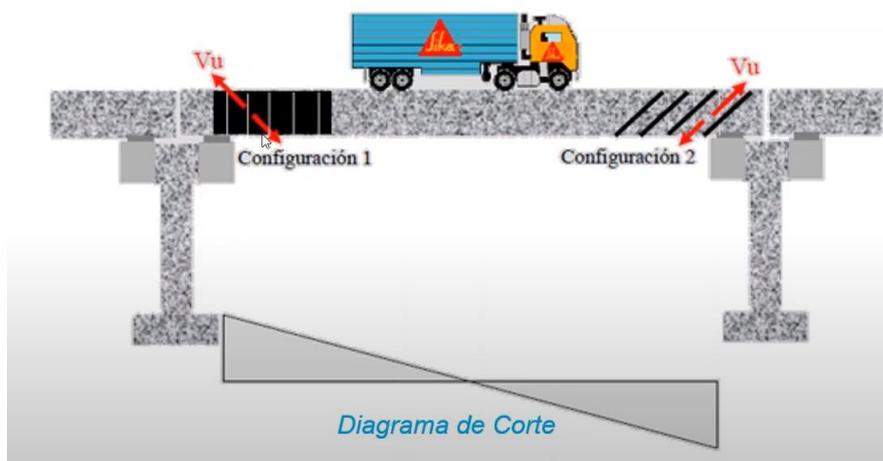
### 3.5.8 Diseño a corte.

#### 3.5.8.1 Consideraciones previas.

Existen distintas maneras de disposición de las fibras a corte para los elementos simplemente apoyados, estos pueden estar distribuidos de forma perpendicular o inclinada al eje longitudinal como se muestra en la **Figura 18**, esta es una de las ventajas más significativas que tiene el sistema FRP en cuanto a resistencia se refiere, por lo que se puede disponer las láminas en el sentido en que realmente actúa el cortante; esto no sucede con los estribos de acero, donde estos siempre se encontrarán limitados perpendicularmente al eje longitudinal del elemento (Franco Mejía, 2008).

#### Figura 18

*Caso típico de reforzamiento a corte con FRP*

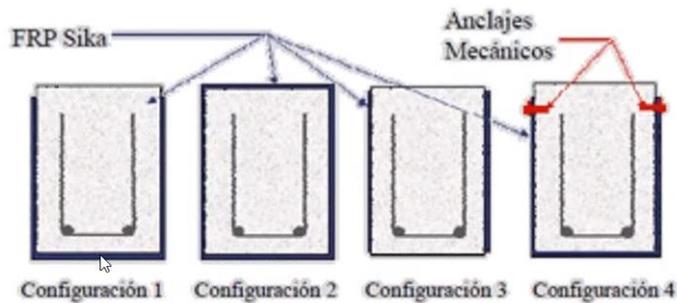


*Fuente:* (Sika, 2020)

Previo al diseño por corte se debe conocer una configuración adecuada y disposición de las fibras, véase en la **Figura 19** ya que la inclinación influye en el cálculo del cortante nominal " $V_n$ " (ACI.440-2R-08).

**Figura 19**

*Configuraciones de reforzamiento a corte haciendo uso de FRP*



Fuente: (Rendón, 2015)

*Nota: Configuración 1. En "U", Configuración 2. Envoltura completa, Configuración 3. Laterales, Configuración 4. Laterales con anclajes.*

### 3.5.8.2 Resistencia al corte.

#### Cortante nominal

La consideración tomada para el cálculo y el control del cortante nominal debe regirse a la norma (ACI-318-08), donde la resistencia de diseño debe ser mayor o igual a la resistencia requerida como se muestra en la **Ecuación 12** (Soudki & Alkhrdaji, 2005)

$$\phi V_n \geq V_u \quad (12)$$

Donde:

$\phi$ : Factor de reducción de resistencia al corte (se obtiene del ACI-318-05).

$V_n$ : Cortante nominal total (concreto más FRP).

$V_u$ : Cortante requerido debido a la demanda.

El cortante nominal es el aporte del concreto y el FRP por lo que la **Ecuación 12** puede extrapolarse de la siguiente manera:

$$\phi V_n = \phi (V_c + \Psi_f V_f) \quad (13)$$

Donde:

$\phi$ : Factor de reducción de resistencia al corte (se obtiene del ACI-318-08).

$V_n$ : Cortante nominal total (concreto más FRP).

$V_c$ : Resistencia al corte aportada por el concreto (se obtiene del ACI-318-08).

$\Psi_f$ : Factor de reducción de resistencia al corte para miembros FRP.

$V_f$ : Resistencia al corte aportada por el FRP.

#### **Cortante aportado por el concreto.**

La resistencia a corte de cualquier elemento estructural en concreto que está sometido solamente a cargas de corte y flexión está en función de la geometría (base y peralte efectivo) y de la resistencia a la compresión del concreto “ $f'_c$ ” el (ACI-318-08) responde a la

#### **Ecuación 14.**

$$V_c = 0.53 * \sqrt{f'_c} * b_w * d_f \quad (14)$$

Donde:

$f'_c$ : Resistencia a la compresión del concreto en  $\text{kg/cm}^2$ .

$b_w$ : Base de la sección en cm

$d_f$ : Peralte efectivo de la sección.

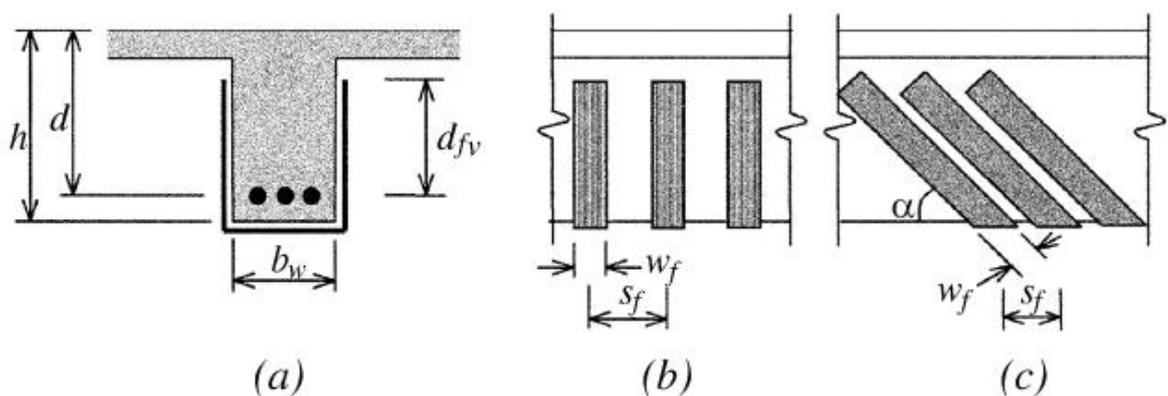
$V_c$ : Resistencia al corte aportada por el concreto (se obtiene del ACI-318-08).

### Cortante aportado por el FRP.

Según el (ACI.440-2R-08) el aporte de cortante tal y como en los estribos de acero, se encuentran en función de la geometría del FRP, la separación. Un parámetro importante es la versatilidad de utilizar la lámina en dirección de un patrón de fisuras asumido, donde se obtiene un comportamiento más realista del cortante en el miembro estructural; entonces, el cálculo del cortante en FRP, también está en función de un ángulo “ $\alpha$ ” que determina la inclinación en la cual la lámina será colocada, esto esta esquematizado en la **Figura 20**.

### Figura 20

Esquema para diseño a corte utilizando reforzamiento FRP



Fuente: (ACI.440-2R-08)

$$V_f = \frac{A_{fv} * f_{fe} * (\text{Sen}(\alpha) + \text{Cos}(\alpha)) * d_f}{S_f} \quad (15)$$

$$A_{fv} = 2 * n * t_f * w_f \quad (16)$$

Donde:

$V_f$ : Cortante aportado por el FRP.

$f_{fe}$ : Tensión efectiva en el FRP (Obtenida de la distribución interna de esfuerzos).

$\alpha$ : Ángulo de inclinación de la lámina.

$d_f$ : Peralte efectivo de la sección.

$n$ : Numero de capas utilizadas.

$t_f$ : Espesor de la lámina.

$w_f$ : Ancho de la lámina.

### **3.6 Evaluación de cargas según la AASHTO**

Para la obtención de las cargas vivas y muertas actuantes, se deberá evaluar el uso específico del puente peatonal y su ubicación (elevado o a nivel del suelo), obteniéndose cargas por: peso propio, peatones y viento.

#### **3.6.1 Cargas vivas.**

##### **3.6.1.1 Estimación de Cargas peatonales según la AASHTO “FRP Pedestrian Bridge Specification”.**

###### **Miembros principales.**

Los miembros principales de soporte, incluidas vigas, cerchas y arcos deben diseñarse para una carga viva peatonal de  $85 \frac{lb}{pie^2}$  o  $415 \frac{kg}{m^2}$ , la carga al ser de tipo dinámica se debe

ubicar en las áreas de los miembros principales, donde se produzca la máxima tensión, momento y cortante (AASHTO, 2008).

Una alternativa para reducir la carga viva actuante es; que si el área del tablero (deck) de la super-estructura es lo suficientemente grande o superior a los  $400 \text{ ft}^2$  o  $37.16 \text{ m}^2$ , la carga peatonal se puede reducir siguiendo la **Ecuación 17** (AASHTO, 2008).

$$Cv_{peaton} = 85 * \left( 0.25 + \frac{15}{\sqrt{A1}} \right) \quad (17)$$

Donde:

$Cv_{peaton}$ : Carga viva del peatón en  $\frac{lb}{pie^2}$

$A1$ : Área del tablero de la super-estructura en  $pie^2$

La carga viva peatonal no debe ser inferior a  $65 \frac{lb}{pie^2}$  o  $317.36 \frac{kg}{m^2}$

### **3.6.2 Estimación de Cargas peatonales según el análisis estructural.**

El método constituye en la toma de un análisis estadístico promedio de cuanto abarca una persona por cada metro cuadrado, donde esta cantidad será divisora del área de la super estructura “A1” obteniéndose el número total de personas que entrarían en el tablero expresado en la **Ecuación 18**, donde este valor es conservativo, debido a que es poco probable que toda la cantidad de personas este al mismo tiempo llenando toda el área del puente (Collins, 2020).

$$\#personas = \frac{A1}{A_{personas}} \quad (18)$$

Donde:

$A1$ : Área del tablero de la super-estructura en  $m^2$

$A_{personas}$ : El valor que abarca una persona promedio en área es  $0.186 m^2$

Con el dato de las personas obtenidas para esa área del puente se procede a multiplicar por el peso promedio de una persona como se muestra en la **Ecuación 19**

$$Cv_{total.peaton} = \#personas * P_{promedio.persona} \quad (19)$$

Donde:

$Cv_{total.peaton}$ : Carga total aplicada al tablero de la super-estructura.

