



## PROYECTO FINAL DE GRADO

“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS VARILLAS DE POLÍMERO REFORZADO EN FIBRA DE VIDRIO (PRFV) CON RELACIÓN A LAS VARILLAS DE ACERO CONVENCIONALES EN VIGAS A FLEXIÓN”

### **AUTORES:**

JUNIOR CARLOS IGNACIO BARRETO MARTÍNEZ

FABIO ARIEL VARGAS FERNÁNDEZ

### **TUTOR:**

PROF. MSC. ING. FREDY GABRIEL RAMÍREZ VILLANUEVA

CORONEL OVIEDO, MES DE SEPTIEMBRE DE 2023



**MISIÓN:** Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.  
**VISIÓN:** Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

**PÁGINA DE APROBACIÓN.**

Trabajo de fin de grado para la obtención del Título de Ingeniero Civil aprobado en representación de la Facultad Ciencias y Tecnología de la Universidad Nacional de Caaguazú, por el Tribunal Examinador constituido por los siguientes profesores y con la siguiente nota final:

Calificación final: \_\_\_\_ (Números)

\_\_\_\_\_ (Letras)

-----  
 Prof. Ing.

-----  
 Prof. Ing.

-----  
 Prof. Ing.



**MISIÓN:** Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.  
**VISIÓN:** Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

### **DEDICATORIA.**

A Dios todo poderoso, por iluminar mi camino siempre y por brindarme la tranquilidad de saber que este momento llegaría.

A mis padres, Rossana y Ruben cuyo apoyo inquebrantable y sacrificios han sido mi mayor inspiración. Quienes, a lo largo de estos años comprendieron el esfuerzo necesario para recorrer el camino que me ha llevado a esta etapa de mi vida.

Esto va por ustedes.

**Junior Carlos Ignacio Barreto Martínez**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CAAGUAZÚ**  
Sede Coronel Oviedo  
*Creada por Ley N° 3198 del 4 de mayo de 2007.*  
**FACULTAD DE CIENCIAS y TECNOLOGÍAS – F.C. y T.**  
Coronel Oviedo – Paraguay



**MISIÓN:** Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.  
**VISIÓN:** Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

---

**DEDICATORIA.**

A mis padres, hermanos y a toda mi familia por el cariño y el apoyo que me brindaron en toda mi formación profesional.

A todos mis amigos y compañeros con quienes compartí tantos momentos a lo largo de mi vida.

**Fabio Vargas Fernández**



**MISIÓN:** Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.  
**VISIÓN:** Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

### **AGRADECIMIENTOS.**

Agradecer a nuestros padres, quienes siempre han brindado su apoyo incondicional y han buscado que seamos personas íntegras y excelentes profesionales.

Además, nuestros más sentidos agradecimientos a todos y cada uno de los mentores que colaboraron con su granito de arena para que este proyecto de titulación sea una realidad. En especial al Ing Fredy Villanueva por la paciencia, así como la generosa entrega de sus conocimientos, han sido de un valor inestimable para este proyecto. Cada página de este trabajo lleva un pedacito de ustedes, y con gratitud lo presentamos como un tributo a su confianza en nosotros.

A la empresa LEMCO, quienes a través de los ingenieros y técnicos han colaborado brindándonos su apoyo y su tiempo para la realización de este proyecto de final de grado.

A los ingenieros Ailton, Franco y Gabriel por brindarnos su ayuda durante este proceso.

Gracias a todos ustedes.



**MISIÓN:** Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.  
**VISIÓN:** Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

## **RESUMEN.**

Este estudio realiza un análisis comparativo entre las varillas de polímero reforzado en fibra de vidrio (PRFV) y las varillas de acero convencionales en vigas a flexión. El objetivo es evaluar las propiedades mecánicas y el comportamiento estructural de ambas opciones de refuerzo en vigas sometidas a cargas de flexión.

Se lleva a cabo un estudio experimental donde se fabrican vigas de tamaño y geometría similares utilizando tanto varillas de PRFV como varillas de acero. Estas vigas se someten a pruebas de carga hasta el punto de falla, registrando los valores de carga y deflexión en diferentes puntos de la viga.

Los resultados obtenidos se analizan y comparan en términos de capacidad de carga, rigidez, resistencia al agrietamiento y deflexión en servicio.

El análisis comparativo revela las ventajas y desventajas de cada opción de refuerzo, permitiendo tomar decisiones informadas sobre su implementación en proyectos de ingeniería civil. Se discuten las aplicaciones potenciales de las varillas de PRFV en la construcción de estructuras de concreto armado, considerando aspectos económicos y de sostenibilidad.

Palabras claves:

- PRFV (Polímero reforzado en fibra de vidrio).
- Flexión.
- Rigidez.
- Agrietamiento.
- Deflexión.



**MISIÓN:** Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.  
**VISIÓN:** Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

## **ABSTRACT.**

This study presents a comparative analysis between glass-fiber reinforced plastic (GFRP) and conventional steel bars in flexural beams. The aim is to evaluate the mechanical properties and structural behavior of both reinforcement options in beams subjected to flexural loads.

An experimental study is conducted where beams of similar size and geometry are manufactured using both Fiber-Reinforced Polymer (FRP) rods and steel rods. These beams are subjected to load tests until the point of failure, recording the load and deflection values at different points along the beam.

The obtained results are analyzed and compared in terms of load capacity, stiffness, crack resistance, and service deflection.

The comparative analysis reveals the advantages and disadvantages of each reinforcement option, allowing for informed decision-making regarding their implementation in civil engineering projects. The potential applications of GFRP in reinforced concrete structures are discussed, considering economic and sustainability aspects.

### **KEYWORDS:**

- GFRP (Glass-Fiber Reinforced Plastic).
- Flexión.
- Stiffness.
- Cracking.
- Deflection.



**MISIÓN:** Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.

**VISIÓN:** Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

## ÍNDICE

<b>1. CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4. OBJETIVOS.....	4
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
<b>2. CAPÍTULO II.....</b>	<b>5</b>
2.1. ANTECEDENTES.....	5
2.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	7
2.2.1. POLÍMERO REFORZADAS EN FIBRA DE VIDRIO (PRFV).....	8
2.2.1.1. PROCESO DE PULTRUSIÓN.....	8
2.2.1.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PRFV.....	9
2.2.1.3. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PRFV.....	11
2.2.1.4. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y ADHERENCIA DE LA BARRA DE FRP.....	12
2.2.1.5. EFECTO DE LAS ALTAS TEMPERATURAS Y FUEGO.....	13
2.2.1.6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PRFV.....	13
<b>3. CAPÍTULO III.....</b>	<b>14</b>
3.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	14
3.2. MUESTRAS.....	14
3.2.1. ESQUEMA GENERAL.....	14
3.2.2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	14
3.2.2.1. HORMIGÓN.....	14
3.2.2.2. ACERO.....	15
3.2.2.3. POLÍMERO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO (PRFV).....	15
3.3. EVALUACIONES DE CONTROL.....	15
3.3.1. RESISTENCIA DEL HORMIGÓN.....	15
3.3.2. TRACCIÓN.....	15
3.3.3. COMPRESIÓN.....	15
3.4. DETALLADO DE ARMADURAS.....	16
3.5. DISPOSITIVOS, INSTRUMENTOS Y EQUIPAMIENTOS UTILIZADOS EN LOS ENSAYOS.....	16
3.5.1. PÓRTICO Y PISTÓN DE REACCIÓN.....	16
3.5.2. GATO HIDRÁULICO.....	17
3.5.3. DEFLECTÓMETRO.....	17
3.5.4. MANÓMETRO.....	17



**MISIÓN:** Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.

**VISIÓN:** Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

3.5.5. FISURÓMETRO.....	17
<b>4. CAPÍTULO IV.....</b>	<b>18</b>
4.1. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	18
4.1.1. PROBETAS.....	18
4.1.2. VIGAS.....	19
4.1.2.1. DEFLEXIÓN.....	19
4.1.2.2. AGRIETAMIENTO.....	23
4.2. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	26
<b>5. CAPÍTULO V.....</b>	<b>29</b>
5.1. CONCLUSIONES.....	29
5.2. RECOMENDACIONES.....	29
<b>6. CAPÍTULO VI.....</b>	<b>30</b>
6.1. BIBLIOGRAFÍA.....	30
<b>7. CAPÍTULO VII.....</b>	<b>31</b>
7.1. ANEXO 1 - MEMORIA DE CÁLCULO.....	31
7.2. ANEXO 2 - PREPARACIÓN DE ENCOFRADO.....	33
7.3. ANEXO 3 - ENSAYOS.....	36
7.4. ANEXO 4 - GASTOS.....	45



**MISIÓN:** Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.  
**VISIÓN:** Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

## ÍNDICE DE FIGURAS.

<b>Figura 1.</b> Ejemplos de barras de reforzamiento.....	7
<b>Figura 2.</b> Esquema de proceso de pultrusión de varillas PRFV.....	9
<b>Figura 3.</b> Corte transversal de una varilla de PRFV.....	9
<b>Figura 4.</b> Corte longitudinal tipo de los especímenes de vigas.....	16
<b>Figura 5.</b> Corte transversal tipo de los especímenes de vigas.....	16
<b>Figura 6.</b> Diagrama Carga - Deflexión del acero.....	20
<b>Figura 7.</b> Diagrama Carga - Deflexión del PRFV.....	21
<b>Figura 8.</b> Fisuras máximas admisibles para 0.40 mm (Acero) y 0.70 mm (PRFV).....	23
<b>Figura 9.</b> Evolución del ancho máximo de fisuras durante la aplicación de carga.....	24
<b>Figura 10.</b> Secuencia de la aparición de fisuras en vigas de acero.....	25
<b>Figura 11.</b> Secuencia de la aparición de fisuras en vigas de PRFV.....	25

## ÍNDICE DE TABLAS.

<b>Tabla 1.</b> Densidades típicas de barras reforzantes, lb/ft <sup>3</sup> (g/cm <sup>3</sup> ).....	10
<b>Tabla 2.</b> Coeficientes típicos de expansión térmica para barras reforzantes.....	11
<b>Tabla 3.</b> Propiedades tensionadas típicas de barras reforzantes.....	11
<b>Tabla 4.</b> Ventajas y desventajas de los PRFV.....	13
<b>Tabla 5.</b> Valores obtenidos en los ensayos de rotura de probetas de hormigón.....	18
<b>Tabla 6.</b> Resultados obtenidos de los ensayos de vigas sometidas a flexión.....	19
<b>Tabla 7.</b> Deflexiones medidas a los 44,40 kN (100 Bar).....	22
<b>Tabla 8.</b> Precios por diámetro de las varillas.....	27
<b>Tabla 9.</b> Precios estribos PRFV.....	27

## 1. CAPÍTULO I.

### 1.1. INTRODUCCIÓN.

El hormigón es un material de construcción, obtenido por la mezcla de áridos, cemento, agua y ciertos aditivos, cuando sea necesario. A pesar de que el hormigón se inventó hace décadas, su uso en la ingeniería civil se sigue ampliando con la necesidad de seguir aumentando su resistencia, sabiendo que uno de los materiales que hacen que el hormigón brinde mejores prestaciones y que a su vez le aporte otras características son las varillas de acero.

Las varillas de acero son un material de uso muy común en estructuras de hormigón armado debido a su gran resistencia, maleabilidad y en ciertos casos a su bajo costo. Debido a que en el mundo se producen un tonelaje 20 veces mayor de hierro el cual es una de las materias primas para la fabricación del acero y que debido a su alta demanda con el tiempo, género la problemática de alto costo que actualmente se tiene a la hora de optar por este material, sin olvidar que desde sus primeros contactos con la construcción siempre presento un factor desfavorable que es la corrosión.

Este y otros factores motivados también por el costo llevan a la actualidad a buscar nuevos materiales alternativos que puedan satisfacer las necesidades estructurales y ambientales, llegando así a presentarse en el mercado varios productos especiales utilizados para la sustitución de distintos materiales con mejores características y nuevas propiedades para mejorar la construcción.

En este sentido, para aumentar la durabilidad del hormigón se incorporan nuevos materiales como las varillas de polímero reforzados en fibra de vidrio PRFV. La incorporación de los materiales compuestos en el área de las obras civiles, permiten obtener muchas ventajas y beneficios, estableciendo una relación coste y durabilidad. También, su capacidad de resistir la corrosión y su poca vulnerabilidad ante los efectos químicos ayudan a mejorar la seguridad y ciclo de vida, así como proporcionar un ahorro en los costes en su fabricación y mantenimiento de las estructuras de hormigón armado.

Esta investigación se centra en la necesidad de profundizar para conocer las características que pueden presentar las varillas de polímero reforzados en fibra de vidrio, en relación a las varillas de acero. Partiendo de las diferentes pruebas que se han realizado para determinar las reacciones físicas, químicas y mecánicas, que pueden presentarse. Estableciendo una idea del nivel de durabilidad y resistencia que pueden ofrecerle al hormigón.

## **1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.**

La realización de esta investigación se basa en el caso en particular que presenta la utilización de las varillas de acero convencional en el tiempo, puesto que estas varillas presentan ciertas desventajas entre las cuales destacan los altos niveles de corrosión que se incrementan en ambientes agresivos deteriorando de manera considerable la estructura.

Es necesario mencionar que el acero presenta propiedades que afectan directamente su adherencia con el hormigón al momento de corroerse, este efecto de la corrosión también denominado exfoliación, está relacionada con la pérdida de capas o láminas; además de presentar la reducción de área transversal del acero, también conocido como delaminación, ambos efectos afectan la capacidad de soporte de la estructura.

Teniendo como referencia lo antes mencionado, se plantea la necesidad de analizar la alternativa de utilización de otros materiales, en ese sentido este trabajo propone observar y evaluar las características mecánicas de las varillas de polímero reforzadas en fibra de vidrio PRFV; además, de compararlas con las de acero para así poder aportar resultados que permitan comprender mejor el comportamiento de los dos materiales con el hormigón.