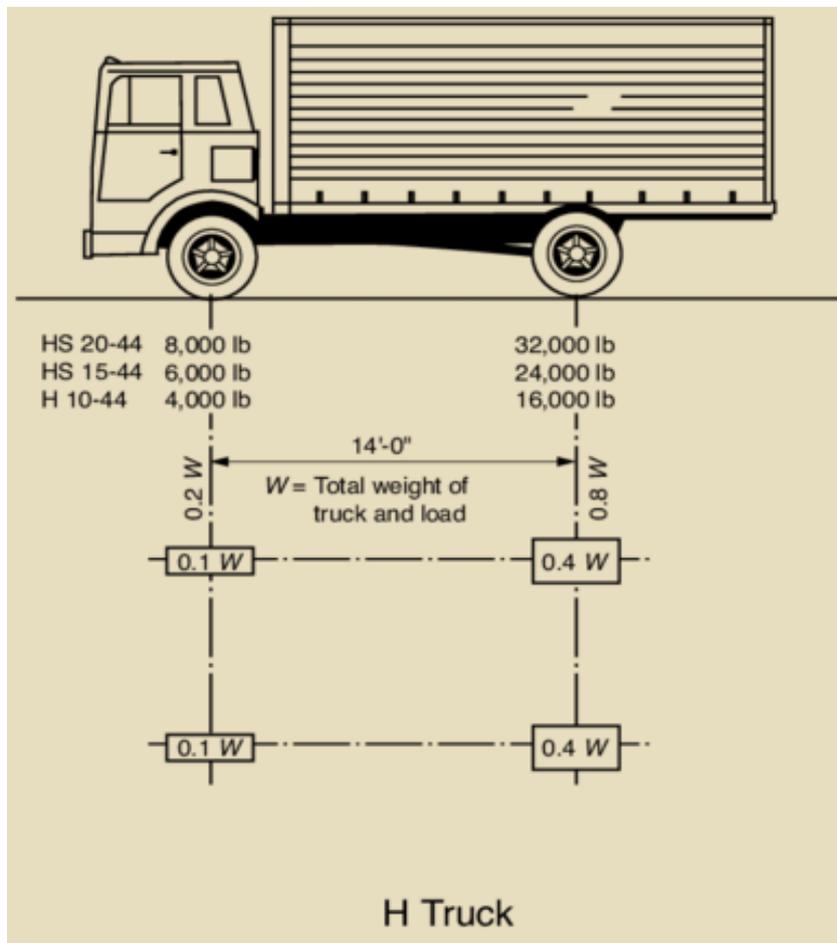
$P_{promedio.persona}$ : Peso promedio estadístico de 69 kg por persona.

### 3.6.3 Carga vehicular.

Si se requiere en un caso emergente o de mantenimiento donde influye la ubicación del puente, se puede considerar el ingreso de un vehículo llamado “H-truck” mostrado en la **Figura 21** siendo este un modelo estándar propuesto por la norma AASHTO, si el diseñador lo considera pertinente (AASHTO, 2008).

**Figura 21**

*Esquema de camión H-Truck.*



Fuente: (AASHTO, 2008).

- Para un ancho de tablero de 6 a 10 pies (1.83 a 3.05m) se utilizará el peso del H-5 Truck de 10 000 lb (4.54 ton).
- Para un ancho de tablero de más de 10 pies (3.05m) se utilizará el peso del H-10 truck de 20 000 lb (9.07 ton).

Para el análisis estructural, siendo el vehículo una carga dinámica en el puente, este se debe posicionar de tal forma que se genere el máximo cortante y momento siguiendo el teorema de Barre mediante un análisis de líneas de influencia (Rodríguez, 2014).

Si se considera una carga vehicular no hará falta tomar en cuenta la carga peatonal (AASHTO, 2008).

### 3.6.4 Cargas de viento.

Todas las cargas de viento deben ser consideradas perpendicularmente al eje del elemento expuesto (AASHTO, 2008).

Si el puente se encuentra a una altura de 9.15m sobre el nivel del suelo se debe calcular la velocidad del viento para su diseño mediante la **Ecuación 20** (Rodríguez, 2014)

$$V_{DZ} = 2.5 * V_O * \left(\frac{V_9}{V_B}\right) * \ln\left(\frac{Z}{Z_O}\right) \quad (20)$$

Donde:

$V_{DZ}$ : Velocidad del viento de diseño a la altura de diseño  $Z$   $\left(\frac{km}{h}\right)$ .

$V_O$ : Velocidad friccional  $\left(\frac{km}{h}\right)$ .

$V_9$ : Velocidad del viento a 9.15m sobre el nivel del terreno o agua de diseño  $\left(\frac{km}{h}\right)$ . En

ausencia de datos  $V_9 = V_B = 160 \frac{km}{h}$

$V_B$ : Velocidad básica del viento igual a  $160 \frac{km}{h}$  a una altura de 9.15m

$Z$ : Altura de la estructura  $> 9.15m$

$Z_O$ : Longitud de fricción que trae el viento aguas arriba (m)

Los valores de “ $Z_O$ ” y “ $V_O$ ” se pueden obtener mediante la **Tabla 8**

**Tabla 8**

Valores de “ $Z_0$ ” y “ $V_0$ ” para condiciones de puentes por encima de los 9.15m del nivel del suelo

CONDICIÓN	TERRENO ABIERTO	AREA SUBURBANA	AREA URBANA
$V_0 \left(\frac{km}{h}\right)$	13.2	17.5	19.3
$Z_0$ (m)	0.07	1.00	2.50

Fuente: (Rodriguez, 2014)

La presión de viento sobre la estructura “WS” se calcula mediante la **Ecuación 21**

$$P_D = P_B * \left(\frac{V_{DZ}}{V_B}\right)^2 = P_B * \left(\frac{V_{DZ}}{160}\right)^2 \quad (21)$$

Si el puente no excede la posición de Z, se pueden tomar directamente los valores de presiones básicas  $P_B$  tanto para barlovento como de sotavento para una velocidad básica  $V_B = 160 \frac{km}{h}$  véase en la **Tabla 9** (Rodriguez, 2014).

**Tabla 9**

Cargas de viento aplicadas horizontalmente para una velocidad básica de 160 km/h

COMPONENTE DE LA SUPERESTRUCTURA	CARGA BARLOVENTO (kg/m <sup>2</sup> )	CARGA SOTAVENTO (kg/m <sup>2</sup> )
Reticulados, columnas y arcos	366.18	122
Vigas	245	-
Grandes superficies planas	195	-

Fuente: Adaptado entre (Rodriguez, 2014) y (AASHTO, 2008)

### 3.6.5 Combinaciones de carga.

La demanda “Q” se verá mayorada por factores “n”, “γ” dictaminados diseño de puentes AASHTO-LRFD estipulado en la siguiente ecuación (Rodríguez, 2014).

$$Q = \sum n * \gamma * Q' \quad (22)$$

Donde:

Q: Demanda mayorada

n: Modificador de carga

γ: Factor de carga, el valor puede ser tomado como 1.00 para puentes peatonales.

Q': Demanda evaluada (cargas vivas, muertas y viento)

El factor de modificación de carga “n” viene dado por la ductilidad “ $n_D$ ”, redundancia “ $n_R$ ” e importancia operativa “ $n_i$ ” que el sistema lo requiere y se lo encuentra en la **Tabla 10**

**Tabla 10***Factor de modificación de carga “n”*

Modificador	Valor	Condición
Ductilidad “ $n_D$ ”	1	Estructuras de acero, puentes de madera, estructuras de acero dúctiles
	1.05	Estructuras de concreto no dúctiles
Redundancia “ $n_R$ ”	1	Redundantes
	1.05	No redundantes
Importancia “ $n_i$ ”	0.9	Puentes temporales
	0.95	ADT < 500
	1	500 < ADT < 40000
	1.05	Cruces en ríos mayores o con ADT > 40000 o en puentes de vías interestatales

Fuente: (Rodríguez, 2014)

**3.6.6 Control de deflexiones.**

Cuando se trata de puentes peatonales elaborados con FRP, no existe mucha probabilidad de exceder la deflexión máxima, debido a que el material compuesto tiene un alto módulo de elasticidad y resistencia a la tracción en comparación a otros materiales, con capacidad de servicio razonable, manteniendo un alto nivel de seguridad. Se debe controlar que la deflexión producida por la carga viva del peatón que no sobrepase el 1/400 de la longitud total del tramo, esta afirmación también se la puede utilizar para cargas de viento; si existen tramos en voladizo la carga de servicio no debe exceder 1/200 del brazo en voladizo (AASHTO, 2008).

### **3.6.7 Control de vibraciones.**

Frecuentemente los puentes peatonales son expuestos a vibraciones perceptibles por los propios usuarios cuando caminan o corren. El potencial de respuesta es significativo debido a la acción dinámica reconocida por varios análisis de puentes que han presentado problemas a lo largo de la historia (AASHTO, 2008).

La frecuencia de una persona cuando camina o corre va desde 1.6 a los 2.4 Hz por lo tanto deben evitarse los puentes con frecuencias fundamentales inferiores a los 3Hz en dirección vertical. Una consideración dictaminada por la norma establece que los puentes deben obtener una frecuencia fundamental superior a los 5.0 Hz para un comportamiento adecuado en casos emergentes, esto exige al diseñador de realizar un análisis dinámico de la estructura (AASHTO, 2008).

La frecuencia fundamental del puente peatonal (en la dirección horizontal) sin carga viva debe ser superior a 3.0Hz para evitar cualquier problema debido al movimiento de lado a lado (AASHTO, 2008).

### **3.6.8 Cargas y deflexiones según el Eurocode.**

#### **Cargas.**

Cabe mencionar esta normativa debido a que más del 65% de puentes peatonales en FRP están hechos en países como Reino Unido, Nueva Zelanda, España etc, donde se establece una carga viva peatonal de  $509.86 \frac{kg}{m^2}$  según “Eurocode 1 Part 2 “Traffic load on bridges”.

## Deflexiones.

El “Eurocode 2 design of concrete structures” establece deflexiones permisibles de acuerdo con las condiciones de carga a la cual está sometido el elemento estructural como se muestra en la **Tabla 11**.

**Tabla 11**

*Deflexiones máximas permisibles de acuerdo con el Eurocode 2*

<b>Tipo de estructura</b>	<b>Límite</b>
Condiciones estéticas y funcionales (cargas cuasi permanentes)	L/250
Limitación de daños de elementos no estructurales sostenidos o adheridos (cargas cuasi permanentes)	L/500

Fuente: (Union, 2011)

### 3.7 Referentes de puentes peatonales construidos a base de FRP.

#### 3.7.1 *Dawlish Station Footbridge – Reino Unido.*

Diseñada por “Tony Gee” y el subconsultante “Optima Projects”, financiada por “Parsons Brinckerhoff”, la pasarela “Dawlish Station” es una estructura de reemplazo de polímero reforzado con fibra (FRP) (véase la **Figura 22**) casi idéntica para su predecesor de acero gravemente corroído. Es el primer puente compuesto FRP instalado en una estación de línea principal en el Reino Unido, también es en particular, el primer puente FRP catalogado de grado II. La estructura replica estéticamente el carácter de la estructura de acero original, propone una solución mucho más ligera y duradera que se espera que resulte en ahorros considerables de costos a lo largo de su vida útil. Tony Gee utilizó el software de análisis LUSAS Bridge para ayudarse con su diseño (Ian, 2008).

**Figura 22**

*Puente peatonal en FRP de la estación Dawlish – Reino Unido*



Fuente: (Ian, 2008)

**3.7.1.1 Características de diseño.**

El puente tiene una longitud de 17.5 m y un ancho de 1.8 m se diseñó para una carga viva de  $509.86 \frac{kg}{m^2}$  basado en las especificaciones del Eurocode 1 Part 2 “Traffic load on bridges” y el Highways Agency Requirements for Road Restraint Systems TD19 para el diseño de miembros secundarios (Ian, 2008).

Las cargas de viento son, en consecuencia, relativamente altas. Los simples controles de estabilidad aerodinámica indicaron que las velocidades críticas del viento para la vibración inducida por vórtice vertical o torsional estaban por encima de 1,25 x de velocidad media del viento (Ian, 2008).

### 3.7.1.2 Compuestos utilizados.

La nueva estructura del puente está fabricada enteramente a partir de materiales FRP, mejorando las propiedades mecánicas y de resistencia de su predecesor. La mayoría de las piezas están pultruidas con refuerzos de fibra de vidrio (GFRP) y resinas de poliéster ignífugas para lograr las propiedades estructurales requeridas (Ian, 2008).