A causa de las altas temperaturas requeridas para la producción, el reforzamiento de acero tiene una más alta huella de carbono que el reforzamiento con FRP (ACI Comité 440.1R-15, 2015). Según lo citado anteriormente se puede suponer que las varillas de polímero reforzados en fibra de vidrio son menos agresivos con el medio ambiente en relación a las varillas de acero convencional.

### 1.3. JUSTIFICACIÓN.

Desde el punto de vista de la investigación, destaca la utilización del acero en la construcción, siendo en la actualidad uno de los materiales más utilizados a nivel mundial, además, observando que en su mayoría las construcciones se realizan de forma convencional. Esta realidad hace que sea de suma importancia la necesidad de disminuir el consumo masivo de acero, ayudando así a reducir el impacto que se genera en su fabricación con el medio ambiente.

Teniendo en cuenta que implementar un material alternativo puede generar cierta desconfianza, existen en el mercado algunos productos la cual no son utilizados debido a la falta de información y que hasta en algunos casos podrían disminuir el costo de la construcción, como se supone sería el caso de las varillas PRFV.

Ante esta nueva visión, países en desarrollo comienzan a utilizar este material en el ámbito de la construcción, resultando ser muy beneficiosos que hoy día cuentan con normas que reglamentan este tipo de construcción.

En el caso de nuestro país, El Comité Técnico de Normalización CTN 17 dio a conocer la aprobación de la nueva Norma Paraguaya NP 17 091 19 bajo la nomenclatura de “Barras conformadas de polímero reforzado con fibra de vidrio para armaduras en estructuras de hormigón” y que designa a esta nueva tecnología innovadora como PRFV-HA de alta densidad.

Desde la perspectiva teórica, la investigación servirá de precedente para otros investigadores que decidan continuar con esta línea de investigación debido a que los resultados serán científicamente comprobables, además, servirá de ayuda para dar conocimiento de las posibles opciones que se pueden encontrar en caso de no decidir optar por el acero convencional.

## **1.4. OBJETIVOS.**

### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL.**

- Analizar comparativamente la utilización de varillas de polímero reforzadas en fibra de vidrio PRFV con relación a las varillas convencionales de acero en vigas.

### **1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Describir las propiedades físicas y mecánicas de las varillas de Polímero reforzadas en Fibra de Vidrio PRFV.
- Evaluar los efectos en la sustitución de las varillas de acero convencionales por varillas de polímero reforzadas en fibra de vidrio PRFV en vigas.
- Reconocer las ventajas y desventajas que presentan los materiales objeto de este estudio desde un enfoque técnico y ambiental.
- Analizar la factibilidad económica de los dos tipos de materiales en estudio para su utilización en vigas.

## 2. CAPÍTULO II.

### 2.1. ANTECEDENTES.

De acuerdo al trabajo final de grado presentado por (Mendieta Lezcano & Peralta Iriarte, 2020) que habla sobre “*EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y COMPUTACIONAL DEL COMPORTAMIENTO A LA FLEXIÓN DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO HÍBRIDO (ACERO – PRFV)*”, desarrollado en la ciudad de San Lorenzo-Paraguay en el año 2020 con el objetivo de Evaluar de forma experimental y computacional el comportamiento a flexión pura de vigas de hormigón con armadura híbrida de PRFV/ACERO convencional.

Como conclusión presentan que, la capacidad de una viga híbrida de soportar una mayor carga antes de entrar en fluencia se encuentra estrechamente relacionada con la presencia de acero, el alto valor del módulo de elasticidad de este material respecto al PRFV aumenta la rigidez de la viga (con relación a vigas reforzadas puramente con PRFV) y permite absorber en un principio la mayor parte de las solicitaciones de tracción. Una vez que la deformación de fluencia del acero se alcanza, la capacidad del mismo de absorber aún más carga disminuye considerablemente y las cargas aplicadas con posterioridad son absorbidas por las barras de PRFV donde se observa un pequeño aumento la rigidez regido en adelante por la capacidad elástica del refuerzo de PRFV. A mayor capacidad asignada al acero durante su diseño se verifica una mayor rigidez en los estados elásticos sin fisurar y fisurado pero una disminución en estado post-fluencia. En cambio, una mayor capacidad asignada al PRFV confiere una menor rigidez en los estados elásticos sin fisurar y fisurado pero un incremento en estado post-fluencia.

Un aumento en la seguridad se ve lograda con la presencia de acero en vigas con refuerzo híbrido, siempre y cuando los elementos sean diseñados para fallar por fluencia de las mismas y aplastamiento del hormigón, como se vio reflejado con el colapso de las vigas con capacidad de tracción equivalente reforzadas únicamente con PRFV.

De acuerdo al trabajo final de grado presentado por (Vila Carbajal, 2019) que habla sobre “*ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL EN FLEXIÓN, ENTRE VIGAS REFORZADAS CON VARILLAS DE VIDRIO FRENTE A LAS REFORZADAS CON ACERO*”, desarrollado en la ciudad de Lima-Perú en el año 2019 con el objetivo de Desarrollar un análisis comparativo del comportamiento estructural en flexión, entre vigas reforzadas con varillas de vidrio frente a las reforzadas con acero.

Como conclusión presenta que, las dos vigas reforzadas con GFRP en tensión, el elemento falla por rotura del concreto más no por ruptura de las barras de GFRP. Se ha determinado, que la ductilidad de las vigas reforzadas en tensión con GFRP ( $\varnothing$  16mm), no experimentan el momento de fluencia, por lo tanto, no es posible hallar la ductilidad de manera directa en el diagrama de momento curvatura. Por esta razón es necesario el uso de otra filosofía de diseño de vigas con varillas de GFRP. En un diseño de viga con GFRP, el criterio de deflexión es más importante que la resistencia. Son más económicas las varillas de acero. Sin embargo, si tomamos en cuenta el costo de mantenimiento de los refuerzos en un ambiente agresivo como el salitre, podría ser más barato usar las varillas GFRP por su inmunidad a la corrosión.

De acuerdo al trabajo final de grado presentado por (Lalvay Llivigañay, 2017) que habla sobre “ANÁLISIS, COMPORTAMIENTO Y COMPARACIÓN DE VARILLAS CORRUGADAS EN FIBRA DE VIDRIO, CON RELACIÓN A LAS VARILLAS CONVENCIONALES; CONJUNTAMENTE EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE HORMIGÓN” desarrollado en la ciudad de Cuenca-Ecuador en el año 2017 con el objetivo de evaluar las propiedades físicas y mecánicas de las varillas de fibra de vidrio, para obtener información de sus características y así tener un más amplio conocimiento sobre este nuevo material de la construcción.

Como conclusión presenta que, el acero tiene el mismo módulo de elasticidad y curva de esfuerzo deformación que se ha venido trabajando en estos tiempos; mientras que la varilla de fibra de vidrio presentó un módulo de elasticidad y una curva esfuerzo deformación distinta para cada diámetro varilla. Así mismo, se comprobó que en la fibra a menor diámetro mayor esfuerzo. En el ensayo a compresión dio como resultado que la varilla de fibra de vidrio presenta una curva esfuerzo deformación distinta a la del acero. En los ensayos mencionados anteriormente la varilla de fibra de vidrio de 12 mm de diámetro presentó características muy inferiores a la del acero; las únicas que lograron tener un comportamiento superior a la del acero fueron las de 6 y 8mm de diámetro. En las varillas de fibra de vidrio se apreció que al momento de quitar la carga de compresión la varilla retomó su forma original, pero presentando pequeñas fisuras; todo lo contrario del acero. La varilla de fibra de vidrio tiene un cierto ángulo de restricción de más o menos unos 60 grados, el cual cuando es superado ésta se rompe y es que por ser un material muy rígido que no permite dobleces muy altas.

## 2.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

Inicialmente materiales alternativos como las varillas de polímero reforzadas en fibra de vidrio PRFV fueron utilizados en construcciones donde el hormigón está en permanente contacto con la humedad o en casos más extremos donde el hormigón esté sumergido en agua, entre algunos lugares donde son utilizados comúnmente es en estructuras marinas, puentes, garajes de estacionamiento expuesto a sales de deshielo, combinaciones de temperatura y cloruro. Todos estos factores generaban la necesidad de suprimir la utilización del acero a causa de lo agresivo que son este tipo de ambientes con el material.

Teniendo en cuenta que el hormigón sufre de deterioro y pierde funcionalidad cuando el acero se corroe se decidió por dar prioridad a las varillas PRFV que su composición basada en fibras incorporadas en resina ofrece una alternativa al reforzamiento de las estructuras de hormigón.

Los materiales de fibra reforzada polimérica están hechos de fibras continuas de aramida (FARP), de fibra de carbono y (FCRP) o de fibra de vidrio (FVRP) integradas en una matriz resinosa. Ejemplos de barras de reforzamiento de FRP son mostradas en la **Figura 1**. Porque los materiales de FRP son no magnéticos y no corrosivos, los problemas de la interferencia electromagnética y corrosión del acero pueden ser evitadas con reforzamiento de FRP. Adicionalmente, los materiales de FRP exhiben varias propiedades, tales como un elevado esfuerzo tensil que los hace adecuados para el uso como reforzamiento estructural (ACI Comité 440, 440.1R-15, 2015).



**Figura 1.** Ejemplos de barras de reforzamiento.

*Fuente: ACI 440.1R (2015).*

Debido a la variación en el comportamiento mecánico de los materiales provoca que también sufran cambios a la hora de realizar los cálculos respectivos. Esta variación se debe a que los materiales de fibra reforzada polimérica son anisotrópicos caracterizados por un alto esfuerzo tensil solo en la dirección de las fibras de reforzamiento. Además, los materiales de fibra reforzada polimérica (FRP) no ceden, más bien, son elásticos hasta el fallo.

Para comprender mejor el comportamiento del PRFV y las varillas de acero con el hormigón armado es necesario conocer las propiedades físicas y mecánicas de cada uno de los materiales, lo que se detallaran a continuación.

### **2.2.1. POLÍMERO REFORZADAS EN FIBRA DE VIDRIO (PRFV).**

Las fibras reforzadas con polímero son un material compuesto constituido principalmente por dos elementos que son la fibra y la resina, adicional se agrega aditivos. Las fibras de refuerzo proporcionan el esfuerzo mecánico, la resina o polímero es el “pegamento” que mantiene unido al compuesto y da las propiedades físicas del producto terminado, mientras que los materiales de relleno y aditivos son usados como proceso para dar propiedades especiales al producto final (Rivadeneira Benítez, 2016).

El PRFV es impermeable a la humedad y altamente resistente a los ácidos químicos y las bases alcalinas, por lo que es ideal para estructuras de ingeniería donde el clima y la corrosión son factores importantes a tener en cuenta. Se puede decir que las fibras son quienes proporcionan la resistencia de tracción y la resina es la encargada de transmitir los esfuerzos absorbidos entre las fibras.

#### **2.2.1.1. PROCESO DE PULTRUSIÓN.**

La pultrusión es un proceso de producción automatizado en continuo en barras de PRFV. En el proceso de pultrusión, los hilos de fibra de vidrio son arrastrados al interior de una cubeta donde se impregnan de resina, seguidamente entran en el molde calefactado donde se inicia la polimerización y curado a alta temperatura de la resina, adoptando la geometría interna del molde. Los cabezales de tracción estiran el perfil polimerizado hasta la sierra, donde se corta y se pule.



**Figura 2.** Esquema de proceso de pultrusión de varillas PRFV.

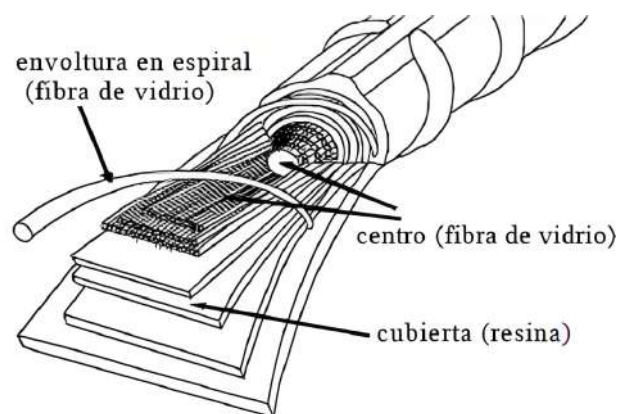
Fuente: INTN (2019).

Propiedades de los perfiles fabricados por pultrusión:

- Resistencia a la corrosión.
- Baja conductividad térmica y eléctrica.
- Transparencia magnética y electromagnética.
- Baja densidad.
- Elevada resistencia mecánica.
- Estabilidad dimensional.

#### 2.2.1.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PRFV.

Factores como el volumen de fibra, el tipo de fibra, el tipo de resina, orientación de la fibra, efectos dimensionales y la calidad del control durante la fabricación juegan un rol principal en la definición de las características de una barra de FRP.



**Figura 3.** Corte transversal de una varilla de PRFV.

Fuente: INTN (2019).

Las barras deberán cumplir con el requisito de composición básica siguiente:

- Fibra de vidrio: 75 % a 80 %.
- Mezcla de resinas epoxi: 20 % a 25 %.

Las propiedades del material pueden ser alteradas modificando la relación entre la fibra y la resina. Para un caso supuesto de un mayor porcentaje de fibra indicado anteriormente, genera que la barra reduzca su capacidad a la oposición de las cargas. El efecto inverso se obtiene aumentando el porcentaje de la resina.

#### 2.2.1.2.1. DENSIDAD.

Es una propiedad sumamente importante debido a que la varilla en fibra de vidrio es sumamente ligera, las varillas de fibra de vidrio poseen una densidad específica de  $1250 \text{ kg/m}^3$  -  $2100 \text{ kg/m}^3$ , mientras que la del acero tiene una densidad de  $7900 \text{ kg/m}^3$ , lo que esto nos lleva a decir que la varilla de fibra de vidrio es aproximadamente cuatro veces más ligera que la varilla corrugada de acero (Lalvay Llivigañay, 2017).