### 3.7.1.3 Secciones y forma estructural.

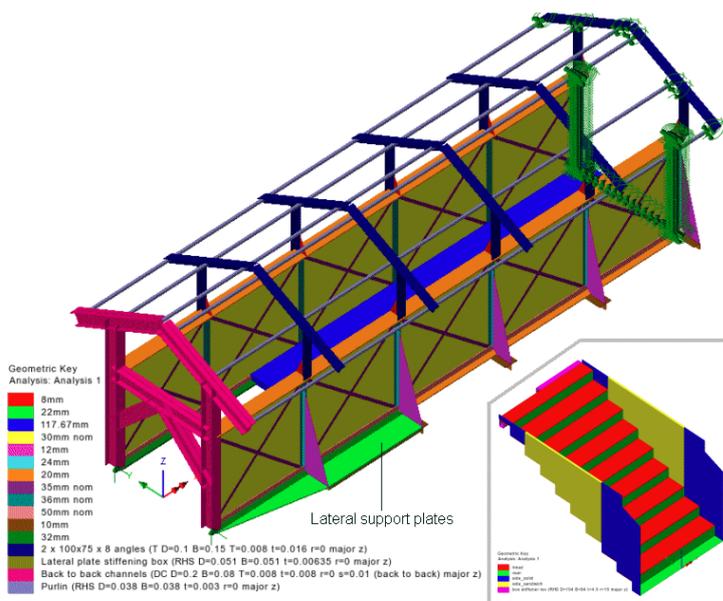
Tanto la estructura primaria como el parapeto se componen de vigas laterales de 2 m formada enteramente de GFRP con resinas epoxi ignífuga, tapada arriba y abajo con ángulos y placas pultruidas para formar el patín de viga. Destajes sobresalidos de 10 cm de ancho conectados a las vigas laterales proveen soporte adicional a las placas verticales a 90° y al deck de la super estructura (Ian, 2008).

El deck formado por el compuesto más ligero con parapetos rígidos para resistir la carga horizontal del viento, eliminando el refuerzo diagonal por debajo. Se deja espacio de 2.7 m a cada extremo para la inclusión de una escalera hecha del mismo material (Ian, 2008).

Los marcos transversales del techo fueron fabricados a partir de ángulos poltruidos consecutivos para formar secciones T con juntas atornilladas, el marco completo lleva consigo un panel hecho de fibrocemento corrugado. En cada extremo del puente se incluye un marco transversal para aumentar mucho más la rigidez lateral y torsional. La composición de la estructura puede apreciarse en la **Figura 23**

**Figura 23**

*Distribución de elementos estructurales en el puente Dawlish Station Footbridge – Reino Unido.*



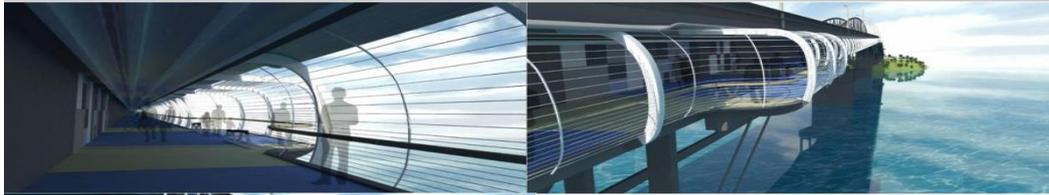
Fuente: (Ian, 2008)

### 3.7.2 SkyPath Pedestrian Bridge – Nueva Zelanda.

Auckland Harbour Bridge (AHB) no ha proporcionado ningún acceso a pie o en bicicleta desde su construcción en 1959. Con SkyPath, el famoso puerto de Auckland proporcionará un sendero compartido para caminar y andar en bicicleta a los peatones (véase la **Figura 24**). Está siendo desarrollado y defendido por el Auckland Harbour Bridge Pathway Trust, un fideicomiso benéfico cuyo objetivo es tener una caminata de clase mundial e instalación para bicicletas en el AHB (Zealand, 2014).

**Figura 24**

*Puente peatonal Skypath-Nueva Zelanda.*



Fuente: (Zealand, 2014)

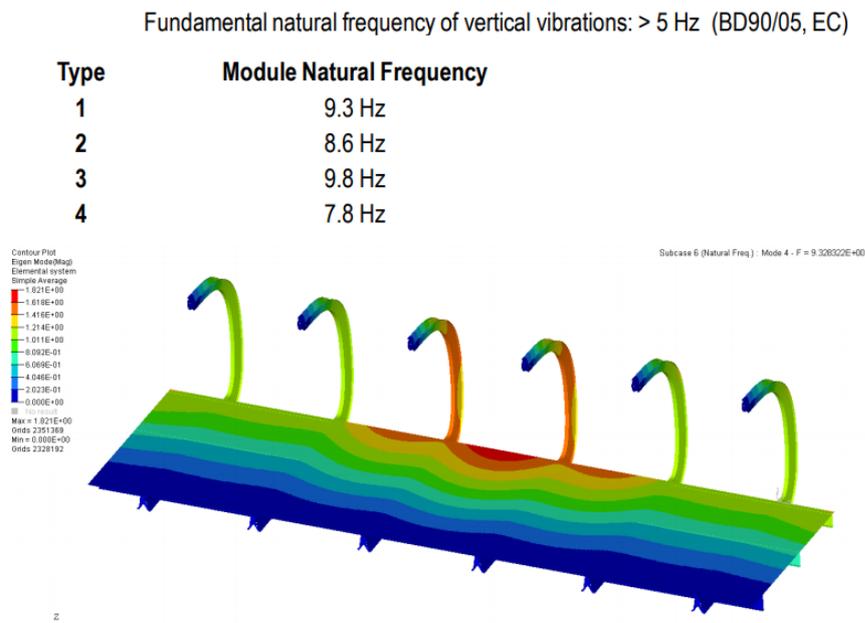
El New Zealand Herald anuncia la construcción de SkyPath con "materiales de la era espacial FRP" debido a que el compuesto ciertamente ha demostrado su supremacía sobre materiales de construcción tradicionales en condiciones marinas y marítimas (Zealand, 2014).

**3.7.2.1 Características de diseño.**

El puente tiene una longitud de 13.71 m y un ancho de 4 m se diseñó basado en las especificaciones del CD 368 "Design Manual for Roads and Bridges" y el "Internacional Building Code" para estimación y combinaciones de carga. Su deflexión máxima es controlada bajo el límite de  $L/300$  y manteniendo una frecuencia de vibración fundamental mayor a los 5 Hz, realizado un análisis dinámico de la estructura como se muestra en la **Figura 25** recomendaciones seguidas por el BD90/05, EC "Design of FRP Bridges and Highway Structures" (Zealand, 2014).

## Figura 25

*Frecuencia fundamental en la super estructura del puente SkyPath*



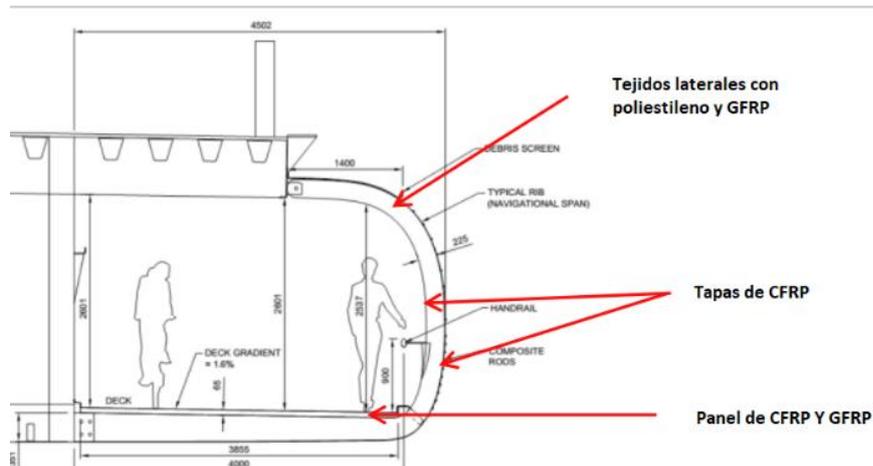
Fuente: (Zealand, 2014)

### 3.7.2.2 Compuestos utilizados.

El puentes se fabricó con Fibra de Vidrio (GFRP) y Carbono (CFRP) para el tablero de la super estructura y miembros principales esquematizados en la **Figura 26** (Zealand, 2014).

**Figura 26**

*Disposición de materiales compuestos en puente Skypath.*



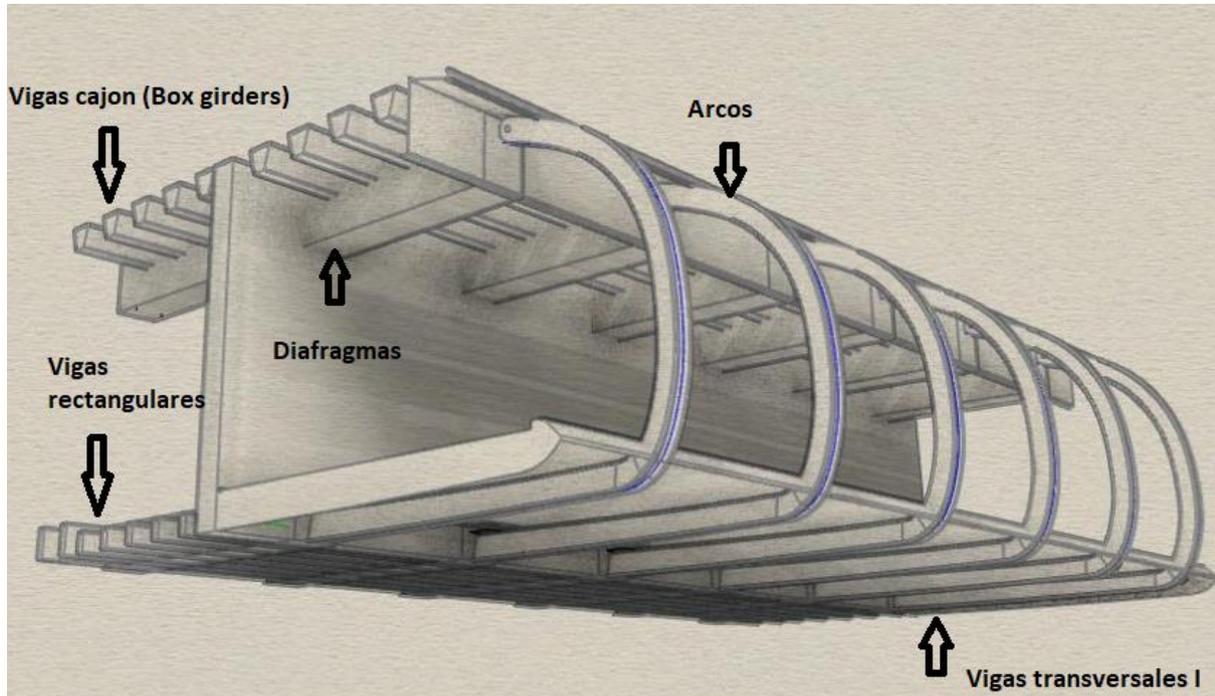
Fuente: (Zealand, 2014)

### 3.7.2.3 Secciones y forma estructural.

El puente está constituido de perfiles pultruidos GFRP en forma de vigas cajón (box girders) en la parte superior para la cubierta con diafragmas transversales, esto permite mayor estabilidad y rigidez contrarrestando las fuerzas de viento y vibraciones de los vehículos en el puente de Auckland siendo la parte más importante de la estructura. En la parte de abajo fueron colocados perfiles de forma rectangular de GFRP con vigas transversales de perfiles I anclados por un arco en los diafragmas que forman de la cubierta asegurando la estabilidad en toda la parte de la super estructura. El deck está constituido por CFRP Pultruido con una lámina de GFRP para evitar el desgaste de este; la composición estructural se puede ver en la **Figura 27** (Zealand, 2014).

**Figura 27**

*Composición estructural de SkyPath-Nueva Zelanda.*



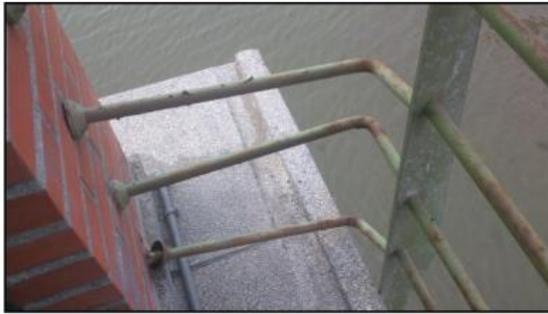
Fuente: (Zealand, 2014)

### 3.7.3 *Puente peatonal Tainan-Taiwán*

Debido a que el Parque Nacional Taijiang de Taiwán está ubicado en un ambiente concentrado de cloruro, las estructuras hechas de los materiales convencionales cercanos a la orilla del mar se encuentran indefensos ante la corrosión. Después de algunos años de la construcción, los miembros estructurales de acero en el Parque Nacional Taijiang se ven parcial o severamente corroídos véase la **Figura 28a y 28b** (Li, 2014).

**Figura 28**

*Problemas de corrosión en el puente peatonal de Tainan-Taiwán*

**a) Pasamanos corroídos****b) Rampa de acceso corroída**

Fuente: (Li, 2014) .

### **3.7.3.1 Características de diseño.**

El puente fue diseñado para una longitud total de 8m con un ancho de 1.5m generando un peso total de la super estructura de 1.2 ton aproximadamente donde se controla su máxima deflexión con  $L/500$  y se utilizó una carga viva de  $415 \frac{kg}{m^2}$  siguiendo los parámetros de la norma AASHTO “Guide Specifications for the Design of FRP Pedestrian Bridges” (Li, 2014).

### **3.7.3.2 Compuestos utilizados.**

Todos los miembros del puente peatonal estaban hechos de perfiles compuestos de GFRP producidos por pultrusión (Li, 2014).

### **3.7.3.3 Secciones y forma estructural.**

La parte más significativa de la superestructura del puente, en este caso, son las vigas, cuatro en I continuas de GFRP, cada una de 800 cm de largo, 20 cm de ancho y 41 cm de profundidad. Las cuatro vigas se separaron entre sí con el uso de diafragmas de GFRP. Estos diafragmas fueron secciones cortadas de Vigas en I del mismo material. En consecuencia, los

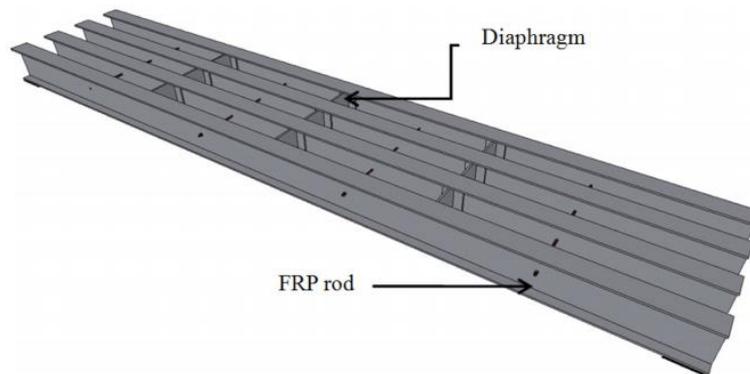
diafragmas mejorarán la distribución de una carga concentrada (véase la **Figura 29**).

Además, las varillas de GFRP ayudarían a la superestructura del puente peatonal a resistir cargas de torsión. Se utilizó para los cálculos la teoría de viga de Timoshenko y la teoría de Bernoulli en un análisis de elementos finitos (Li, 2014).

El deck está hecho de una sucesión de placas de GFRP de 150 cm de largo, 50 cm de ancho y 1.2 cm de espesor para lo cual se utilizar como tablero de puente. Están unidos química y mecánicamente a las vigas del diafragma mediante pasadores de diámetro de 6 mm con resina adhesiva (Li, 2014).

### **Figura 29**

*Composición de la super estructura del puente peatonal de Taiwán*

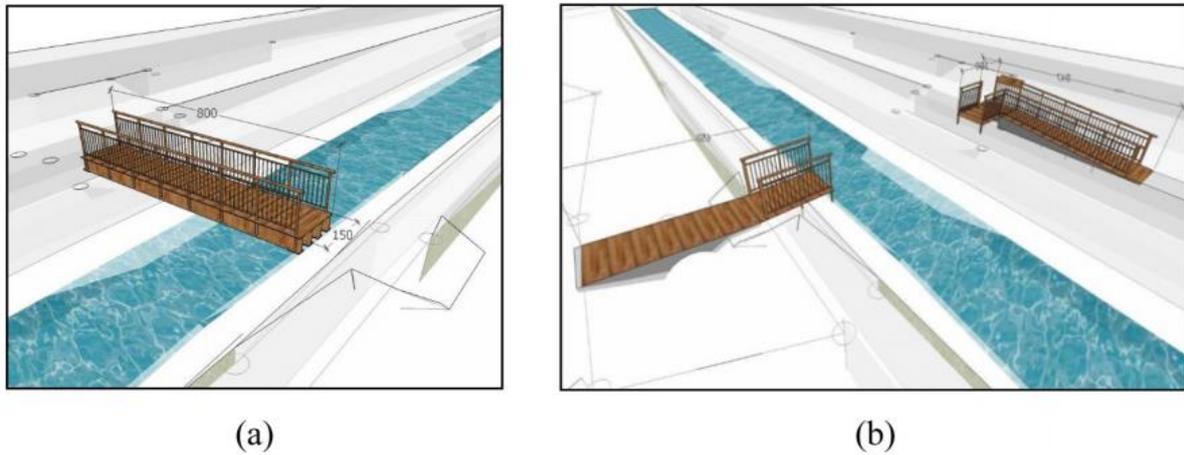


Fuente: (Li, 2014)

Un extremo del puente es una entrada de rampa de acceso en su tramo de aproximación, mientras que el otro extremo (que conduce al mar) tiene una escalera para peatones, además de una rampa para silla de ruedas mostrada en la **Figura 30** con su composición total mostrada en el **Anexo 1**

**Figura 30**

*Esquematación de la super estructura y acceso al puente de Taiwán*



Fuente: (Li, 2014)

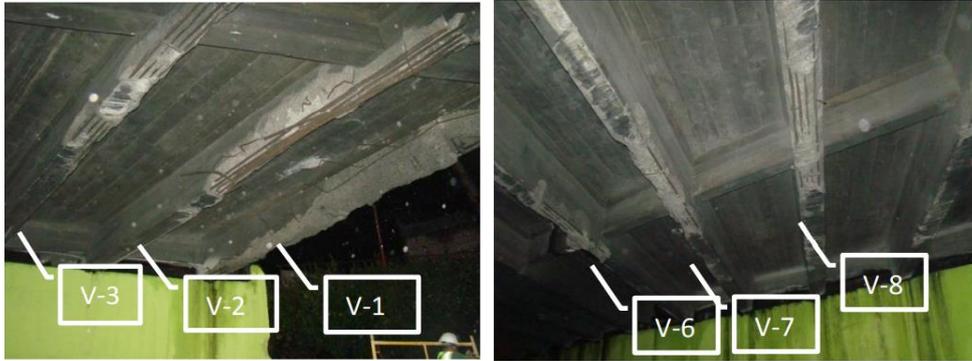
El proceso de ensamblaje de este puente se detalla en el **Anexo 2**

#### **3.7.4 Reparación del Puente La Ruedita-Guatemala.**

El puente de la Ruedita fue uno de los primeros en ser rehabilitados con CFRP en el año 2011, este presentaba fallos en 7 de las 10 vigas debido a sobrecarga en la estructura, donde se puede evidenciar la falla más significativa como: la falta de acero de refuerzo y concreto en la secciones con un desprendimiento de recubrimiento importante mostradas en la **Figura 31** (López, 2013).

**Figura 31**

*Vigas deterioradas del puente “La Ruedita-Guatemala”*



Fuente: (López, 2013)

#### **3.7.4.1 Características de diseño.**

##### **Diseño basado en el ACI.440.2R.**

Se obtuvo los distintos factores para el diseño como: resistencia a la tracción reducida por medio ambiente “ $C_{E f_{fe}}$ ”, módulo de elasticidad “ $E_f$ ” y deformación efectiva “ $\epsilon_{fd}$ ” mostradas en el **Anexo 5**.

##### **Combinación de cargas.**

Para la rehabilitación del puente se utilizó la combinación de cargas mostrada en la **Ecuación 8**, permitiendo que las secciones reforzadas con el compuesto puedan resistir sobrecargas sin colapsar, facilitando la reparación de la sección acorde a la filosofía de diseño (véase el cálculo de la combinación en el **Anexo 4**).

### Para refuerzo a tracción.

La lámina de CFRP utilizada fue la denominada “SikaCarbodur” con sección transversal de espesor 1.4 mm y un ancho de 10 cm tiene una densidad de  $1.5 \frac{g}{cm^3}$  con una resistencia a la tracción de 3100 MPa y un módulo de elasticidad de 165 GPa, datos técnicos del compuesto mostrados en el **Anexo 3** (López, 2013).

Para el diseño a flexión utilizando en esta lámina, se debe tomar en consideración la afirmación  $\phi Mn \geq Mu$  donde,  $\phi Mn$  es la resistencia nominal del elemento multiplicada por el factor de reducción que en este caso es  $\phi = 0.90$  para concreto reforzado expuesto a tracción, la comparación entre la capacidad reducida y la demanda mayorada se muestra en el **Anexo 7**. Si se hace un desglose y tomando referencia la **Ecuación 10** se debe utilizar el factor  $\Psi_f$  que reduce la capacidad del CFRP tomando un valor de 0.85 para concreto reforzado con FRP sometido a tracción mostrada en la **Tabla 7**. Estos factores se pueden visualizar de mejor manera con el cálculo mostrado en el **Anexo 6** (López, 2013).

### Para refuerzo a corte.

La lámina de CFRP utilizada fue la denominada “SikaWrap” con sección transversal de espesor 1.3 mm y un ancho de 30 cm, tiene un peso de  $225 \frac{g}{m^2}$  con una resistencia a la tracción de 3500 MPa y un módulo de elasticidad de 230000 MPa (López, 2013).

Se debe considerar la capacidad a cortante de la sección sabiéndose que  $\phi Vn \geq Vu$  y decidir por la configuración más adecuada para su reforzamiento (tipos de configuraciones mostradas en la **Figura 19**), en este caso se tomó la configuración 1,

entonces la capacidad a corte de la sección reforzada con CFRP se reduce a la siguiente ecuación (López, 2013).

$$V_f = \frac{A_{fv} * f_{fe} * d_f}{S_f} \quad (23)$$

Donde:

$V_f$ : Cortante aportado por el FRP.

$f_{fe}$ : Tensión efectiva en el FRP (Obtenida de la distribución interna de esfuerzos).

$d_f$ : Peralte efectivo de la sección.

$S_f$ : Separación entre láminas.

### 3.7.4.2 Compuestos utilizados.

Se utilizó fibras de carbono CFRP obteniéndose tiras de 8 m de largo y 10 cm de ancho haciendo un total de 3 tiras para refuerzo a flexión por viga aplicadas con resina epoxi como se muestra en el **Anexo 8 y 9** (López, 2013).

Todos los compuestos especiales para el refuerzo y reconstrucción de la viga fueron adquiridos a la empresa Sika Carbodur S 1214 Guatemala con los siguientes datos (López, 2013).

- Espesor de la tira,  $t_f$ : 1.40 mm
- Resistencia a la tracción otorgada por el fabricante  $f_{fe}'$ : 3100 MPa
- Deformación de falla  $\epsilon_{fu}'$ : 1.70%
- Módulo de elasticidad del FRP,  $E_f$ : 165 GPa

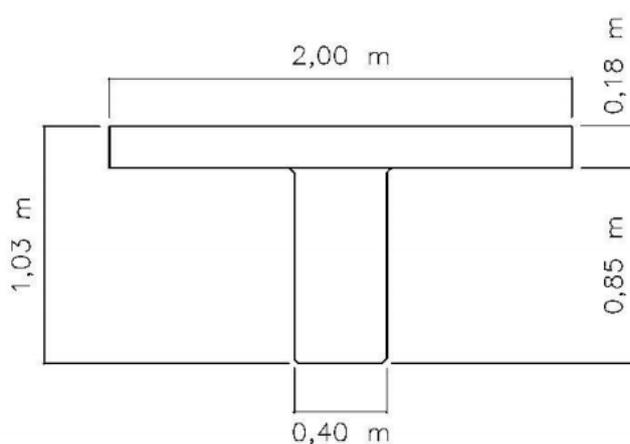
### 3.7.4.3 Secciones y forma estructural.