Acero	FVRP	FCRP	FARP
493.00 (7.90)	77.8 a 131.00 (1.25 a 2.10)	93.3 a 100.00 (1.50 a 1.60)	77.80 a 88.10 (1.25 a 1.40)

**Tabla 1.** Densidades típicas de barras reforzantes, lb/ft<sup>3</sup> (g/cm<sup>3</sup>).

Fuente: ACI 440.1R (2015).

#### 2.2.1.2.2. COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA.

En la (ACI Comité 440.1R-15, 2015) se explica como los coeficientes de expansión térmica de las barras de FRP varían en las direcciones longitudinales y transversales, dependiendo del tipo de fibra, resina, fracción de volumen de la fibra. El coeficiente longitudinal de expansión térmica es dominado por las propiedades de la fibra mientras el coeficiente transversal es dominado por la resina. Nótese que el coeficiente negativo de la expansión térmica indica la contracción del material con el incremento de la temperatura y se expande con el descenso de la temperatura.

La diferencia entre el coeficiente transversal de la expansión térmica de barras de FRP y hormigón puede causar agrietamientos de fraccionamiento en el hormigón bajo el aumento de la temperatura y finalmente, el fracaso de la cubierta de hormigón si la acción de confinamiento del hormigón es insuficiente.

Dirección	CTE, x 10 <sup>-6</sup> /°F [x 10 <sup>-6</sup> /°C]				
	Acero	FVRP	FCRP	FARP	Hormigón
Longitudinal, αL	6.5 (11.7)	3.3 a 5.6 (6.0 a 10.0)	-4.0 a 0.0 (-9.0 a 0.0)	-3.3 a -1.1 (-6 a -2)	4 a 6 (7.2 a 10.8)
Transversal, αL	6.5 (11.7)	11.7 a 12.8 (21.0 a 23.0)	41 a 58 (74.0 a 104.0)	33.3 a 44.4 (60.0 a 80.0)	4 a 6 (7.2 a 10.8)
•Valores típicos para la fracción de volumen de fibra oscilante entre 0.5 a 0.7.					

**Tabla 2.** Coeficientes típicos de expansión térmica para barras reforzantes.

Fuente: ACI 440.1R (2015).

### 2.2.1.3. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PRFV.

#### 2.2.1.3.1. TRACCIÓN.

Entre las propiedades que más destacan de los PRFV es que al estar sometidos a tracción exhiben un comportamiento no plástico antes de la rotura. Es decir, su rotura se produce cuando alcanzan su carga admisible máxima y durante todo este proceso su comportamiento es elástico.

	Acero	FVRP	FCRP	FARP
<b>Estrés nominal de cesión, ksi (MPa)</b>	40 a 75 (276 a 517)	NA	NA	NA
<b>Esfuerzo de tensión, ksi (MPa)</b>	70 a 100 (483 a 1600)	70 a 230 (483 a 690)	87 a 535 (600 a 3690)	250 a 368 (1720 a 2540)
<b>Módulo de elasticidad, x 10 ksi (GPa)</b>	29.0 (200.0)	5.1 a 7.4 (35.0 a 51.0)	15.9 a 84.0 (120.0 a 580.0)	6.0 a 181 (41.0 a 125.0)
<b>Deformación de cesión, porcentaje</b>	0.14 a 0.25	NA	NA	NA
<b>Deformación de ruptura, porcentaje</b>	6.0 a 12.0	1.2 a 3.1	0.5 a 1.7	1.9 a 4.4
*Valores típicos para la fracción del volumen de fibra oscilante entre 0.5 a 0.7.				

**Tabla 3.** Propiedades tensionadas típicas de barras reforzantes.

Fuente: ACI 440.1R (2015).

#### 2.2.1.3.2. COMPRESIÓN.

La resistencia a esfuerzos de compresión del FRP es muy bajo, en estudios realizados esta resistencia ha llegado a ser el 55% de la resistencia a esfuerzos de tensión, por lo que no se recomienda su uso como refuerzo a compresión (Lalvay Llivigañay, 2017).

Es de reconocer que las barras de fibra reforzada con polímero (FRP) no son muy buenas para resistir estrés compresivo. El módulo compresivo de elasticidad de barras FRP son menores a comparación a sus módulos de elasticidad a tracción.

La explicación ampliamente más aceptada para los valores ligeramente más bajos del módulo de elasticidad en compresión es el fallo prematuro resultante en las pruebas terminando en barrido y microabolladuras internas de la fibra bajo cargas compresivas (ACI Comité 440.1R-15, 2015).

#### **2.2.1.3.3. FATIGA.**

La fatiga dinámica es cuando el esfuerzo aplicado no es mayor del 50% de su resistencia a rotura, y se encuentra actuando en el mismo sentido que la matriz, el comportamiento bajo carga dinámica es óptimo (Lalvay Llivigañay, 2017).

#### **2.2.1.3.4. CORTE.**

La mayoría de las barras compuestas son relativamente débiles en corte interlaminar donde las capas de resina no reforzada reposan entre las capas de fibra. Porque usualmente no hay reforzamiento a través de las capas, el esfuerzo de corte interlaminar es gobernada por la relativamente débil matriz polimérica. La orientación de las fibras en una dirección lejos del eje a través de las capas de fibra incrementará la resistencia de corte, dependiendo del grado de compensación. Para barras de FRP, esto puede estar acompañado por un trenzado o enrollamiento de fibras transversales a las fibras principales (ACI Comité 440.1R-15, 2015).

#### **2.2.1.4. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y ADHERENCIA DE LA BARRA DE FRP.**

La tendencia siempre ha sido a que la tensión de adherencia sea similar a la de las armaduras de acero corrugado, aunque en algunos casos algunos productos presentan una menor fuerza de adherencia. La tensión de adherencia es en gran medida independiente de la resistencia del GFRP, siendo distintas para barras lisas con recubrimientos de arena o fibras trenzadas, siempre y cuando exista un recubrimiento adecuado para evitar grietas longitudinales. Las barras con envolturas helicoidales o moldeadas en su superficie, presentan puntos de anclaje, dando lugar a un buen comportamiento a adherencia (Almerich Chulia, 2010).

El agrietamiento longitudinal en la cobertura de hormigón puede degradar seriamente la capacidad de adherencia de barras de FRP y medidas suficientes deben ser tomadas para prevenir tales agrietamientos en pruebas de laboratorio y aplicaciones de campo. La habilidad de agentes

químicos de pasar a través del hormigón a las barras de FRP es otro importante factor pensado para afectar el esfuerzo de adherencia (ACI Comité 440.1R-15, 2015).

Las varillas de FRP cuentan con tres tipos de patrones comerciales superficiales reconocidos por el ACI, entre los cuales se nombran a continuación:

- a. Acanalado.
- b. Con un recubrimiento de arena de sílice.
- c. Con un anillado grabado y con recubrimiento de arena de sílice.

#### 2.2.1.5. EFECTO DE LAS ALTAS TEMPERATURAS Y FUEGO.

Para el efecto de las altas temperaturas y fuego se consideraron según (ACI Comité 440.1R-15, 2015) el cual comenta que, la resistencia al fuego de miembros de hormigón reforzados con FRP podría ser menor que el de miembros reforzados con acero debido a la reducción de propiedades de FRP; la pérdida de adherencia de un ablandamiento de la resina desde la cual las barras son fabricadas, o ambas.

En la temperatura cercana a su temperatura de transición del vidrio  $T_g$ , las propiedades mecánicas del polímero comienzan a reducir y el polímero está menos disponible para transferir los estreses del concreto a las fibras, resultando en reducciones considerables en el esfuerzo de adherencia. El valor de  $T_g$  depende del tipo de resina, pero está típicamente en el rango de 200 a 250°F (93 a 120°C) para las resinas usadas en la mayoría de las barras de FRP para hormigón.

#### 2.2.1.6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PRFV.

Ventajas	Desventajas
- Alta resistencia a tracción.	- No plastifica antes de la rotura frágil
- Alta resistencia a la fatiga	- Bajo módulo de Elasticidad (varía con el tipo de refuerzo de fibra)
- Poco peso en relación al acero	- Mucha menor resistencia a la compresión que a tracción
- Baja conductividad térmica y eléctrica.	- No puede doblarse en obra
- Impermeable a la humedad	- Susceptible al fuego
- Altamente resistente a los ácidos químicos y bases alcalinas	
- Fácil transporte	

**Tabla 4.** Ventajas y desventajas de los PRFV.

*Fuente: Elaboración propia.*

### **3. CAPÍTULO III.**

#### **3.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL.**

Con la intención de verificar la resistencia y el comportamiento al colapso se realizaron ensayos de un total de 8 muestras de vigas de hormigón armado que se caracterizan por su composición consistente de barras de acero y barras de polímeros reforzados con fibra de vidrio PRFV.

Las muestras se dividen en 2 grupos, vigas armadas con acero (3) y armadas con polímeros reforzados con fibra de vidrio PRFV (5), las cuales al momento de ensayar estaban simplemente apoyadas y sometidas a dos cargas puntuales aplicadas a una distancia “a” del apoyo. Se realizaron 3 probetas cilíndricas para su posterior ensayo los cuales servirán para determinar la resistencia que aporta el hormigón en relación a las armaduras.

#### **3.2. MUESTRAS.**

A continuación, se describe la configuración de las vigas adoptadas y las propiedades de los materiales utilizados para el armado de las vigas armadas con acero y las vigas armadas con varillas de polímero reforzadas con fibra de vidrio PRFV.

##### **3.2.1. ESQUEMA GENERAL.**

Las vigas fueron construidas con una longitud de dos (2) metros, recubrimiento superior e inferior de 2 cm, barras longitudinales de  $\varnothing 8$  mm para ambos tipos de vigas y estribos de  $\varnothing 6$  mm separadas según indican los cálculos. Se fabricaron las vigas con una disposición de estribos que permita realizar los estudios de manera a priorizar la flexión y no al corte debido a que es el enfoque que se plantea en esta investigación.

##### **3.2.2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.**

###### **3.2.2.1. HORMIGÓN.**

Para la resistencia del hormigón se adoptó un  $F_{ck} = 30$  MPa con el fin de aportar al hormigón la capacidad de absorber mayores cargas. Además, esto ayudó a evaluar el comportamiento de la viga en condiciones más desafiantes, como así, a tener un mayor control sobre la aparición de fisuras.

### **3.2.2.2. ACERO.**

Basándonos en los cálculos realizados se adoptaron armaduras longitudinales de  $\varnothing 8$  mm con  $F_y = 500$  MPa, mientras para las armaduras de los estribos se utilizaron barras conformadas con un diámetro de  $\varnothing 6$  mm con  $F_y = 500$  MPa.

### **3.2.2.3. POLÍMERO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO (PRFV).**

Para la elección del armado de las vigas construidas con PRFV se adoptaron los mismos criterios en cuanto a la elección de diámetros de las armaduras, estribos y separación, las cuales se utilizaron para el dimensionado de las vigas construidas con acero con la diferencia que las armaduras longitudinales se utilizaron barras de PRFV con una resistencia última a la tracción de 1100 MPa.

En vigas donde se utilizaron como armaduras longitudinales barras de PRFV fueron añadidos anclajes de acero por empalme, cuya longitud de solape fue de 30 cm.

## **3.3. EVALUACIONES DE CONTROL.**

### **3.3.1. RESISTENCIA DEL HORMIGÓN.**

Para la comprobación de la resistencia propuesta se ensayaron tres (3) probetas cilíndricas con dimensiones de 15 cm x 30 cm (Diámetro x altura), las cuales fueron curadas siguiendo la norma **C 31/C 31M-15**, este mismo criterio se utilizaron para las probetas generadas para las vigas.

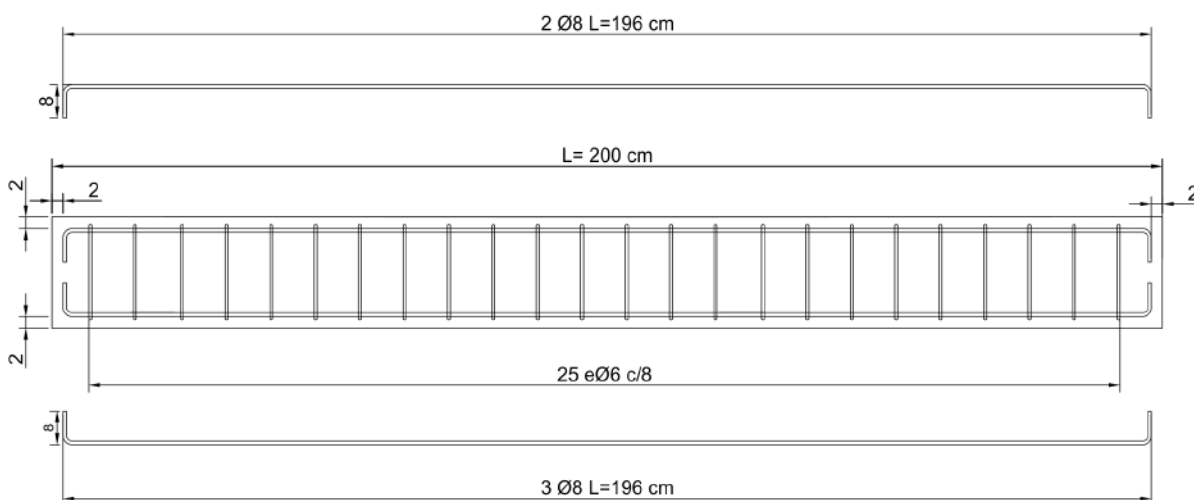
### **3.3.2. TRACCIÓN.**

No se realizaron ensayos de tracción en las barras de PRFV, se adoptaron directamente los valores indicados según el fabricante. Estos valores se obtuvieron de los ensayos realizados en el Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología (INTN) solicitados por la empresa que los provee. Más características del material pueden ser obtenidos de la Norma Paraguaya **NP 17 091 - 19**.