Para el cálculo de la cantidad de refuerzo CFRP requerido se tomará una viga de tipo T esquematizado en la **Figura 32** con los siguientes datos:

- Luz de la viga  $L$ : 20.00 m
- Ancho del patín  $b$ : 2.00 m
- Separación entre almas  $S$ : 2.00 m
- Ancho de la viga  $b_w$ : 0.40 m
- Espesor del patín  $h_f$ : 0.18 m
- Altura efectiva  $d$ : 0.98 m
- Altura total  $h$ : 1.03 m
- Área de acero utilizada  $A_s$ : 8.048 mm<sup>2</sup>
- Resistencia a la compresión del concreto  $f'_c$ : 28 MPa
- Resistencia a la tracción del acero:  $f_y$ : 420 MPa

**Figura 32**

*Esquematación de la viga del puente de Guatemala*



Fuente: (López, 2013).

## 4. CAPITULO IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### 4.1 Material compuesto FRP como alternativa de reforzamiento frente al acero.

El acero tiende de a ser un material ideal tal y como el FRP, su comportamiento esta apegado a las teorías elásticas dictaminadas por la resistencia de materiales, por lo que su estudio se hace mucho más fácil de analizar y comparar frente al FRP en todas sus variantes (vidrio, carbono, aramida), empezando por sus propiedades mecánicas, peso, tiempo de vida útil, diseño, proceso constructivo.

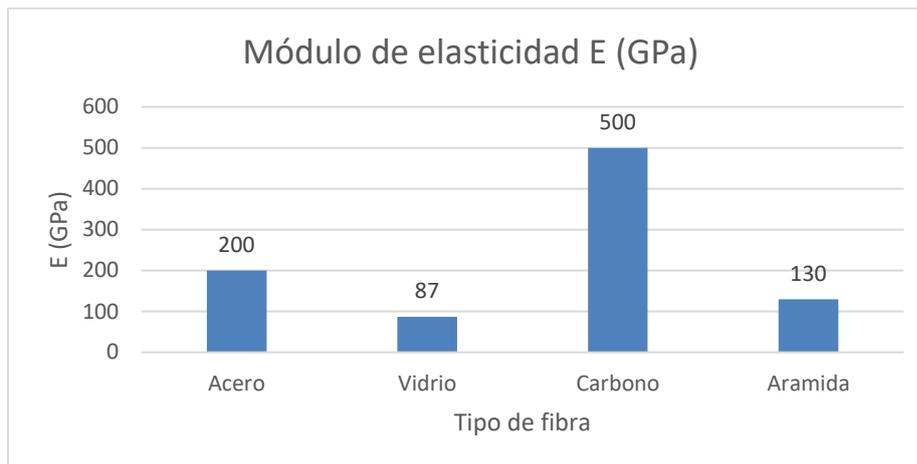
#### 4.1.1 *Propiedades mecánicas frente al acero.*

##### 4.1.1.1 **Módulo de elasticidad.**

El acero normal utilizado en la mayor parte de obras civiles tiene un módulo de elasticidad  $E_s = 200 \text{ GPa}$  (ACI-318-08), valor que será tomado como referencia para un análisis comparativo de cada una de las fibras y sus valores máximos obtenidas de la **Tabla 3**. Donde se puede evidenciar que la fibra de carbono es el valor más elevado, superando al acero en un 60% véase la **Figura 33**.

### Figura 33

*Diferencias entre valores de módulo de elasticidad de los materiales compuestos frente al acero.*



Fuente: Elaboración Propia y valores tomados de (Fonseca, 2008)

La fibra de carbono (CFRP), al tener el módulo de elasticidad más alto significa que la naturaleza del material implica un alto grado de resistencia a la tracción o una baja capacidad de deformación, otorgando una rigidez importante a la estructura. Se podría realizar diseños de puentes peatonales con los otros tipos de fibras, de hecho, existen varios puentes construidos en fibra de vidrio con perfiles pultruidos, pero se necesitan cálculos más profundos y consideraciones de diseño para perfiles como: inercias, radio de giro, conexiones, etc donde se abarque todas las posibles fallas ya sea por vibraciones, medio ambiente o cualquier factor externo durante la vida útil. Para este caso el diseño por láminas de fibra de carbono en concreto se hace mucho más viable para el diseño de puentes peatonales en Latinoamérica, donde los cálculos de diseño según el ACI son similares a los elementos de concreto reforzado con acero y se puede utilizar el principio de compatibilidad de esfuerzos y deformaciones con los factores de carga asociados al FRP.

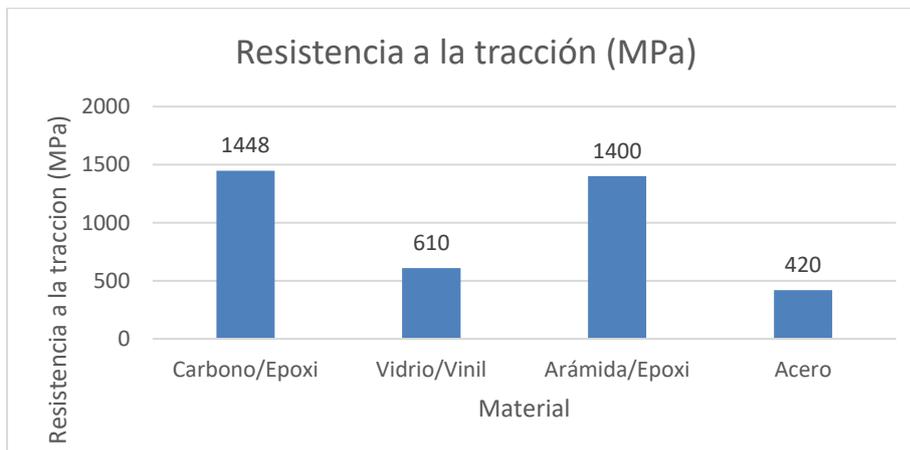
#### 4.1.1.2 Resistencia a la tracción.

La resistencia a la tracción del compuesto FRP depende de la resina y el compuesto utilizado ya que, al ser combinados, ambos aportan resistencia y rigidez al compuesto. Si se habla de carbono con resina epoxi, es más alta su resistencia a la tracción, cuando sus fibras están a nivel longitudinal o tienen un ángulo  $0^\circ$  se han tomado los valores de la **Tabla 5**, la variación de este ángulo depende si se quiere aumentar la resistencia transversal del compuesto y si el elemento requiere mayor capacidad de carga a nivel axial.

Se puede comparar el acero común, utilizado para el reforzamiento en concreto, una resistencia a la tracción de  $f_y = 420 \text{ MPa}$  y comprobar que el CFRP tiene de 3.45 veces mayor resistencia mostrado en la **Figura 34**.

**Figura 34**

*Resistencia a la tracción de los compuestos frente al acero*



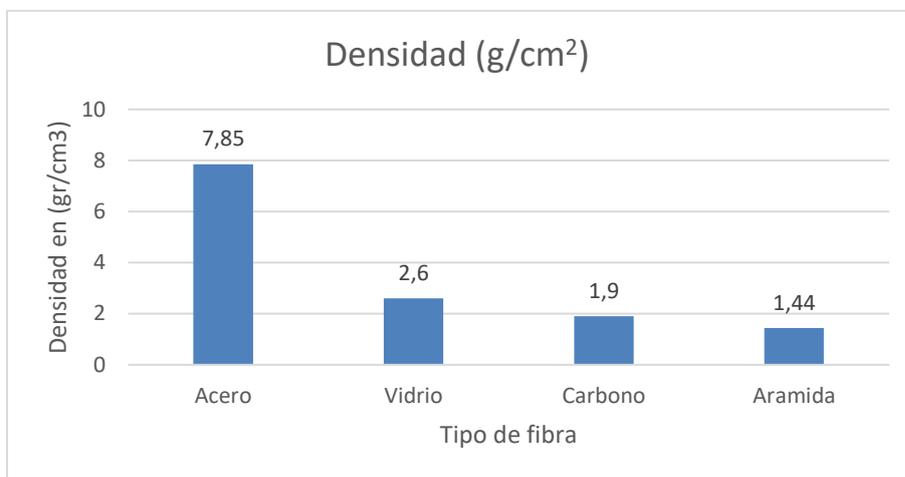
Fuente: Elaboración propia y valores tomados de (Mori, 2008)

#### 4.1.1.3 Densidad.

Una de las afirmaciones establecidas por los autores en la sección 2.2.4 es: su eficiencia estructural con relación a su peso, por ende, el análisis de densidad comprobará esta afirmación, donde se compara cada una de las fibras con el acero (véase la **Figura 35**).

**Figura 35**

*Densidad de los compuestos y el acero*



Fuente: Elaboración propia y valores tomados de (Fonseca, 2008)

Efectivamente la fibra de carbono es 4.13 veces más ligera que el acero y como lo mencionado anteriormente más eficiente en cuanto a sus propiedades mecánicas.

#### 4.1.1.4 Tiempo de vida útil.

Las estructuras de acero y de FRP estiman un tiempo de vida útil de 50 años desde su interacción bajo cargas de servicio, todo depende del mantenimiento otorgado. Para cumplir este periodo, por ejemplo: en estructuras de concreto reforzado con acero, se debe procurar cada 10 años realizar limpieza e inspección de vigas y columnas donde se controlan grietas, recubrimiento y humedad.

El FRP tiene una particularidad que trae una ventaja significativa en comparación al acero y es su alta resistencia a la corrosión, pero es sensible al momento de su ensamblaje insitu; se debe considerar mucho la resina de aplicación, en su mayoría se utilizan resinas epoxi debido a su favorable transmisión y capacidad de interactuar el elemento con la lámina CFRP y las condiciones ambientales deben ser favorables para su adherencia procurando mitigar exposiciones directas con el sol.

#### 4.2 Diseño de elementos estructurales.

El diseño según el ACI.440-2R establece factores de seguridad que tienen la intención de menorar la resistencia para hacer más conservativo los efectos y el desconocimiento que aún se tiene del material, por ejemplo, el factor por medio ambiente “ $C_E$ ”; adopta desde un inicio una postura de reducción en la resistencia a la tracción del material otorgada por el fabricante “ $f_{fe}$ ”, afectando directamente al módulo de elasticidad “ $E_f$ ” y deformación efectiva “ $\epsilon_{fd}$ ”. Estos parámetros son fundamentales al momento de realizar el análisis de compatibilidad de esfuerzos y deformaciones donde, al ser modificados afectan a la capacidad del material.

Existe otro factor de reducción de resistencia “ $\psi_f$ ” (véase la **Tabla 7**) para FRP similar al factor “ $\phi$ ” utilizado para elementos de concreto reforzado con acero, donde se analiza principalmente los efectos que tiene el elemento sometido a distintos estados de carga como: flexión, corte y torsión. En elementos reforzados con FRP, la flexión toma un valor de 0.85 inferior al 0.90 para estructuras tradicionales reduciéndolo un 5% debido al desconocimiento que se tiene acerca del comportamiento del material ante este estado de carga.

No se encontró el factor relacionado a la compresión en el ACI.440-2R por lo que se asume que no existe estudio alguno del comportamiento del material ante este estado de carga.

Para el diseño por flexión se puede despejar la **Ecuación 11** luego de haber realizado el equilibrio interno de esfuerzos y deformaciones, se puede obtener el área de la lámina que se necesita en el elemento estructural, tomando en cuenta los factores de seguridad antes mencionados de la siguiente manera.

$$A_f = \frac{Mu}{\phi * \psi_f * f_{fe} * \left( df - \frac{\beta_1 * c}{2} \right)} \quad (24)$$

El diseño a corte con FRP tiene una ventaja particular ya que se puede ubicar las láminas de forma inclinada, para prevenir fisuras y apegándose a la realidad del comportamiento del cortante en el elemento donde, para su diseño se debe considerar factores como, el ancho, el espesor y la separación de las láminas.

Para el análisis de cargas se deben correlacionar las guías de diseño propuestas por “Puentes con AASHTO-LRFD” para el análisis de cargas de viento y combinaciones para cargas actuantes y el “AASHTO-Guide Specifications For Design of FRP Pedestrian Bridges” para cargas peatonales, vehiculares emergentes, control de vibraciones y deflexiones.

### 4.3 Puentes peatonales existentes.

Existen muchos puentes peatonales muy complejos construidos a base de FRP, de los cuales se ha tomado como referencia los siguientes: Dawlish Station Footbridge – Reino

Unido, SkyPath Pedestrian Bridge – Nueva Zelanda, Tainan-Taiwan, Puente Peatonal y la reparación del Puente La Ruedita-Guatemala.

Cuando se trata de puentes peatonales construidos desde cero, los países en donde el conocimiento del material es mucho más extenso, optan por la fabricación de perfiles poltruidos en fibra de vidrio GFRP, donde se utilizan códigos tanto locales como internacionales (véase la **Tabla 12**). Al ser puentes peatonales, no se requiere de mucha carga viva para su puesta en servicio; esto no sucede en Latinoamérica ya que el material es relativamente nuevo y en su mayor parte se lo utiliza para rehabilitaciones estructurales de puentes o edificios a través de láminas de fibra de carbono CFRP. Información acerca de las características más relevantes de exitosos puentes construidos alrededor del mundo, marca una tendencia y una guía acerca de lo que se puede utilizar para simular un adecuado comportamiento al momento de realizarse un diseño.

**Tabla 12**

*Características de diseño de referentes de puentes peatonales en el mundo*

<b>Puente</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Material -Tipo</b>	<b>Norma utilizada</b>	<b>Luz (m)</b>	<b>Carga viva (kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Deflexión</b>
Dawlish Station Footbridge	Reino Unido	GFRP-Perfiles	Eurocode 1 y TD19	17.5	509.86	3 Hz	L/250
SkyPath Pedestrian Bridge	Nueva Zelanda	GFRP-Perfiles y CFRP	Eurocode 1 e Internacional Building Code	13.7	509.86	8.6 Hz	L/300
Tainan	Taiwán	GFRP-Perfiles	AASHTO FRP-Pedestrian Bridges	8	415	5 Hz	L/500
Puente La Ruedita	Guatemala	CFRP-Láminas	AASHTO FRP-Pedestrian Bridges	20	415	5 Hz	L/400

Fuente: Elaboración propia

Para la construcción de puentes peatonales con FRP ya sea en perfiles o en láminas, estos deben regirse a las mismas consideraciones de carga, deflexión y vibración establecida por códigos internacionales o locales de diseño. Se muestran distintas luces, las cuales presentan similitud y se asume que se puede concebir puentes peatonales reforzados con FRP de hasta de 15 a 20 metros como máximo.

En el análisis de carga, los códigos no presentan muchas diferencia en cuanto a demanda para el diseño de puentes peatonales, pero el diseñador puede realizar un cálculo más exhaustivo de la carga viva mediante el análisis estructural mostrado en la **sección 3.4.2**.

Se puede observar que la deflexión y la frecuencia fundamental de vibración depende de la zona en la cual el puente está ubicado. Reino Unido es el único país que tiene una baja probabilidad de ocurrencia sísmica, por lo tanto, se utiliza una frecuencia fundamental básica de 3hz para personas que caminan o corren sobre el puente, la deflexión en este puente se toma en cuenta solamente efectos de cargas gravitatorias y de viento por lo que adopta un valor de  $L/250$  (Eurocode, 2017). Los puentes restantes superan lo establecido por el “AASHTO FRP-Pedestrian Bridges Specification” en cuanto a vibración ya que se toma una frecuencia fundamental mínima de 5 Hz y una deflexión mínima de  $L/400$  para zonas sísmicas ya que se prevé movimientos laterales debido a la alta probabilidad de ocurrencia de este fenómeno. (AASHTO, 2008).

## 5. CONCLUSIONES.

Los códigos e investigaciones hacen mención a tres tipos de FRP, vidrio (GFRP), aramida (AFRP) y carbono (CFRP) para reforzamiento estructural, cada uno con propiedades mecánicas diferentes de acuerdo con el tipo de material (mostrado en la **Tabla 3**), donde, para el diseño de elementos estructurales en Latinoamérica se utiliza CFRP por su eficiencia en cuanto resistencia-peso se refiere, donde, mediante datos mostrados en la **sección 4.1.1** se lo pudo comprobar. Las propiedades más influyentes son: la resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, deformación unitaria y relación de Poisson; parámetros otorgados por los catálogos del fabricante (Sika en Latinoamérica **véase el Anexo 3**) y que serán utilizados para el diseño de elementos estructurales en concreto reforzados con fibras FRP basado en la norma americana ACI.440-2R.

Los materiales compuestos poseen características anticorrosivas lo que resulta en un menor índice patológico en el material, por lo tanto, tienen una vida útil de alrededor de 50 años sin mantenimiento, siempre y cuando se tome en cuenta su vulnerabilidad ante los rayos UV, protegiendo el compuesto con resinas antes, durante y después de su ensamblaje.

La desventaja más significativa es: el encarecimiento de cualquier tipo de obra ya que, al no existir un conocimiento profundo del material, este debe ser ensamblado con mano de obra calificada, conjunto a los altos costos de fabricación o importación de la fibra de carbono.

Para el diseño de los elementos estructurales en puentes peatonales ya sea para construcción o rehabilitación, deben ser consideradas las hipótesis y consideraciones previas mostradas en la **sección 3.5.7.1** para flexión y **3.5.8.1** para cortante, que si bien, tienen parámetros propios para el FRP como factores de reducción de resistencia; entre ellos el

coeficiente ambiental “ $CE$ ” y el factor por estado de carga “ $\Psi_f$ ”; evidencian una similitud al diseño de concreto reforzado con acero, utilizando principios de compatibilidad de esfuerzos y deformaciones mediante el equilibrio interno, donde a diferencia del acero, se toman en cuenta las deformaciones “ $\varepsilon_{fd}$ ”, módulo de elasticidad “ $E_f$ ” y resistencia a la tracción “ $f_{fe}$ ” del FRP, pudiéndose calcular el área requerida de lámina FRP para soportar la demanda mayorada obtenida de la “AASHTO FRP Pedestrian Bridge Specification”.

El auge del FRP se encuentra en Europa donde se han desarrollado puentes peatonales con perfiles poltruidos en fibra de vidrio (GFRP) en elementos principales como vigas, diafragmas y tableros de la super estructura; lo que significa una sostenibilidad importante ya que el vidrio es más fácil de encontrar, potenciando el cuidado medioambiental. En Latinoamérica el FRP ha sido utilizado principalmente para reforzamiento de estructuras en deterioro (edificios y puentes), utilizando láminas de fibra de carbono (CFRP) para flexión y cortante principalmente.

Los puentes peatonales “Dawlish Station Footbridge-Reino Unido” y “La Ruedita-Guatemala” presentan longitudes máximas de 17.5 y 20 metros respectivamente, lo que demuestra que, para el diseño de este tipo de obras, los puentes requeridos no sobrepasarán los 15 o 20 metros de longitud.

El CFRP es el compuesto más eficiente en cuanto a resistencia con relación a su peso, debido a que ofrece de 3 a 4 veces más resistencia a la tracción que el acero siendo 4 veces más ligero. Esta es la ventaja más significativa ya que promueve la elaboración de estructuras con secciones más pequeñas facilitando el transporte y proceso constructivo. Al tener una resistencia tracción y una capacidad de deformación altas, se considera adecuada para el refuerzo positivo en elementos simplemente apoyados como los puentes peatonales.

## 6. RECOMENDACIONES.

No existe abundante información acerca del diseño de estructuras en FRP con perfiles poltruidos; cada puente peatonal elaborado bajo este concepto fue estudiado, calculado y modelado rigurosamente por empresas dedicadas a la innovación en construcción.

En esta investigación no se encontró información clara acerca del reforzamiento de elementos sometidos a compresión como columnas, pilas o pilotes ni un factor de reducción asociado " $\Psi_f$ ", por lo que se recomienda, utilizar este documento como base para un posterior estudio y análisis de la compresión utilizando este tipo de reforzamiento.

Para todos los diseños, se deben consultar las características de diseño como propiedades mecánicas y área de refuerzo en los catálogos del fabricante, donde "Sika" es el mayor referente para láminas de CFRP en Latinoamérica.

Trabajar con las unidades del sistema internacional para las ecuaciones propuestas por el ACI.440-2R ya que no existen ecuaciones adaptadas al sistema CGS o MKS.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- AASHTO. (2008). *Appendix B — Proposed Guide Specifications for the Design of FRP Pedestrian Bridges Guide Specifications For Design of FRP Pedestrian Bridges*. 55, 51–64.
- Alampalli, S., O’Connor, J., & Yannotti, A. P. (2000). Design, fabrication, construction, and testing of an FRP superstructure. *Report*.  
<http://www.nysdot.gov/portal/page/portal/divisions/engineering/technical-services/trans-r-and-d-repository/sr134.pdf>
- Alzate, A. (2012). *Análisis de los modelos de comportamiento en vigas de hormigón armado reforzadas a cortante con polímeros armados con fibras (FRP), Validación y calibración experimental*.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2008). *Guide Specifications for Design of FRP PEDSTRIAN BRIDGE*.
- BFG Arquitectura. (2017). *Sostenibilidad y compuestos*.  
<http://www.bfgarchitecture.com/pt/sustainability-and-composites>
- Brothers, E. (1998). *Introduction to composite materials design*.
- Calderón, L., & Donoso, D. (2017a). *MEJORAMIENTO DE LAS CONDICIONES ESTRUCTURALES EN EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO APLICANDO TECNOLOGÍA FRP (FIBER REINFORCED POLYMER)*.
- Calderón, L., & Donoso, D. (2017b). *Mejoramiento de las condiciones estructurales en edificios de hormigón armado aplicando tecnología FRP (FIBER REINFORCED POLYMER)*.
- Collins, E. (2020). *Diseño estructural IV/Clase 23 Abeil*. <https://youtu.be/j4IUK5EjjE>
- Curell, B. (2014). *Repair of bridges using Fiber Reinforcement Polymers ( FRP )*. 1–73.
- Curreri, J. (2016). *Reforzamiento de miembros de concreto armado con fibra (FRP)*.  
<https://youtu.be/qnCUyOV6DFE>
- Diego Villalón, a, Gutiérrez Jiménez, J. P., Arteaga Iriarte, a, & López Hombrados, C.