### **3.3.3. COMPRESIÓN.**

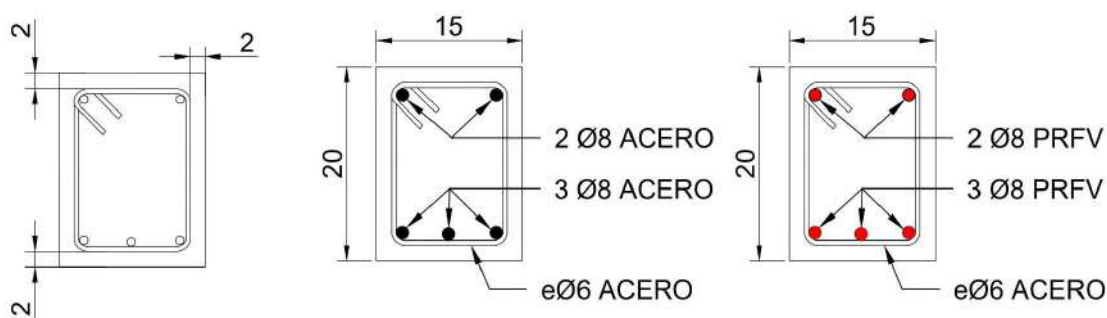
Al igual que los ensayos tracción, los valores utilizados como referencia para el análisis se obtuvieron de la Norma Paraguaya **NP 17 091 - 19**.

### 3.4. DETALLADO DE ARMADURAS.



**Figura 4.** Corte longitudinal tipo de los especímenes de vigas.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.** Corte transversal tipo de los especímenes de vigas.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5. DISPOSITIVOS, INSTRUMENTOS Y EQUIPAMIENTOS UTILIZADOS EN LOS ENSAYOS.

#### 3.5.1. PÓRTICO Y PISTÓN DE REACCIÓN.

El pórtico cuenta con la capacidad de resistir cargas puntuales reactivas de alrededor de 20 toneladas. Los puntos de apoyo de las vigas consisten en estructuras enteramente construidas en acero, diseñadas para resistir cargas de alrededor de 10 toneladas. Estos puntos de apoyo presentan la particularidad de proporcionar una condición de apoyo simple a las vigas, lo cual permite la posibilidad de rotación y desplazamiento en el eje horizontal.

### **3.5.2. GATO HIDRÁULICO.**

El pórtico emplea un gato hidráulico para ejercer fuerzas durante los ensayos, con una capacidad de carga aproximada de 30 toneladas. Este gato funciona de forma manual y posibilita una ejecución controlada de los ensayos al permitir la interrupción de la carga para obtener lecturas precisas.

### **3.5.3. DEFLECTÓMETRO.**

El deflectómetro utilizado en ensayos a flexión en viga sirve para medir las deflexiones o deformaciones experimentadas por una viga sometida a una carga.

El procedimiento consiste en colocar el deflectómetro en la viga de interés y aplicar una carga la carga, a medida que este se aplica el deflectómetro registra las deflexiones en los diferentes puntos a lo largo de la viga, proporcionando datos precisos sobre la respuesta estructural.

La precisión del deflectómetro puede variar según el modelo y características específicas del equipo utilizado. La utilizada para el ensayo tiene una pantalla LCD del tamaño de 1x3/4 pulg, con una precisión de +/- 0,001 pulg..

### **3.5.4. MANÓMETRO.**

Un manómetro es un dispositivo utilizado para medir la presión. El utilizado en el laboratorio mide la presión en unidades de bar en un rango de hasta 300 bar. Este tipo de manómetro utiliza tecnología digital para mostrar y registrar la lectura de presión de manera precisa y fácil de leer.

### **3.5.5. FISURÓMETRO.**

Un fisurómetro es un instrumento de medición utilizado para medir la apertura de fisuras en estructuras o materiales. Proporciona una indicación precisa de la anchura de las fisuras, lo que permite evaluar la integridad estructural y determinar la necesidad de reparaciones o acciones correctivas. El fisurómetro utilizado es capaz de medir fisuras de 0.1 mm hasta 1.4 mm de ancho.

## 4. CAPÍTULO IV.

### 4.1. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

El análisis e interpretación de datos sobre los ensayos de compresión de probetas y flexión de las vigas proporciona información crucial sobre las propiedades y comportamiento del material utilizado. Estos ensayos se realizan para lo siguiente:

- Evaluar la resistencia a la flexión y el modo de falla.
- Realizar la medición de las deflexiones.
- Evaluar la fisuración

Esto permitirá determinar su rendimiento estructural que presenta ante la presencia de la carga propuesta. En esta investigación los ensayos en vigas y probetas se realizaron a los 36 días después de su elaboración.

#### 4.1.1. PROBETAS.

Las probetas fueron ensayadas en el laboratorio de la empresa **LEMCO** siguiendo la norma **ASTM C39/C39M - 18**. Los resultados se observan en la siguiente tabla:

Probeta N°	Carga de rotura	Tipo de rotura	Medición de diámetros				Medición de alturas		
			Diámetro superior (mm)		Diámetro inferior (mm)		Altura (cm)		
			0°	90°	0°	90°	0°	120°	240°
1	591,40	2	15,33	15,54	15,40	15,40	29,70	29,70	29,80
2	606,10	2	15,40	15,40	15,40	15,45	29,85	29,70	29,80
3	641,60	2	15,50	15,45	15,60	15,50	29,70	29,80	29,70

*Tabla 5. Valores obtenidos en los ensayos de rotura de probetas de hormigón.*

*Fuente: Elaboración propia.*

**Primera probeta:** El ensayo determinó que la resistencia característica de la probeta es **Fck=33,46 MPa**. aproximándose al valor utilizado para el dimensionado de las vigas.

**Segunda probeta:** El ensayo determinó que la resistencia característica de la probeta es **Fck=34,30 MPa** arrojando valores cercanos a la probeta 1 y a su vez a los valores utilizados en el dimensionado de las vigas.

**Tercera probeta:** El ensayo determinó que la resistencia característica de la probeta es **Fck=36,31 MPa** arrojando valores cercanos a la probeta 1 y 2, a su vez a los valores utilizados en el dimensionado de las vigas.

Una vez examinados y comparados los resultados obtenidos por los ensayos con los valores previamente propuestos se determinó que se encuentran dentro de los límites establecidos, por lo que se concluye que los resultados son satisfactorios y que cumplen con los criterios de calidad requeridos previamente para el proyecto.

#### 4.1.2. VIGAS.

En esta sección, se presentan los datos en forma de tablas y gráficos, agrupando las vigas según sus características y numeración. Esto facilita la identificación de patrones y tendencias específicas en el comportamiento estructural de cada tipo de viga, permitiendo una comparación más clara entre ellas, además, esto puede ayudar a tomar mejores decisiones fundamentadas en futuros diseños o análisis estructurales. Las vigas fueron sometidas a pruebas de acuerdo a las directrices establecidas en la norma **ASTM C78/C78M - 18**.

##### 4.1.2.1. DEFLEXIÓN.

Teniendo en cuenta el armado con el fueron construidas cada una de las vigas. A continuación, se exponen los resultados obtenidos en los que se analizaron: las cargas de fisuración (Pfis), cargas de fluencia (Pf) y las cargas últimas soportadas por los especímenes antes de su rotura (Pu), se incluye en el análisis el modo de rotura de cada una de ellas.

CARGAS Y MODOS DE FALLA							
Tipo	Código	Pfis (kN)	Pf (kN)	Pu (kN)	Mfis (kN·m)	Mu (kN·m)	Modo de falla
Acero	1	22,30	48,60	55,40	7,00	17,30	Falla por flexión
	2	23,10	48,40	53,90	7,20	16,80	Falla por flexión
	3	23,50	49,10	55,80	7,30	17,40	Falla por flexión
PRFV	4	13,70	-	59,10	4,30	18,50	Falla por aplastamiento
	5	13,30	-	58,20	4,20	18,20	Falla por aplastamiento
	6	13,90	-	59,30	4,30	18,50	Falla por aplastamiento, rotura de PRFV
	7	13,40	-	58,50	4,20	18,30	Falla por aplastamiento
	8	13,50	-	58,60	4,20	18,30	Falla por aplastamiento, rotura de PRFV

**Tabla 6.** Resultados obtenidos de los ensayos de vigas sometidas a flexión.

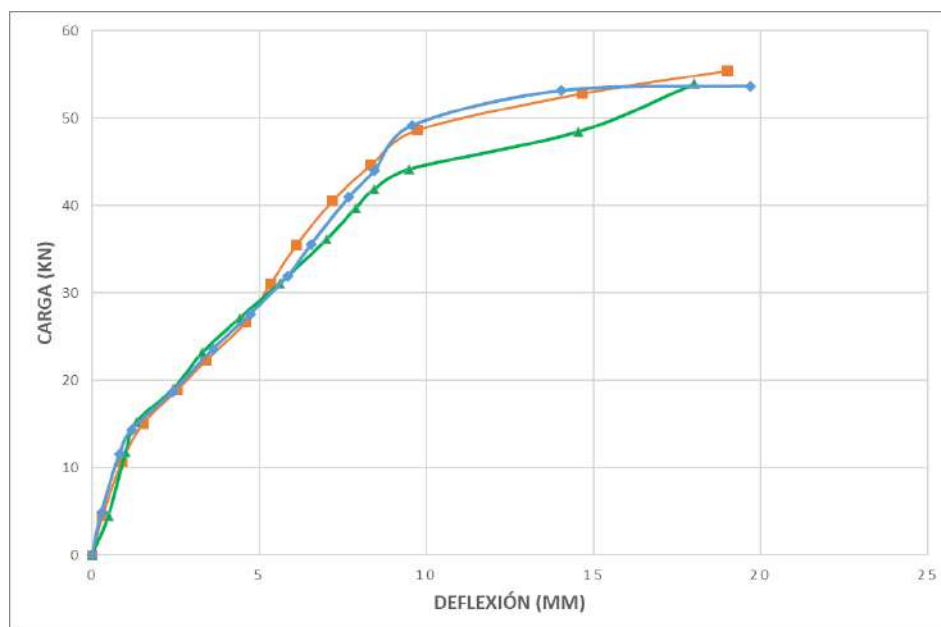
*Fuente: Elaboración propia.*

Al observar la **Tabla 6**, se puede destacar que únicamente las vigas armadas con acero llegan a su punto de fluencia con momento creciente y que a partir del punto de fluencia mantienen un momento casi constante hasta la falla del elemento. Esto se produce debido a que el acero posee la propiedad de ser un material dúctil pudiendo someterse a grandes deformaciones antes de su rotura, este comportamiento se observa de manera más evidenciable observando el diagrama de Tensión-Deformación de este material.

Por otra parte, las vigas armadas con el material de PRFV destacan un comportamiento lineal hasta su rotura, esto se explica principalmente por el hecho de que estas barras se caracterizan por ser materiales resistentes que no presentan deformaciones plásticas y, por tanto, no alcanzan el límite elástico del material.

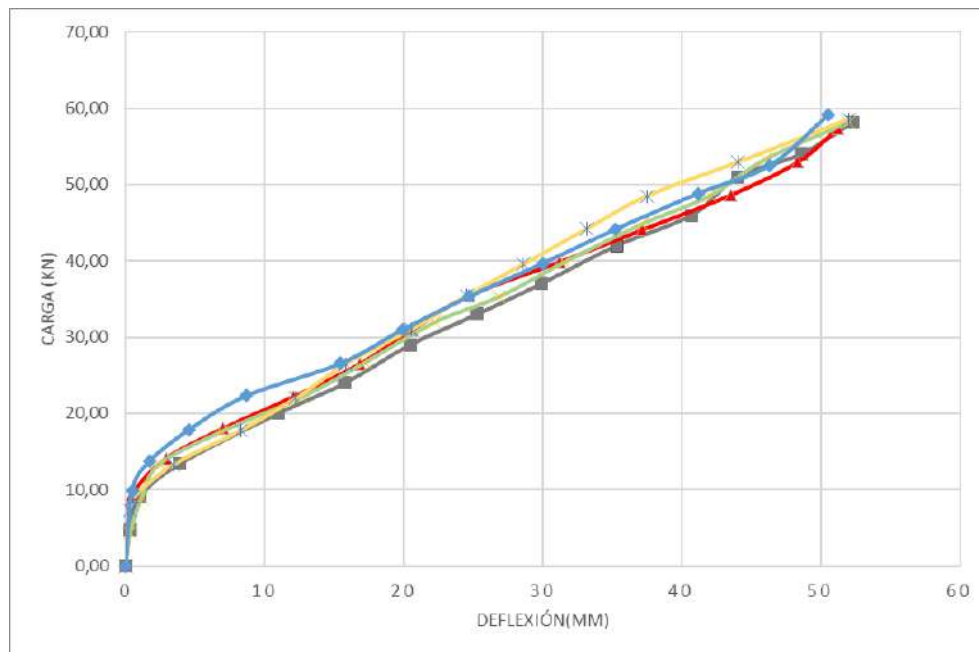
La carga de fisuración es menor en relación a las vigas armadas con aceros. Esta característica particular presentes en los ensayos de las vigas armadas con las barras de PRFV de se debe a que este material posee un módulo de elasticidad menor (50 Gpa - PRFV, 200 Gpa - Acero) ocasionando que la viga experimente grandes deformaciones antes de alcanzar su carga de rotura, esto genera la aparición de fisuras en el hormigón a poca carga.

Durante los ensayos llevados a cabo, se evidenciaron variaciones en el comportamiento de cada viga analizada. Estos resultados se emplearon para generar diagramas de Carga-Deflexión, los cuales ilustran el impacto generado por dichas cargas al aplicarse.



**Figura 6.** Diagrama Carga - Deflexión del acero.

*Fuente: Elaboración propia.*



**Figura 7.** Diagrama Carga - Deflexión del PRFV.

*Fuente: Elaboración propia.*

La **Figura 6.** muestra el comportamiento característico del acero donde se aprecian tres etapas en el comportamiento de este material. En la primera etapa establece una relación inicialmente lineal y proporcional entre la carga aplicada y la deformación de flexión de la viga de acero, esto se mantiene hasta llegar al punto de fisuración bajo carga. La etapa siguiente inicia desde el punto de fisuración hasta el momento en que el acero alcanza el límite de su comportamiento elástico. Finalmente, la viga se encuentra sometida a cargas debido al comportamiento de fluencia plástica del acero hasta que ocurre su rotura. En esta etapa la resistencia del acero disminuye gradualmente debido al adelgazamiento de las secciones transversales y al endurecimiento por deformación, por lo que el material se vuelve más susceptible a la deformación y es capaz de resistir menos carga.

A diferencia del comportamiento elasto-plástico del acero, el diagrama Carga - Deflexión del PRFV evidencia la hipótesis de que las vigas presentan una respuesta lineal hasta la rotura. Esta conducta descrita en la **Figura 7.** En la etapa inicial es similar a la del acero, por lo que, basándonos en los ensayos experimentales, se afirma que las vigas independientemente del tipo de material utilizado para su construcción desarrollan una semejanza en el comportamiento hasta el momento en que aparecen las fisuras. Finalmente, una vez fisurada la viga, se aprecia que adquiere una pendiente mínima y la recta se vuelve más horizontal en el diagrama, lo cual indica que el espécimen sigue aguantando carga pero con una deflexión cada vez mayor. Lo anteriormente expuesto se mantiene hasta el punto de rotura de las barras. Cabe mencionar que el

PRFV exhibe un comportamiento más frágil que el acero, ya que tiende a experimentar una falla catastrófica sin una deformación plástica previa.

Por otra parte, se adjunta la **Tabla 7** donde se presentan las mediciones realizadas con una carga de 44,40 kN (100 Bar) para comparar las deflexiones existente en un punto en específico y así observar de manera más evidente lo mencionado anteriormente en el comportamiento de las vigas de PRFV:

DEFLEXIONES CRITICAS			
Tipo	Código	$\Delta$ (mm)	$\Delta f$ (mm)
Acero	1	8,34	9,32
	2	9,48	9,48
	3	8,45	9,57
PRFV	4	41,13	-
	5	40,69	-
	6	37,11	-
	7	37,14	-
	8	33,16	-

**Tabla 7.** Deflexiones medidas a los 44,40 kN (100 Bar).

*Fuente: Elaboración propia.*

La **Tabla 7.** expone que las deflexiones producidas para la misma carga tienen un incremento que se torna alrededor del 400% para las vigas armadas con PRFV. La diferencia considerable que presentan las lecturas de los deflectores entre un espécimen y otro en la carga indicada se debe principalmente a las propiedades que caracterizan a las barras de polímero, la cual indica la poca rigidez que forman este material en conjunto con el hormigón, lo que provoca grandes deflexiones en la viga.

En el presente estudio, la influencia del anclaje en los extremos no fue considerada debido a que múltiples investigaciones previas han indicado lo siguiente: Sánchez (2019) “El hecho de usar ganchos en los extremos del armado permiten al elemento desarrollar su capacidad máxima con una menor deflexión del elemento estructural, así como un comportamiento ante la carga más gradual y uniforme; en tanto que el omitir dicho gancho origina que el corrimiento del armado genere una mayor elongación hasta la falla. No obstante, se pudo observar que la resistencia máxima de carga fue muy similar”. Esta deducción es adoptada para el desarrollo de la investigación.

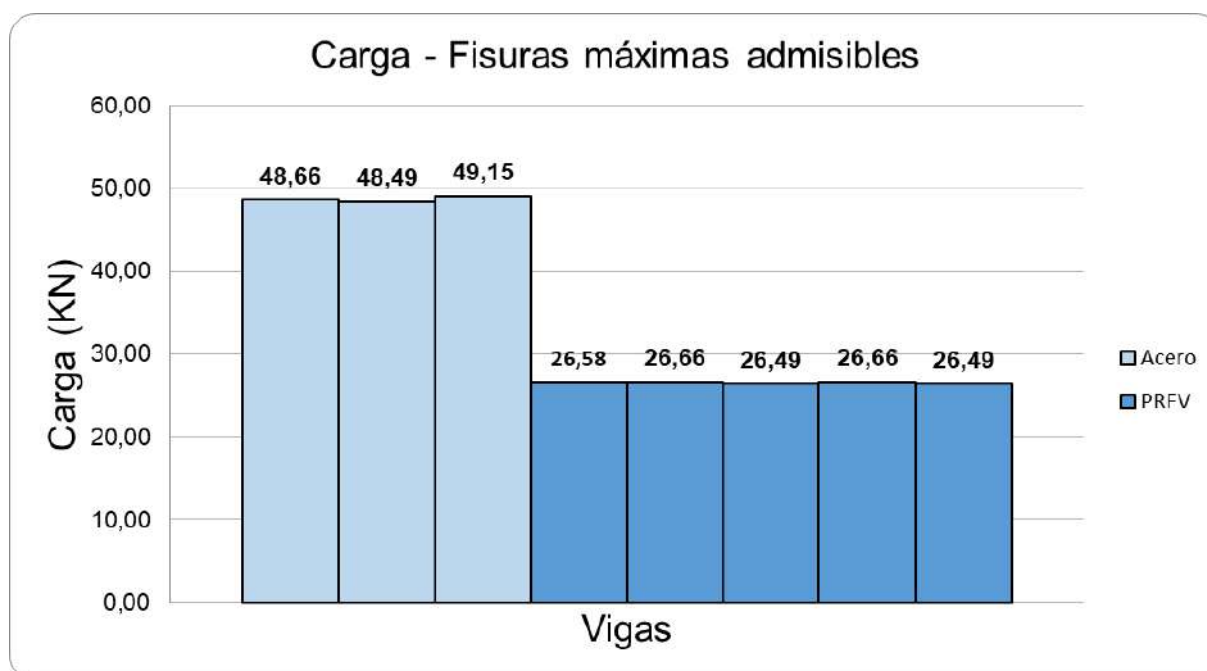
#### 4.1.2.2. AGRIETAMIENTO.

El agrietamiento en vigas armadas con PRFV es un fenómeno que debe ser analizado debido a la relevancia que exhibe al momento del diseño de una viga, la importancia radica en que afecta en la seguridad, durabilidad y el comportamiento adecuado a lo largo de su vida útil.

##### 4.1.2.2.1. AGRIETAMIENTO ADMISIBLE.

En vigas armadas con barras de acero los valores que la **ACI 318S - 11** propone es un ancho de grieta máximo aproximado de (0.40 mm), teniendo en cuenta que este valor es propuesto en base a la corrosión que sufre el reforzamiento, esto permite que valores mayores sean aceptados al momento de utilizar las barras de PRFV. Los valores admisibles máximos permitidos indicados en la **ACI 440.1R-15** varían entre (0.50 para ambientes agresivos y 0.70 mm para ambientes menos agresivos).

Por lo cual, atendiendo las recomendaciones de las normas citadas se presenta la **Figura 8**, donde se evalúan las cargas que generan la aparición de estas fisuras en su estado admisible máximo.



**Figura 8.** Fisuras máximas admisibles para 0.40 mm (Acero) y 0.70 mm (PRFV).

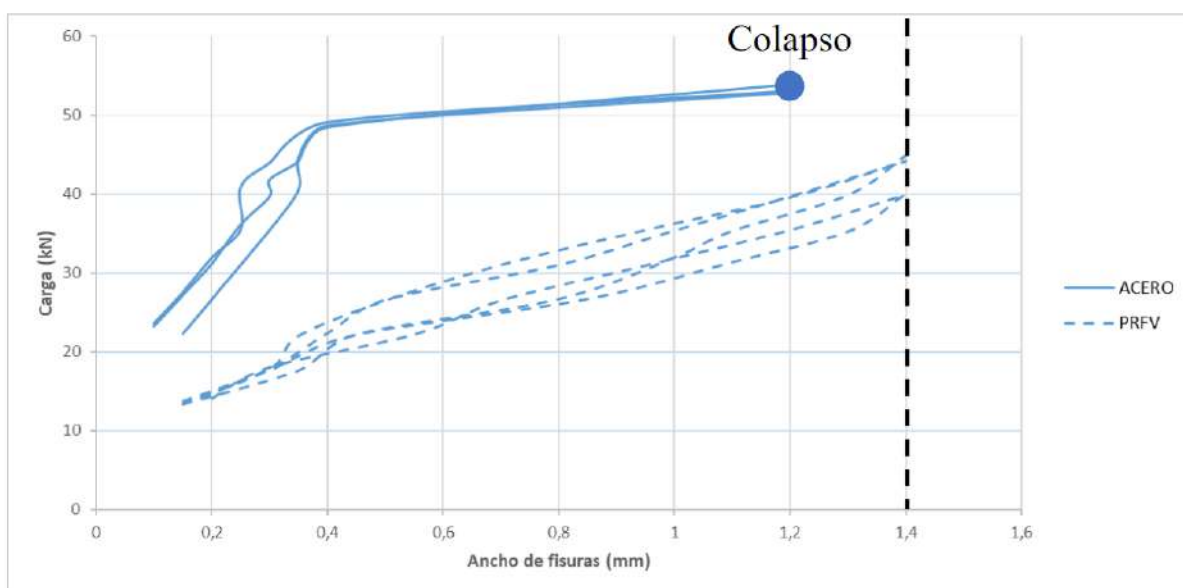
*Fuente: Elaboración propia.*

En el gráfico se observa que para las vigas de acero, la tolerancia de apertura máxima admisible es alcanzada a mayor carga aplicada que para las vigas de PRFV, esto nos indica que al ser construidas las vigas con acero, el módulo de elasticidad mayor de este material convierte a la

viga en un elemento más rígido por lo cual es necesario la aplicación de mayores cargas para provocar la deformación y por ende la aparición de fisuras en el hormigón. Entendiendo además que, aun utilizando una tolerancia mayor en el agrietamiento de las vigas construidas con PRFV, estas alcanzan sus límites a menor capacidad de carga debido a que sufren una excesiva deformación genera que el agrietamiento sea más crítico y de mayor espaciamiento en comparación a las vigas conformadas con acero.

#### 4.1.2.2.2. ANCHO DE AGRIETAMIENTO.

Para este análisis se presenta la **Figura 9**, donde se encuentran el comportamiento de estas al momento de realizar los ensayos. Se han establecido niveles de carga en donde se llevó a cabo la inspección de la fisuración para cada nivel, así como la apertura de cada fisura utilizando un instrumento (fisurómetro).



**Figura 9.** Evolución del ancho máximo de fisuras durante la aplicación de carga.

*Fuente: Elaboración propia.*

El gráfico nos permite comentar que las primeras fisuras están presentes en las vigas de PRFV, estas fisuras describen un comportamiento exponencial por lo que aumentan significativamente a razón de la aplicación de las cargas. Este comportamiento se mantiene hasta el colapso de la estructura.

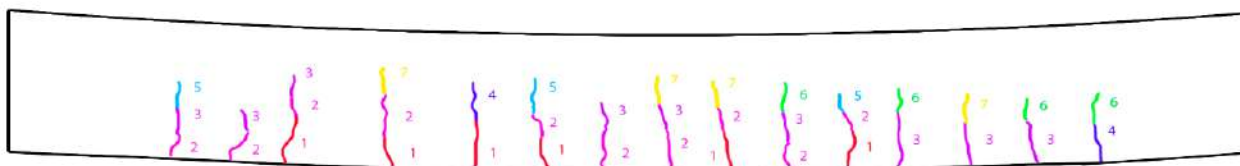
Las fisuras en las vigas de acero necesitan de mayor carga para su aparición y una vez presentes tienen un comportamiento gradual por lo que no se generan saltos importantes al momento de la aplicación gradual de las cargas. Este comportamiento se mantiene hasta el punto en el cual se

alcanza el límite de fluencia del material por lo que se producen deformaciones plásticas y consecuentemente fisuras de mayor tamaño bajo la carga aplicada.

#### 4.1.2.2.3. PATRÓN DE AGRIETAMIENTO.

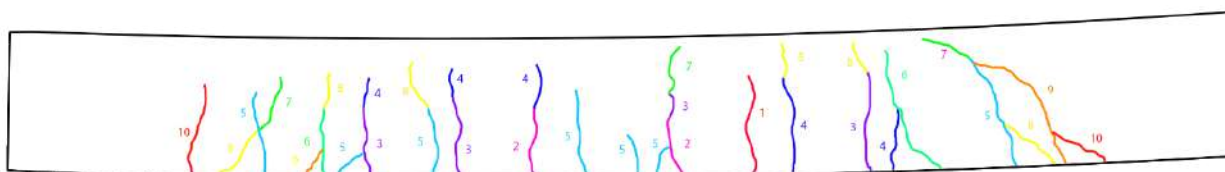
En este apartado se describen las observaciones detalladas sobre la ubicación y extensión de las fisuras y se plantean posibles causas que podrían haber contribuido a su aparición. Se busca comprender la naturaleza de estas fisuras y su posible influencia en el rendimiento estructural de las vigas de PRFV.

Durante la realización de los ensayos a flexión, se llevaron a cabo observaciones minuciosas para detectar cualquier aparición de fisuras y agrietamientos en las vigas. El sistema de carga se basó en la aplicación de manera gradual cada 10 bar donde se registraron y documentaron todas las fisuras incluyendo la abertura que presentaron cada una de ellas, este proceso se mantuvo hasta la aparición de la última fisura. Una vez que ya no se detectaron nuevas fisuras se prosiguió a realizar mediciones de las aberturas con el fisurómetro el cual permite registrar fisuras de hasta 1.4 mm.