- (2008). Utilización de materiales compuestos en la construcción de nuevos puentes. *II Jornadas de Investigación En Construcción*, 1583–1592.  
<http://digital.csic.es/handle/10261/6313>
- Fib. (2017). Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. In *International Federation for Structural Concrete (fib)* (Vol. 14).  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Externally+bonded+FRP+reinforcement+for+RC+structures#0>
- Fiberline. (2003). *Fiber line design Manual*. [www.fiberline.com](http://www.fiberline.com)
- Fonseca, C. (2008). Fiber Reinforced Polymer Composite Material used in Civil Engineering. *Technical Report*.
- Franco Mejía, E. F. (2008). *Diseño de pasarelas de emergencia conformadas por perfiles FRP*.
- Frp, F. (2007). *Estructuras De Hormigón Mediante Polímeros Reforzados Con. October 2014*, 8–11.
- Fuentes, M. (2018). *Composite y Sostenibilidad*. <https://bit.ly/3dIIKLx>
- GUZMÁN, P. M. (2015). *Comportamiento De Elementos De Hormigón Armado Reforzados Con Fibras*. 181. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/4500/1/T-UCE-0011-72.pdf>
- Ian, S. (2008). *Dawlish Station Footbridge*. <https://cutt.ly/PvAS3kU>
- IngenierosAsesores. (2020). *Mantenimiento y durabilidad de las estructuras según su tipo*. <https://ingenierosasesores.com/actualidad/mantenimiento-y-durabilidad-de-las-estructuras/>
- Knippers, J., & Gabler, M. (2006). *New Design Concepts for Advanced Composite Bridges – The Friedberg Bridge in Germany. July*, 16–23.  
<https://doi.org/10.2749/222137806796185012>
- L. Hitex Insulation Co. (2008). *Texturized Glass Fiber Cloth*. [www.glassfiber-fabric.cn/Texturized\\_Glass\\_Fiber\\_Cloth-6305.htm](http://www.glassfiber-fabric.cn/Texturized_Glass_Fiber_Cloth-6305.htm)

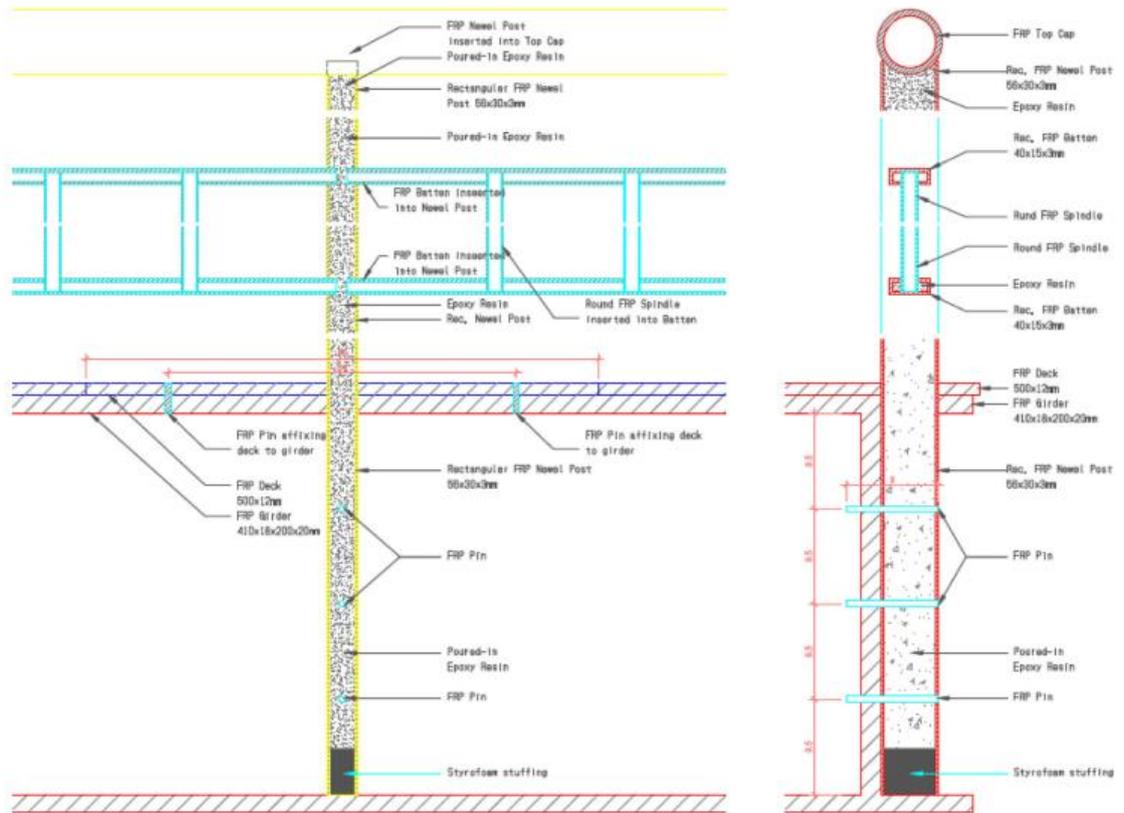
- Li, Y. F. (2014). Case study of first all-GFRP pedestrian bridge in Taiwan. *Case Studies in Construction Materials*, 1, 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2014.05.001>
- López, C. H. I. (2013). DISEÑO DEL REFORZAMIENTO PARA LA REPARACIÓN O AUMENTO DE CAPACIDAD DE CARGA DE VIGAS PARA PUENTES DE CONCRETO REFORZADO UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO. *Universidad de San Carlos de Guatemala*, 53(9), 1689–1699.  
/citations?view\_op=view\_citation&continue=/scholar%3Fhl%3Dpt-BR%26as\_sdt%3D0,5%26scilib%3D1&citilm=1&citation\_for\_view=wS0xi2wAAAAJ:2osOgNQ5qMEC&hl=pt-BR&oi=p
- LORENZIS, T. J. . (2007). *Near-Surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures.*
- Loría Salazaz, L. G., Arroyo Acosta, A. M., Bolaños Barrantes, M., & Castillo, R. (2010). Uso de polímeros reforzados con fibras (FRP) como refuerzo externo de elementos de concreto de puentes en Costa Rica. *Programa de Ingeniería En Infraestructura Del Transporte (PITRA)*. [http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/boletines/boletin\\_semanal\\_pitra\\_06\\_puentes.pdf](http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/boletines/boletin_semanal_pitra_06_puentes.pdf)
- MacDanial, G. and C. K. (2004). *Fiber Reinforced Polymer (FRP)*. <https://www.concrete.org/>
- MAPEI. (2015). *Sistemas compuestos de polímero reforzado con fibra (FRP)*.
- Mori, J. (2008). *Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos al diseño de estructuras de contención de tierras y su interacción con el terreno, para su empleo en obras de infraestructura viaria.*
- NEC. (2015). Riesgo Sísmico, Evaluación, Rehabilitación de Estructuras. In *Dirección de Comunicación Social, MIDUVI*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/02/NEC-SE-RE-Riesgo-sísmico.pdf>
- Neetesuela. (2013). *Materiales compuestos de matriz polimérica*.  
<https://neetesuela.org/materiales-compuestos-de-matriz-polimerica/>
- Pecce, M. (2001). Structural behaviour of FRP profiles. *Composites in Construction: A Reality*, 40596(December 2001), 241–249. [https://doi.org/10.1061/40596\(264\)26](https://doi.org/10.1061/40596(264)26)

- Plaresma. (2016). *Características y aplicaciones de fibra de vidrio*.  
<https://www.plaremesa.net/fibra-de-vidrio-precio-usos-caracteristicas-y-aplicaciones/#:~:text=Por ejemplo%2C se usa para,en conjunción con plásticos termoestables%2C>
- Rajak, D. K., Pagar, D. D., Menezes, P. L., & Linul, E. (2019). Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications. *Polymers*, *11*(10).  
<https://doi.org/10.3390/polym11101667>
- Rendón, J. (2015). *Reforzamiento de Estructuras con Materiales Compuestos FRP “Sika Colombia.”*
- Rodriguez, A. (2014). *PUENTES CON AASHTO-LRFD 2014 (7th Edition) [MSc. Ing. Arturo Rodríguez Serquén] .pdf* (p. 342).
- Sika. (2018). *Sika ® CarboDur ® S*.
- Sika. (2020). *Sika ® CarboDur ® E*. 1–4.
- Soudki, K., & Alkhrdaji, T. (2005). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-02). In *Proceedings of the Structures Congress and Exposition*.  
[https://doi.org/10.1061/40753\(171\)159](https://doi.org/10.1061/40753(171)159)
- Tecno Peg. (2019). *Fibras de Aramida*. <https://www.tecnopeg.com/fibras-de-aramida/#:~:text=Las fibras de aramida son,y como sustituto del amianto.>
- Union, T. E. (2011). *Eurocode 1. 1*(2005).
- Zealand, N. (2014). *SkyPath, Auckland Harbour Bridge, New Zealand*.

8. ANEXOS.

Anexo 1

Estructura completa puente Tainan-Taiwan



Fuente: (Li, 2014)

## **Anexo 2**

### *Proceso de ensamblaje del puente de Taiwán.*

La construcción comenzó después de que las diferentes secciones de los miembros poltruidos de GFRP fueran entregados al sitio desde la fábrica más cercana. Después de que los miembros llegaron, se confirmó sus números y se realizó una verificación visual para asegurar que los miembros no sufrieran daños durante el transporte. A continuación, se presenta los pasos de ensamblaje de este puente.

- Los miembros de GFRP se cortaron en formas y tamaños deseados véase el **Anexo 2a**
- Se aplicó una imprimación en cada uno de los miembros o en las partes que se van a conectar véase el **Anexo 2b** y **Anexo 2c**.
- Se puso un revestimiento preparatorio que mejora la adhesión de la resina epoxi con los miembros GFRP véase el **Anexo 2d**.
- Se perforó en el patín de los diafragmas y en los puntos de conexión en el alma de las vigas véase el **Anexo 2e**.
- Los orificios perforados se recubrieron con adhesivo de resina epoxi de alta resistencia
- Se ensambla la super estructura fijando el deck de GFRP con resina epoxi véase el **Anexo 2f** y **2g**.
- Se cortaron los componentes de elementos menores como pasamanos, barandas y los terminados de la estructura para posteriormente ser ensamblados véase el **Anexo 2h** y **2i**

- Las superficies fueron aplicadas pintura resistente al medio ambiente y a los rayos UV véase el **Anexo 2j**
- Se realizo una superficie antideslizante aplicando una capa de resina epoxi de alta resistencia véase el **Anexo 2k**
- Se utilizó una pequeña grúa para instalar la super estructura completa en el estribo véase el **Anexo 2l**



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)



(k)



(l)

Fuente: (Li, 2014)

### Anexo 3

#### Información técnica obtenida para la lámina “SikaCarbodur S1214”

Dimensiones	Platina Sika CarboDur Tipo S kg/cm <sup>2</sup>		Módulo E>1'650.000	
	Tipo	Ancho mm.	Espesor mm.	Sección transversal area mm <sup>2</sup>
	S512	50	1.2	60
	S612	60	1.2	72
	S812	80	1.2	96
	S1012	100	1.2	120
	S1212	120	1.2	144
	S1512	150	1.2	180
	S614	60	1.4	84
	S914	90	1.4	126
	S1214	120	1.4	168
	Platina Sika CarboDur Tipo M kg/cm <sup>2</sup>		Módulo E>2'100.000	
	Tipo	Ancho mm.	Espesor mm.	Sección transversal area mm <sup>2</sup>
	M514	50	1.4	70
	M614	60	1.4	84
	M914	90	1.4	126
	M1014	100	1.4	140
	M1214	120	1.4	168
	Platina Sika CarboDur Tipo UH kg/cm <sup>2</sup>		Módulo E>4'000.000	
	Tipo	Ancho mm.	Espesor mm.	Sección transversal area mm <sup>2</sup>
	UH514	50	1.4	70
	Platina Sika CarboDur Tipo XS kg/cm <sup>2</sup>		Módulo E>1'650.000	
	Tipo	Ancho mm.	Espesor mm.	Sección transversal area mm <sup>2</sup>
	XS514	50	1.4	70
	XS1014	100	1.4	140
	XS1214	120	1.4	168
	XS1514	150	1.4	210
Contenido de fibra en Volumen	> 70% *			
<b>INFORMACION TECNICA</b>				
Resistencia a tracción del Laminado	TIPO XS	TIPO S	TIPO M	TIPO UH
	Resistencia a la tracción* kg/cm <sup>2</sup> >22.000	>28.000	>28.000	>180. 00
Módulo de Elasticidad a Tracción del Laminado	128.000 kg/cm <sup>2</sup>			
Reacción al Fuego	Las platinas Sika® CarboDur® S pueden ser protegidas frente al fuego si fuera necesario con un material resistente al fuego (Sikacrete 213F). Cuando el Sikadur-30 haya curado se debe comprobar si han quedado huecos mediante golpes con un martillo o con impulsos termográficos.			
Resistencia Térmica	>150°C			