**Figura 10.** Secuencia de la aparición de fisuras en vigas de acero.

*Fuente: Elaboración propia.*



**Figura 11.** Secuencia de la aparición de fisuras en vigas de PRFV.

*Fuente: Elaboración propia.*

Las figuras expuestas representan los patrones de fisuración que se producen en las vigas ensayadas hasta el colapso. En las vigas de acero las fisuras aparecen inicialmente en la zona de flexión pura, que corresponde al tercio medio de la viga y luego en los tercios externos. Estas

fisuras se extienden desde la zona de mayores esfuerzos a tracción que sería la parte inferior de la viga y se propagan verticalmente hacia arriba.

El crecimiento de estas fisuras está regulado por el acero de refuerzo longitudinal de flexión ubicado en la región crítica de la viga. Este acero de refuerzo no solo controla el ancho de las fisuras, sino que también ayuda prevenir el desplazamiento del eje neutro en dirección ascendente. Esto genera que las fisuras no se desarrollen de manera considerable por lo que una vez alcanzada la línea del eje neutro dejan de prolongarse por la viga.

En las vigas de PRFV a diferencia de las vigas de acero aparecen fisuras inclinadas en los tercios extremos debido a la influencia del esfuerzo cortante en dichos tramos. En cuanto aparecen las primeras fisuras, las deformaciones por flexión crecen más rápidamente lo que produce fisuras más largas en comparación a las vigas de acero que se propagan en dirección a los puntos de aplicación de las cargas

Un comportamiento interesante de las vigas de PRFV es que tienen la capacidad de recuperar su forma original después de aplicar una carga, pero pueden presentar pequeñas fisuras como resultado de la deformación cíclica. Por otro lado, el acero no recupera completamente su forma original y puede experimentar una deformación plástica permanente, además de ser susceptible a la corrosión.

#### **4.2. ANÁLISIS ECONÓMICO.**

Para el análisis económico se presupone que los materiales serán utilizados en cantidades significativas o en volúmenes elevados. Esta consideración se adopta debido a que se supone irrelevante el análisis cuando se trata de cantidades mínimas.

Se presentan los precios actuales en los que se adquieren las barras de acero y PRFV. Se adjuntan también los precios de los estribos las cuales para la solicitud de las mismas se realizaron en base a una estimación de cantidad de 100 unidades. Cabe destacar que en el estudio solo se utilizaron barras de Ø8 mm y Ø6 mm.

VARILLA PRFV (POLÍMERO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO)			
Empresa (Proveedor)	Diámetros	Precio en gs. (por m)	Precio en gs. (tira de 12 ml)
IMPA S. A.	4 mm	1.600	19.200
	6 mm	2.800	33.600
	8 mm	4.600	55.200
	10 mm	6.840	82.080
	12 mm	12.000	144.000
VARILLA ACERO			
FERRETERI A BARTOMEU	4 mm	917	11.000
	6 mm	2.375	28.500
	8 mm	3.750	45.000
	10 mm	5.667	68.000
	12 mm	8.333	100.000

**Tabla 8.** Precios por diámetro de las varillas.

*Elaboración: Propia*

Item	Descripción	Unidad	Cantidad	P. unitario (USD)	P. total (USD)
	Opción aérea				
1	Estribo PRFV Ø8 mm Longitud de estribo: 0,7 m Plazo de entre 20 - 25 días	1	100	38	3800
	Opción marítima				
2	Estribo PRFV Ø8 mm Longitud de estribo: 0,7 m Plazo de entre 65 - 70 días	1	100	15	1500

**Tabla 9.** Precios estribos PRFV.

*Fuente: Elaboración propia.*

El análisis se basa en realizar la comparativa entre los costos que conlleva la utilización de cada uno de los materiales, el transporte y mantenimiento de la estructura en caso de ser necesario.

Se observa en la **Tabla 8.** el costo por metro lineal de las varillas de PRFV y acero donde destaca un mayor valor para las barras de PRFV.

Para la construcción de una viga se utilizaron 5 barras de 2 metros de longitud con un diámetro Ø8 mm, estas barras fueron ubicados recorriendo la sección longitudinal de la viga para su respectivo análisis a flexión. Realizando la cotización que necesita para armar las vigas con estas disposiciones se encuentra que:

- a) Las barras de PRFV son utilizados en cantidad de 10 metros en total para una viga, esta cantidad de barra utilizada tendría un coste de 46.000 GS.
- b) Al igual que las barras de polímero la cantidad de acero utilizado es la misma (10 metros) para la fabricación de la viga, con un coste de 37.500 GS.

Esto representa un incremento del 20% en el costo para la sustitución de las varillas de acero, además, se debe tener en cuenta el costo de transporte necesario para el traslado de ambos materiales, en este caso, las barras de polímero cuentan con la ventaja de ser más ligeros en comparación a las barras de acero por lo que un vehículo de menor porte es necesario lo que disminuye así el coste de traslado, por otra parte, las vigas de acero son densas y pesadas, lo que puede generar costos más altos de transporte y manipulación en el sitio de construcción.

La decisión de no optar por el estribo de PRFV en comparación con el de acero se basó principalmente en el factor del precio. El estribo de acero basándonos en la **Tabla 9.** tendría un costo aproximado de 1500 gs c/u.

El estribo de PRFV actualmente no se encuentra en distribución en nuestro país, esto genera altos costes al solicitar presupuestos a las empresas encargadas de la importación del material. La **Tabla 9.** presenta los costes que se tendría al momento de la importación de los estribos de PRFV, dependiendo del tipo de flete elegido se observa un precio significativamente más alto 15 \$ (aprox. 111.000 gs - marítima) o 38 \$ (aprox. 277.000 gs - aérea) en relación a los costes que se obtendría si se optara por utilizar estribos fabricados con acero. Aunque el estribo de PRFV puede ofrecer ventajas en términos de resistencia y durabilidad, su precio significativamente más elevado genera que en la actualidad se descarten este tipo de refuerzos.

## 5. CAPÍTULO V.

### 5.1. CONCLUSIONES.

Después de obtener los resultados se tiene un conocimiento más profundo de la realidad problema estudiada, en este caso en particular se señalan a continuación algunas apreciaciones finales:

- Sustentados en los ensayos realizados se puede afirmar que, la sustitución directa de las barras de acero por las barras de PRFV no es ideal, esto debido al contraste en las propiedades de uno u otro material, entre los que predominan el módulo de elasticidad.
- Para el diseño de estructuras de hormigón utilizando barras de PRFV, la deflexión se convierte en un criterio de diseño crítico, ya que se observó que las vigas exhibieron mayor deflexión en comparación a las vigas de acero. Por lo tanto, es fundamental considerar la deflexión máxima permitida para garantizar la integridad estructural y el comportamiento adecuado de las vigas reforzadas con PRFV.
- Al optar por la utilización de este material, se deberá de dar una relevancia sustancial en el comportamiento que presentan las fisuras al momento de realizar el diseño en la estructura.
- Se ha determinado que el uso del PRFV presenta un incremento mínimo en el costo de la fabricación de las vigas. Esto es el resultado de la falta de fabricación actual de este material en nuestro país. Sin embargo, considerando los costos de mantenimiento puede resultar más económico a largo plazo.

### 5.2. RECOMENDACIONES.

En vista de los resultados y conclusiones obtenidos a lo largo de este proyecto final de grado, se derivan una serie de recomendaciones que buscan enriquecer y fortalecer tanto la ejecución actual como el potencial desarrollo futuro de este trabajo. A continuación, se detallan las recomendaciones más relevantes:

- Investigar la influencia de la ductilidad y la deflexión en diferentes elementos estructurales reforzados con varillas PRFV, como zapatas armadas, pilotes y losas.
- Realizar un estudio sobre el uso de las varillas PRFV en pavimentos rígidos.

## 6. CAPÍTULO VI.

### 6.1. BIBLIOGRAFÍA.

- ACI Comité 440.1R-15. (2015). *“Guía para el Diseño y Construcción de Hormigón Estructural Reforzado con Barras de Fibra Reforzada Polimérica (FRP)”*. Farmington Hills: Instituto Americano del Hormigón.
- Almerich Chulia, A. I. (2010). *Diseño, Según Estados Límites, De Estructuras De Hormigón Armado Con Redondos De Fibra De Vidrio GFRP* (Tesis). Valencia.
- Alonso B. et al. (2011). *“Manual de materiales de obras civiles Tomo I – Volumen II”*. Asunción: Litocolor.
- Lalvay Llivigañay, B. H. (2017). *“Análisis, Comportamiento y Comparación de Varillas Corrugadas en Fibra de Vidrio, con Relación a las Varillas Convencionales; Conjuntamente en Elementos Estructurales de Hormigón”* (Tesis). Cuenca, Ecuador.
- Mendieta Lezcano, F. A., & Peralta Iriarte, V. B. (2020). *“Evaluación experimental y computacional del comportamiento a la flexión de vigas de hormigón armado híbrido (acero – PRFV)”* (Tesis). San Lorenzo, Paraguay.
- NP 4 007 99. (2015). *“Barras de acero conformadas, laminadas en caliente, para armaduras en estructuras de hormigón”*. Asunción: Instituto Nacional de Tecnología.
- Rivadeneira Benítez, G. F. (2016). *“Correlación entre vigas de hormigón armadas con varillas de acero y con varillas de fibra reforzada con polímero FRP sometidas a esfuerzos en los tercios del claro”* (Tesis). Quito: Universidad Central del Ecuador.
- Vila Carbajal, E. G. (2019). *“Análisis comparativo del comportamiento estructural en flexión, entre vigas reforzadas con varillas de vidrio frente a las reforzadas con acero”* (Tesis). Lima, Perú.

## 7. CAPÍTULO VII.

### 7.1. ANEXO 1 - MEMÓRIA DE CÁLCULO.

<p><b>Datos</b></p> <p><math>L=200</math> cm</p> <p><math>b=15</math> cm</p> <p><math>r=2</math> cm</p> <p><math>f_{ck}=30</math> MPa</p> <p><math>\gamma_{HA}=25 \frac{kN}{m^3}</math></p> <p><math>\gamma_G=1,2</math></p>		<p><math>d=h-r=18</math> cm</p> <p><math>E_c=210</math> GPa</p> <p><math>E_f=50</math> GPa</p> <p><math>L_{viga}=200</math> cm</p> <p><math>Q=15</math> KN</p>
<p><b>Paso 1. Análisis estático.</b></p> <p><math>M_{MAX}=Q * a = 9,375</math> kNm ...Momento máximo</p> <p><math>RA = 15</math> kN... Reacción en A</p> <p><math>RB = 15</math> kN... Reacción en B</p>	<p><b>Paso 2. Predimensionamiento.</b></p> <p><math>h_{pred} = \frac{L_{viga}}{10} = 20</math> cm... Altura de predimensionado.</p> <p><math>b=15</math> cm... Base adoptada.</p>	
<p><b>Paso 3. Análisis de cargas.</b></p> <p><math>q_s = b * h_{pred} * \gamma_{HA} = 0,75 \frac{KN}{m}</math> ... Carga de servicio.</p> <p><math>q_d = b * h_{pred} * \gamma_{HA} * \gamma_G = 0,90 \frac{KN}{m}</math> ... Carga de diseño.</p>	<p><b>Paso 4. Recubrimiento Mecánico.</b></p> <p><math>rec_{geo} = 2</math> cm... Recubrimiento geométrico.</p> <p><math>\Phi_l = 0.8</math> cm... Diámetro de la varilla longitudinal.</p> <p><math>\Phi_e = 0.6</math> cm... Diámetro del estribo.</p> <p><math>r_{mec} = \left( rec_{geo} + \Phi_e + \frac{\Phi_l}{2} \right) = 4</math> cm</p>	
<p><b>Paso 5. Verificación al canto mínimo.</b></p> <p><math>k = 2,21</math>... si <math>f_{ck} \leq 30</math> MPa</p> <p><math>d_{min} = k * \sqrt{\frac{M_{max}}{b * f'c}} = 10.08</math> cm</p> <p><math>h_{min} = d_{min} + r_{mec} = 14.08</math> cm</p> <p><math>h_{min} \leq h_{pred}</math> ... Verifica.</p> <p>Entonces se tiene que... <math>h_{adop} = 20</math> cm</p> <p><math>d = h_{adop} - r_{mec} = 16</math> cm... Canto útil.</p>	<p><b>Paso 6. Verificación de la flecha.</b></p> <p><math>f = \frac{L_{viga}}{18,5} = 10,81</math> cm... Flecha de la viga.</p> <p>Debido a que <math>f \leq h_{adop}</math> ...verifica la flecha.</p>	

Fotografía 1. Memoria de cálculo página 1.

**Paso 7. Cálculos de la armadura.**

Dimensionamiento de armadura longitudinal.

$$f_y = 500 \text{ MPa}$$

$$A_{s_{min}} = \frac{\sqrt{f_{ck}}}{4 \cdot f_y} \cdot d \cdot b < \frac{1,4 \cdot b \cdot d}{f_y}$$

$$A_{s_{min}} = 0,672 \text{ cm}^2 \dots \text{Armadura mínima.}$$

$\phi = 0,90$ ...Factor de reducción de la resistencia.

$$R_n = \frac{M_{max}}{\phi \cdot b \cdot d^2} \quad \text{y}$$

$$\rho = \frac{0,85 \cdot f_{ck}}{f_y} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot R_n}{0,85 \cdot f_{ck}}} \right)$$

$$A_{s_{req}} = \frac{\rho \cdot b \cdot d}{1 \text{ m}} = 1,38 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} \quad \dots \text{Área de acero requerido.}$$

Una vez obtenido el  $A_{s_{req}}$  se eligen las el diámetro de las barras que cumplan con este requisito, pudiendo elegir entre las opciones siguientes:

$\varnothing$ (mm)	As (cm <sup>2</sup> )	Peso kg/ml
6	0,28	0,22
8	0,50	0,39
10	0,79	0,62
12	1,13	0,89
16	2,01	1,58
20	3,14	2,47
25	4,91	3,85

Según lo mencionado anteriormente se adoptaron 3  $\varnothing 8$  mm con una distancia entre

barras aisladas y consecutivas de 3,7 cm cumpliendo con los requisitos de área de acero mínimo debido a que esta configuración supondría una cantidad de acero adoptado de:

$$A_{s_{adop}} = 1,50 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} \quad \dots \text{Área de acero adoptado.}$$

**Paso 8. Determinación de resistencia al corte del hormigón**

$\phi_{corte} = 0,75$  ... Factor de reducción.

$V_u = 15 \text{ kN}$  ... Fuerza cortante

$$V_{s_{max}} = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_1 \cdot d = 87,6356 \text{ kN}$$

$V_s < V_{s_{max}}$  La sección del hormigón es suficiente

$$A_{v_{minS}} = \frac{\sqrt{f_{ck}} \cdot b}{16 \cdot f_y} < \frac{b}{16 \cdot f_y} = 0,99 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} \dots$$

Acero mínimo requerido para el esfuerzo cortante.

$$V_{s_{min}} = A_{v_{minS}} \cdot f_y \cdot d = 7,92 \text{ kN}$$

Cortante mínima.

**Paso 9. Separación máxima y cuantía mínima.**

$$S_{max} = V_s < \frac{\sqrt{f_{ck}} \cdot b \cdot d}{3} \rightarrow \text{Min}\left(\frac{d}{2}; 40 \text{ cm}\right)$$

$$S_{max} = V_s \geq \frac{\sqrt{f_{ck}} \cdot b \cdot d}{3} \rightarrow \text{Min}\left(\frac{d}{2}; 20 \text{ cm}\right)$$

$$S_{max} = 8 \text{ cm.}$$

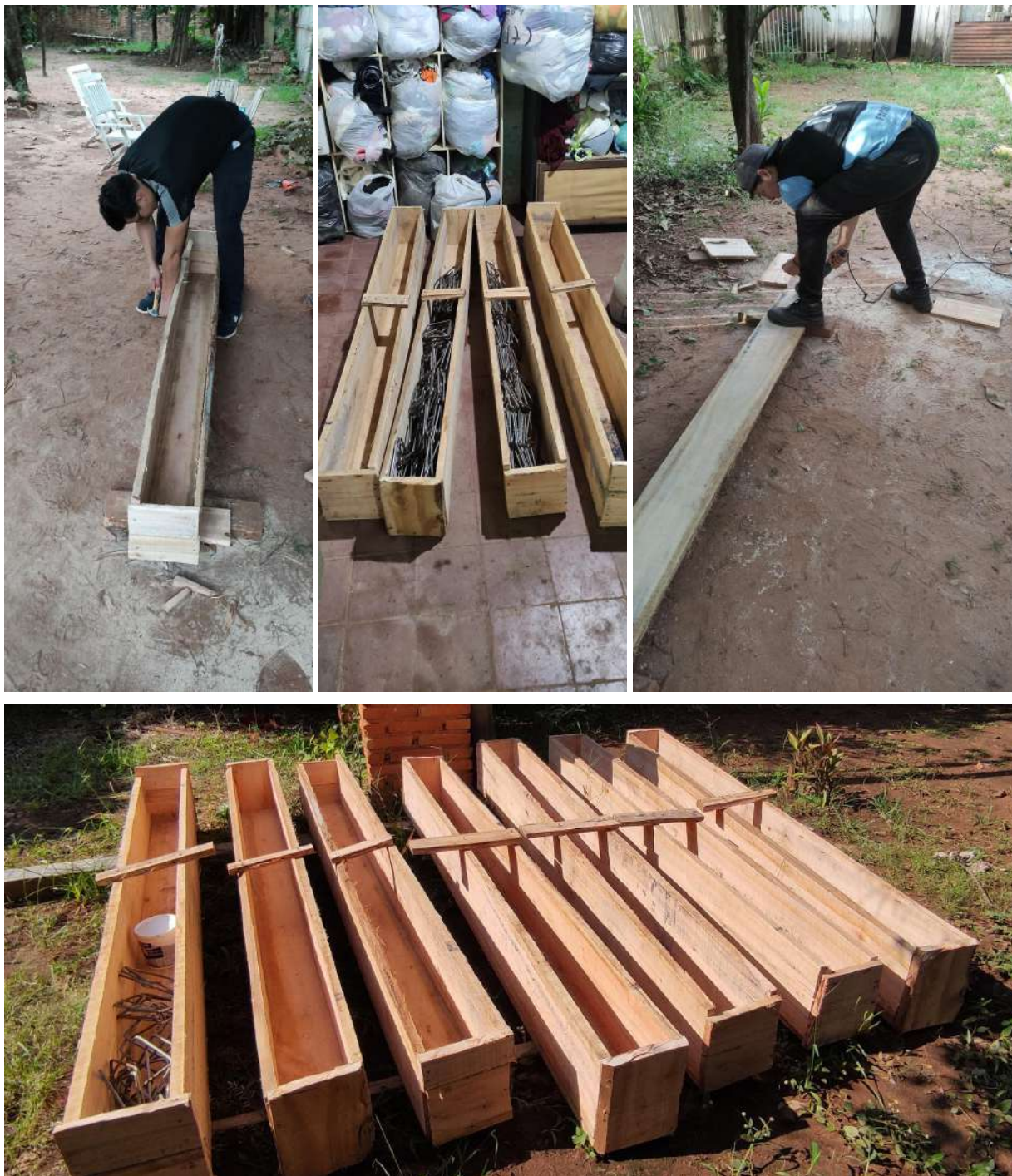
**Fotografía 2.** Memoria de cálculo página 2.

A continuación, se determina el diámetro del estribo requerido según el área requerida calculada  $A_{v_{min.S}} = 0.99 \frac{cm^2}{m}$  utilizando

la tabla de varillas comerciales disponibles mencionadas anteriormente y se detalla el armado.

Fotografía 3. Memoria de cálculo página 3.

## 7.2. ANEXO 2 - PREPARACIÓN DE ENCOFRADO.



Fotografía 4. Preparación de encofrado.



**Fotografía 5.** Detalle de armado para vigas armadas con PRFV.



**Fotografía 6.** Aplicación de aceite para desencofrante.



**Fotografía 7.** Proceso de vibrado en cargamento de vigas.



**Fotografía 8.** Pileta de curado para especímenes de vigas.

7.3. ANEXO 3 - ENSAYOS.



Fotografía 9. Pórtico metálico para ensayo en vigas a flexión.



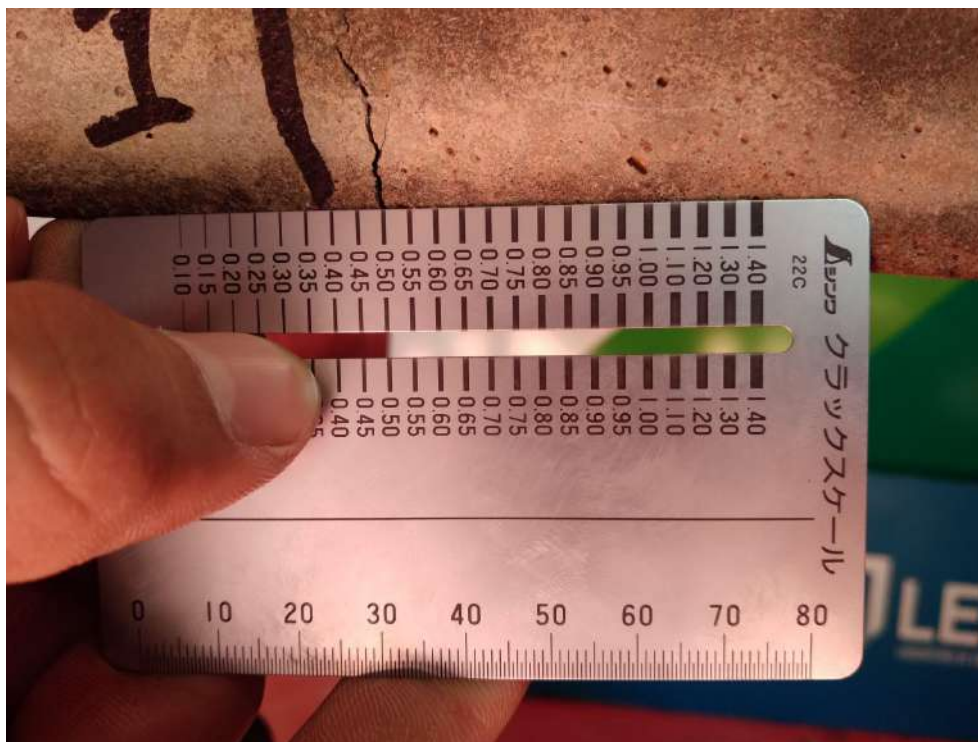
Fotografía 10. Prensa hidráulica.



Fotografía 11. Manómetro digital.



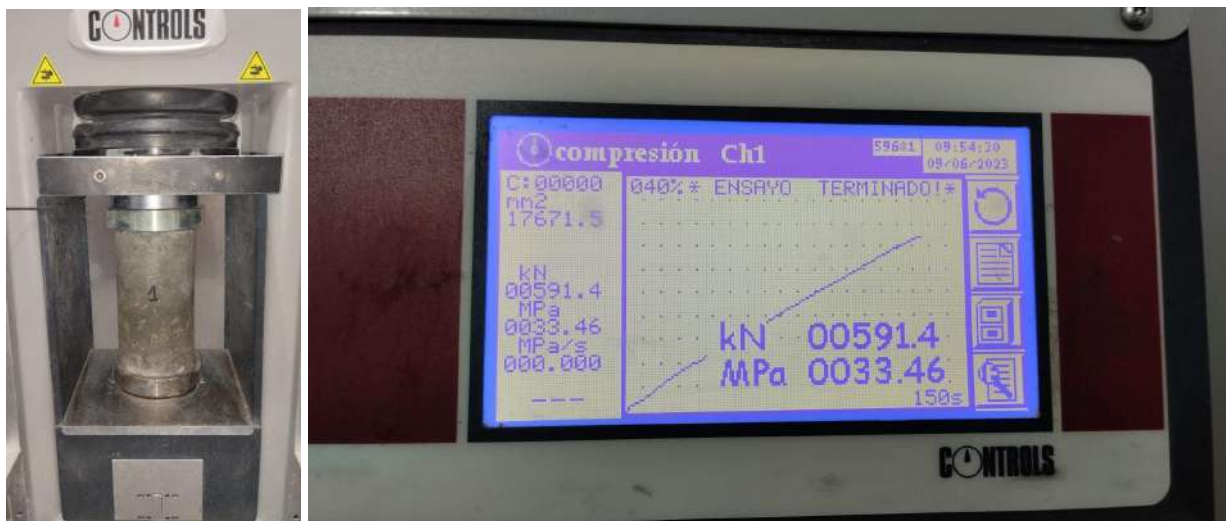
Fotografía 12. Deflectómetro digital.



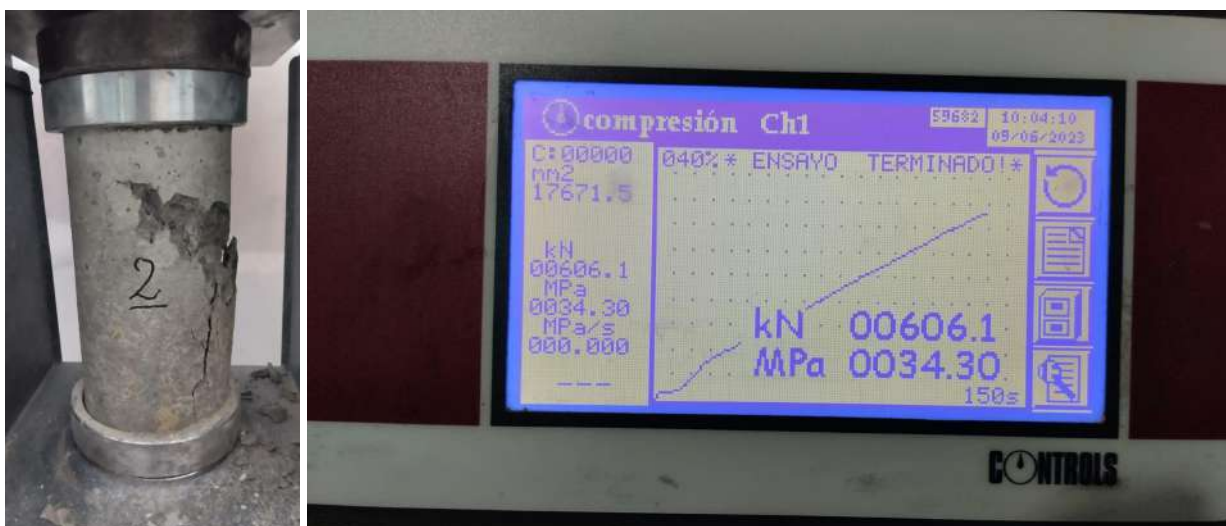
Fotografía 13. Fisurómetro



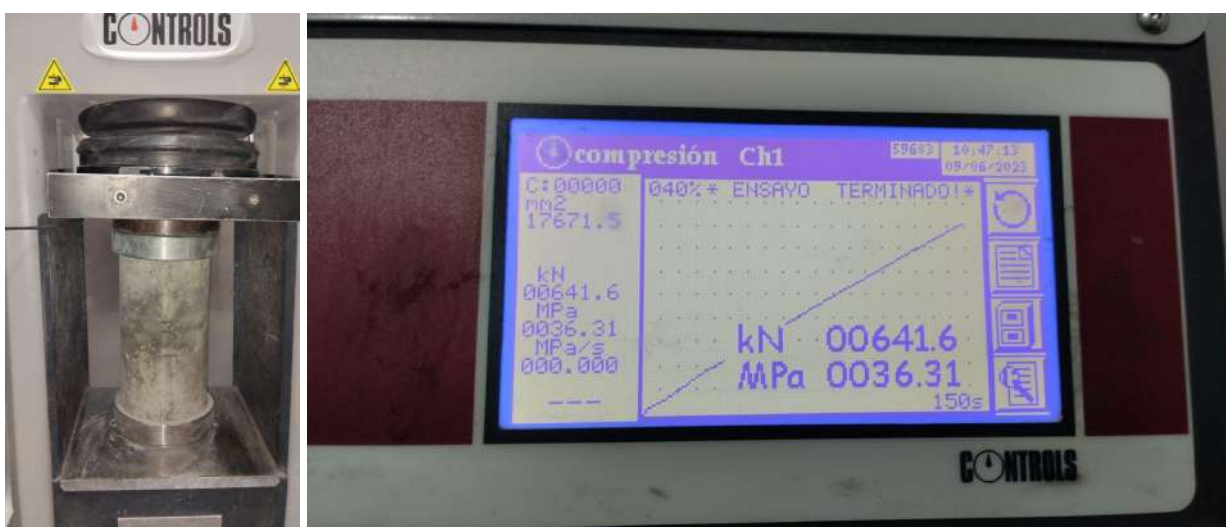
Fotografía 14. Vigas y probetas a ensayar.