Fuente: (Sika, 2018)

## Anexo 4

### Datos necesarios para el reforzamiento del puente la Ruedita-Guatemala

Reparación de una viga del puente "La Ruedita-Guatemala" con reforzamiento de lamina CFRP			
	Internacional	CGS	MKS
Demanda ACI.440.2R			
Carga muerta	$S_{DL} := 18.98 \frac{N}{mm}$	$S_{DL} = 1300.543 \frac{lb_f}{ft}$	$S_{DL} = 1.935 \frac{tonnef}{m}$
Carga viva	$S_{LL} := 11.01 \frac{N}{mm}$	$S_{LL} = 754.425 \frac{lb_f}{ft}$	$S_{LL} = 1.123 \frac{tonnef}{m}$
Condición resistencia nominal	$\phi R_n \geq 1.15 S_{DL} + 0.75 S_{LL}$		
Resistencia ultima	$R_u := 1.1 S_{DL} + 0.75 S_{LL}$	$R_u = 2.971 \frac{tonnef}{m}$	
<b>Datos de la viga</b>			
Longitud total	$L := 20 \text{ m}$	$L = 65.617 \text{ ft}$	$L = 20 \text{ m}$
Ancho del patín	$b = 2 \text{ m}$	$b = 6.562 \text{ ft}$	$b = 2 \text{ m}$
Separación entre almas	$S = 2 \text{ m}$	$S = 6.562 \text{ ft}$	$S = 2 \text{ m}$
Ancho de la viga	$bw = 0.40 \text{ m}$	$bw = 15.748 \text{ in}$	$bw = 40 \text{ cm}$
Espesor del patín	$h_f = 0.18 \text{ m}$	$h_f = 7.087 \text{ in}$	$h_f = 18 \text{ cm}$
Peralte efectivo	$d = 98 \text{ cm}$	$d = 3.215 \text{ ft}$	$d = 98 \text{ cm}$
Altura total	$h = 1.03 \text{ m}$	$h = 1.03 \text{ m}$	$h = 1.03 \text{ m}$
Resistencia a comp concreto	$f'_c = 28 \text{ MPa}$	$f'_c = 4061.057 \text{ psi}$	$f'_c = 285.521 \frac{kgf}{cm^2}$
Resistencia a tracc acero	$f_y = 420 \text{ MPa}$	$f_y = 60915.85 \text{ psi}$	$f_y = 4282.808 \frac{kgf}{cm^2}$
Resistencia ultima sin CFRP	$\phi Mn' = 2813.70 \text{ kN} \cdot \text{m}$	$\phi Mn' = 2075278.619 \text{ lb}_f \cdot \text{ft}$	$\phi Mn' = 286.918 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$
Modulo de elasticidad del acero	$E_s = 200 \text{ GPa}$	$E_s = 29007547.546 \text{ psi}$	$E_s = 2039432.426 \frac{kgf}{cm^2}$
Area de acero utilizada	$A_s = 8048 \text{ mm}^2$	$A_s = 12.474 \text{ in}^2$	$A_s = 80.48 \text{ cm}^2$
<b>Datos de la fibra utilizada "SikaCarbodur S 1214"</b>			
Espesor por tira,	$t_f = 1.40 \text{ mm}$	$t_f = 0.055 \text{ in}$	$t_f = 0.14 \text{ cm}$
Resistencia a tensión "Catalogo Sika"	$f'_{fc} = 3100 \text{ MPa}$	$f'_{fc} = 449616.987 \text{ psi}$	$f'_{fc} = 31611.203 \frac{kgf}{cm^2}$
Deformación de falla "Catalogo Sika"	$\epsilon'_{fu} = 1.70\%$	$\epsilon'_{fu} = 0.017$	$\epsilon'_{fu} = 0.017$
Modulo de elasticidad del FRP	$E_f = 165000 \text{ MPa}$	$E_f = 23931226.725 \text{ psi}$	$E_f = 1682531.751 \frac{kgf}{cm^2}$
Numero de capas	$n = 1$		
Ancho de la capa de refuerzo	$w_f = 360 \text{ mm}$		

Fuente: Elaboración propia con datos tomados de (López, 2013)

## Anexo 5

### Cálculo de valores para el equilibrio interno de las vigas del puente la Ruedita-Guatemala

Disminución de la resistencia a tracción por el factor "CE"			
Exterior: puentes, muelles y estacionamientos abiertos	$CE = 0.85$		
Resistencia última a tensión	$f_{fc} = f'_c \cdot CE$		
	$f_{fc} = 2635 \text{ MPa}$		
Deformación de última	$\epsilon_{fu} = \epsilon'_{fu} \cdot CE$		
	$\epsilon_{fu} = 0.014$		
Modulo de elasticidad concreto	$E_c = 4730 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot (MPa)$		
	$E_c = 25028.807 \text{ MPa}$	$E_c = 3630121.604 \text{ psi}$	$E_c = 253222.807 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Cálculo de la capacidad del elemento al ser reforzado con CFRP			
Factor que relaciona la profundidad de bloque rectangular equivalente de esfuerzos de compresión con la profundidad del eje neutro según AASHTO 2002	$\beta_1 = 1.05 - 0.05 \cdot \frac{f'_c}{6.9 \text{ MPa}}$		
	$\beta_1 = 0.85$	$\beta_1 = 0.85$	
Área del refuerzo CFRP	$A_f = n \cdot t_f \cdot w_f$		
	$A_f = 504 \text{ mm}^2$	$A_f = 0.781 \text{ in}^2$	$A_f = 5.04 \text{ cm}^2$
Control de deformación de diseño por pérdida de adherencia	$\epsilon_{fd} = 0.41 \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}}$		
	$\epsilon_{fd} = 0.0045$	$0.9 \cdot \epsilon_{fu} = 0.013$	
Estado.Adherencia := if $\epsilon_{fd} \leq 0.9 \cdot \epsilon_{fu}$	<div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>“Cumple”</p> <p>else</p> <p>“No cumple”</p> </div>		
Estado.Adherencia = “Cumple”			
Cálculo de C "Utilizar métodos iterativos para buscar el equilibrio"	$c = 158.51 \text{ mm}$	$c = 6.241 \text{ in}$	$c = 15.851 \text{ cm}$
	$d_f = h$		
Deformación efectiva	$\epsilon'_{fc} = 0.003 \cdot \left( \frac{d_f - c}{c} \right)$		
	$\epsilon'_{fc} = 0.0165$		

Sección de concreto reforzado | Distribución de deformaciones axiales | Caso beta1 no igual a beta2 | Reducción de fuerza

Fuente: Fuente: Elaboración propia con datos tomados de (López, 2013)

## Anexo 6

### Cálculo de la capacidad reducida puente la Ruedita-Guatemala

	$\varepsilon_{fc} := \begin{cases} \varepsilon'_{fc} & \text{if } \varepsilon'_{fc} \leq \varepsilon_{fd} \\ \varepsilon'_{fc} & \\ \text{else} & \\ \varepsilon_{fd} & \end{cases}$		
	$\varepsilon_{fc} = 0.0045$		
Calculo del acero de refuerzo existente	$\varepsilon_s := \varepsilon_{fc} \cdot \left( \frac{d-c}{d_f-c} \right)$		
	$\varepsilon_s = 0.0042$		
Esfuerzo en el acero de refuerzo	$f'_s := E_s \cdot \varepsilon_s$		
	$f'_s = 848.364 \text{ MPa}$	$f_y = 420 \text{ MPa}$	$f_y = 4282.808 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
	$f_s := \begin{cases} f'_s & \text{if } f'_s \leq f_y \\ f'_s & \\ \text{else} & \\ f_y & \end{cases}$	$f_s = 420 \text{ MPa}$	$f_s = 4282.808 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Esfuerzo en CFRP	$f_{fc} := E_f \cdot \varepsilon_{fc}$		
		$f_{fc} = 742.5 \text{ MPa}$	$f_{fc} = 7571.393 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$
Area <u>requerida</u> de CFRP			
Elementos sometidos a flexion concreto	$\phi = 0.90$		
Elementos sometidos a flexion CFRP	$\Psi_f = 0.85$		
Resistencia nominal del CFRP	$M_n := A_s \cdot f_s \cdot \left( d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \Psi_f \cdot A_f \cdot f_{fc} \cdot \left( d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right)$		
Contribución del acero	$M_{ns} := A_s \cdot f_s \cdot \left( d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right)$	$d = 0.98 \text{ m}$	
	$M_{ns} = 3084.846 \text{ kN} \cdot \text{m}$		$M_{ns} = 314.567 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$
Contribución del CFRP	$M_{nf} := A_f \cdot f_{fc} \cdot \left( d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right)$		
	$M_{nf} = 360.237 \text{ kN} \cdot \text{m}$		$M_{nf} = 36.734 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$
Capacidad de la viga	$\phi M_n := \phi \cdot (M_{ns} + \Psi_f \cdot M_{nf})$		
	$\phi M_n = 3051.943 \text{ kN} \cdot \text{m}$		$\phi M_n = 311.212 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$

Fuente: Fuente: Elaboración propia con datos tomados de (López, 2013)

## Anexo 7

Comparación de la capacidad reducida con la demanda mayorada según la combinación de cargas del ACI.440-2R

Chequeo de la capacidad vs la demanda al haber utilizado la lamina "SikaCarbodur S 1214"			
	Internacional	CGS	MKS
Demanda ACI.440.2R			
Carga muerta	$S_{DL} := 18.98 \frac{N}{mm}$	$S_{DL} = 1300.543 \frac{lb_f}{ft}$	$S_{DL} = 1.935 \frac{tonne_f}{m}$
Carga viva	$S_{LL} := 11.01 \frac{N}{mm}$	$S_{LL} = 754.425 \frac{lb_f}{ft}$	$S_{LL} = 1.123 \frac{tonne_f}{m}$
Condición resistencia nominal	$\phi R_n \geq 1.15 S_{DL} + 0.75 S_{LL}$	$R_u := 1.1 S_{DL} + 0.75 S_{LL}$	
Resistencia ultima	$R_u = 29.136 \frac{N}{mm}$	$R_u = 1996.416 \frac{lb_f}{ft}$	$R_u = 2.971 \frac{tonne_f}{m}$
Capacidad de la viga acero+CFRP	$\phi M_n := \phi \cdot (M_{ns} + \Psi_f \cdot M_{nf})$ +		
	$\phi M_n = 3051.943 \text{ kN} \cdot \text{m}$	$\phi M_n = 2250997.473 \text{ lb}_f \cdot \text{ft}$	$\phi M_n = 311.212 \text{ tonne}_f \cdot \text{m}$
Momento producido por la demanda mayorada	$M_u := \frac{R_u \cdot L^2}{8}$		
	$M_u = 1456.775 \text{ kN} \cdot \text{m}$	$M_u = 1074462.1 \text{ lb}_f \cdot \text{ft}$	$M_u = 148.55 \text{ tonne}_f \cdot \text{m}$
Factor de seguridad entre la capacidad y la demanda	$F.S := \frac{\phi M_n}{M_u} = 2.095$		

Fuente: Elaboración propia con datos tomados de (López, 2013)

## Anexo 8

### *Aplicación de la resina epoxi sobre la superficie de la viga*

Para la colocación del refuerzo se debe verificar y preparar la superficie donde esta no tenga irregularidades para posteriormente aplicar el adhesivo epóxico “Sikadur 330”



Fuente: (López, 2013)

## Anexo 9

### *Aplicación de la resina epóxica en el refuerzo CFRP*

Para la colocación de las láminas CFRP también será necesario la aplicación de la resina epoxi en su superficie



Fuente: (López, 2013)