Fotografía 15. Ensayo a compresión en probeta 1. Carga de rotura 591,4 KN.



Fotografía 16. Ensayo a compresión en probeta 2. Carga de rotura 606,1 KN.



Fotografía 17. Ensayo a compresión en probeta 3. Carga de rotura 641,6 KN.



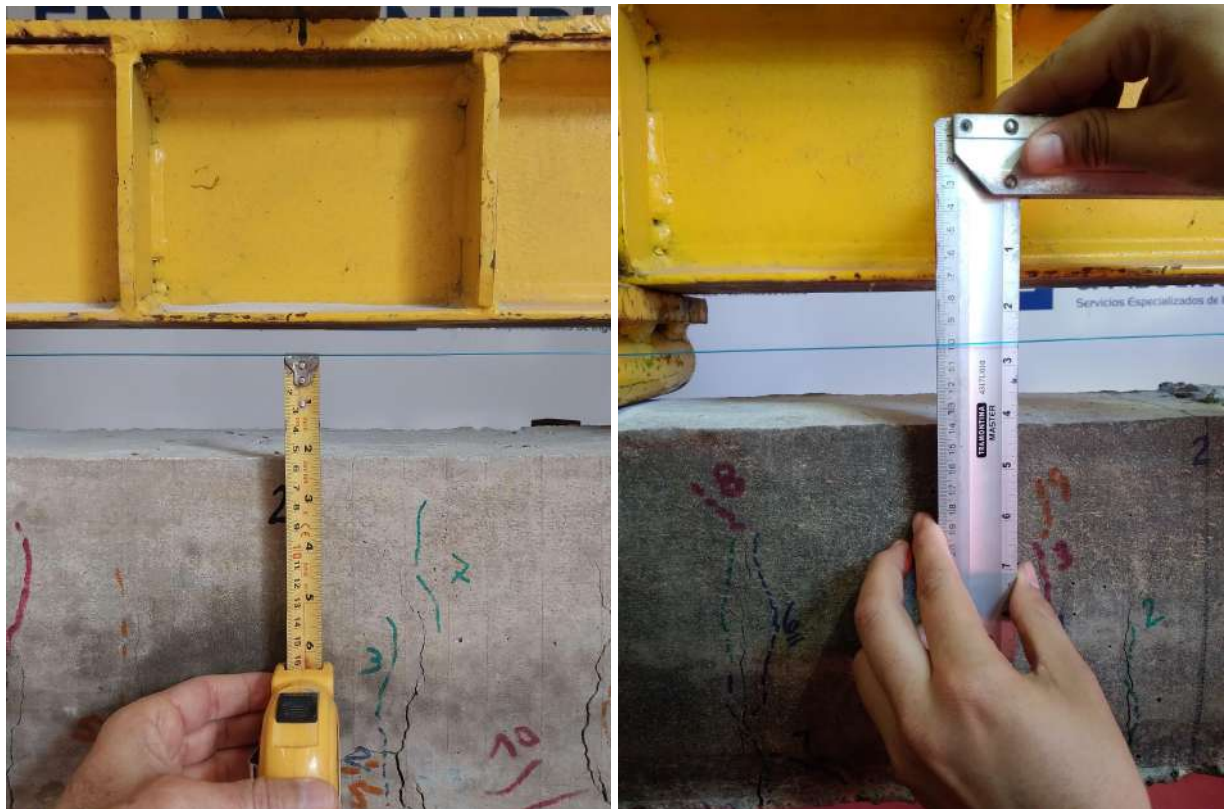
**Fotografía 18.** Esquema de fisuras en viga con refuerzo de acero.



**Fotografía 19.** Esquema de fisuras en viga con refuerzo de PRFV.



Fotografía 20. Verificación de deflexión en viga armada con acero.



**Fotografía 21.** Verificación de deflexión en viga armada con PRFV.



**Fotografía 22.** Medición y control del comportamiento de fisuras en especímenes de vigas.



**Fotografía 23.** Falla por aplastamiento y rotura de PRFV.



**Fotografía 24.** Falla por aplastamiento. Viga con refuerzo de PRFV.

7.4. ANEXO 4 - GASTOS

**GRUPO BARTOMEU S.A.**

PROF. JUAN A. BENITEZ Y SILVIO PETTIROSSI  
Tel: 0521 202 332

Presupuesto Nro: 009-001-0019140  
(SIN VALIDEZ CONTABLE)  
Fecha: 17/04/2023 - 14:55  
Orden Nro.:  
Condición: 1 CONTADOS (ORIGINAL)

Cliente : 1 IMPORTES CONSOLIDADOS  
Dirección :  
Teléfono : (CORONEL OVIEDO)  
RUC: 44444401-7  
Vendedor: 4 JUAN SAMUDIO

Item	Código	Cantidad	Descripción del Producto	Prc. Unit.	Total
1	000003	3.00	VARILLA ACER BRAG DE 08MM	46,000	138,000
<b>IMPORTE TOTAL (I.V.A. Incluido)</b>					<b>138,000</b>

Son Guaraníes: CIENTO TREINTA Y OCHO MIL.  
SR. CLIENTE: CONTROLE SUS MERCADERIAS AL RECIBIRLAS. LA EMPRESA NO RECONOCE RECLAMOS POSTERIORES.

PAGADO

---

Vendedor: JUAN SAMUDIO

**EL ARTE S.A.C.I.**  
Hierros en General - Planchales  
Ángulos - Varillas - Chapas Lisas Galvanizadas y Negras  
Cables Negros y Galvanizados  
FABRICACIÓN DE CHAPAS ACANALADAS, PERFILES U-C  
elartesaoci@hotmail.com

CENTRAL: Mecl. Estigarribia 1381 c/ Monday  
Tel. (0521) 202 181 Telefax: (0521) 202 739  
Cnel. Oviedo / Paraguay

SUCURSAL: Ruta 7 Nº 1.701 (Km. 178)  
y Enrique Vera a una cuadra de la Terminal  
Telefax: (0522) 4340 - Caaguazú / Paraguay

SUCURSAL 2: Ruta Nº 8 Dr. Blas Garay  
c/ Boulevard Yegros (0981) 000 338  
Vitónica - Paraguay

TIMBRADO Nº 16049758  
001-001-89100  
10:50:37  
Nº 001-001-0089100

Fecha Inicio Vigencia: 28/11/2022  
Fecha Fin Vigencia: 30/11/2023  
RUC: 80028819-0

FACTURA

Fecha de Emisión: 14 DE ABRIL DE 2023

Condición de Venta: Contado  Crédito

Nombre o Razón Social: (59513)- JUNIOR CARLOS IGNACIO BARRETO MARTINEZ

RUC: 4609453-9

Dirección: -

Vendedor: VENTADOMI

Referencia: ( )

Remisión: PRES. NIT: 203374

Código	Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Exentas	IVA 5%	IVA 10%
3701	12 Lin	VARILLA CONF. GR 06 MM C660 BIRDAU	25,000			300,000

PAGADO  
EL ARTE S.A.C.I.

Estimado Cliente, verifique sus mercaderías antes de retirarse del local. No se aceptan cambios ni devoluciones.  
El Arte Saco no garantiza la uniformidad de la tonalidad de colores en Chapas galvanizadas-pre-pintadas, Cero raso de pvc, ya que la variación es inevitable y se origina en el proveedor de materia prima.

<b>VALOR PARCIAL</b>	Total aproximado Kg: 32.64	300,000
<b>TOTAL A PAGAR</b>	Guaraníes: TRESCIENTOS MIL	Gs. 300.000
<b>LIQUIDACIÓN DEL IVA:</b>	(5%) Gs. 0 (10%) Gs. 27.273	<b>TOTAL IVA: Gs. 27.273</b>

RECIBI CONFORME Nombre: ( ) FIRMA: C.I.Nº

Estimado Cliente: Verifique sus mercaderías antes de retirarse del local. No se aceptan reclamos ni devoluciones posteriores.

\* ORIGINAL (BLANCO); ADQUIRENTE - COPIA (AMARILLO); ARCHIVO TRIBUTARIO COPIA (CELESTE); CONTABILIDAD (NO VÁLIDO FI CREDITO FISCAL)

Fotografía 25. Comprobante de compra en barras de acero.

**Impa s.a.**  
 Comercio al Por Mayor de otros productos N.C.P.  
 Campo Acaval c/ Cnel. Benitez Vera  
 Cel. 0981 553 318  
 Mariano R. Alonso - Paraguay

Timbrado N° 15977499  
 Fecha Inicio Vigencia: 25/10/2022  
 Fecha Fin Vigencia: 31/10/2023  
 RUC: 80101024-1  
**FACTURA**  
 N°001-002- 0000956

FECHA DE EMISION: 28/03/2023      CONDICION DE VENTA: CONTADO  CREDITO

NOMBRE O RAZON SOCIAL: Fabio Vargas Martinez      VENCIMIENTO:

RUC O CEDULA DE IDENTIDAD: 880193-2      NOTA DE REMISION N°:

DIRECCION:      TELEFONO:

CANT.	DESCRIPCION	Prec. Unit.	VALOR DE VENTAS		
			EXENTAS	GRAVADAS 5%	GRAVADAS 10%
1	Varilla Armastel 8mm	230.000			230.000
SUB TOTALES					230.000
TOTAL A PAGAR (En letras): Doscientos treinta mil.			230.000	*	
LIQUIDACION DEL I.V.A. (5%)		(10%) 20.909	TOTAL IVA: 20.909		

**PUNTO-CREATIVO DIGITAL S.r.l.** RUC: 80066219-0 / Hda. N° 2004 - Av. Dr. Guido Boggiani 5671 c/ Sudelmann - Asunción / Paraguay. Tel.: 021-698 235 / 021-413590 - 04 Tel. 503 del 826 1 025.

ORIGINAL: Cliente  
 DUPLICADO: ARCHIVO TRIBUTARIO  
 TRIPPLICADO: CONTABILIDAD (No valido como credito fiscal)

Fotografia 26. Comprobante de compra en varillas de PRFV.

**FERRIZAR S.A.**  
 Tu Ferriteria  
 VENTAS AL POR MAYOR Y MENOR  
 ferizar@gmail.com  
 1 de Marzo c/ Dr. Jara - Tel.: (0521)202 411  
 Coronel Oviedo, Paraguay

Timbrado N°: 15620947  
 Fecha Inicio Vigencia: 11/05/2022  
 Fecha Fin Vigencia: 31/05/2023  
 RUC: 80055339 - 0  
**FACTURA**  
 N°001-006- 0117046

FECHA DE EMISION: 05/05/2023      CONDICION DE VENTA: CONTADO  CREDITO

R.U.C.I.C.I.N°: xxx-      NOTA DE REMISION N°: ( 118 )

NOMBRE O RAZON SOCIAL: SIN NOMBRE (1) JUNIOR      TELF.:

DIRECCION:

CANT.	DESCRIPCION	PRECIO UNITARIO	VALOR DE VENTA		
			EXENTAS	5 %	10 %
1,0	Ud (885)Carpa naranja 4x5m Lonita	190.000	0	0	190.000
SUB-TOTAL					190.000
TOTAL A PAGAR CIENTO NOVENTA MIL					65 190.000
LIQUIDACION DEL IVA: (5%)		(10%) 17.273	TOTAL IVA: 17.273		

ENTREGADO 05 MAY 2023  
 PAGADO Muchas Gracias

**FERRIZAR S.A.** - DUBLICACION N° 188 - RUC: 80055339 - AV. LUIS ALVARO DE CEBALLOS 1000 - CORONEL OVIEDO, PARAGUAY. TEL: 021 413 590 - 04 TEL: 503 DEL 826 1 025

ORIGINAL (Cliente): CUENTE - COPIA (Cliente): ARCH. TRIBUTARIO

Fotografia 27. Comprobante en la compra de lona para la elaboración de pileta de curado.

**LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES Y CONTROL DE OBRAS**

**EMCO**

Soldada Ovalar N° 1027 entre Asunción y Palma  
Tel.: (021) 528 179 - Fndo. de la Mora, Paraguay

- de Sergio Gavilán -

N° DE TIMBRADO: 14461270  
E.I.V.: 07/06/2023 - VÁLIDO: 30/06/2024  
**RUC: 1844111 - 4**  
**FACTURA**  
N° 001-002-000001254

---

Fecha de Emisión: 15 JUNIO 2023      Condiciones de Venta: Contado  Crédito

Nombre o Razón Social: FABIO VARGAS      Nota de Remisión N°:

RUC o C.I.: 880193-2      Teléfono:

Dirección: DIRECCION.....

Cod.	Cant.	DESCRIPCIÓN	Precio Unitario	VAYENOS VENTAS		
				Exentas	Grav. 5 %	Grav. 10 %
993	6	ENSAYOS DE VIGAS A FLEXIÓN EN 3 PUNTOS.-	200.000			1.200.000
993	2	ENSAYOS DE VIGAS A FLEXIÓN EN 3 PUNTOS.-	250.000			500.000
822	3	ENSAYOS A COMPRESIÓN DE PROBETAS DE HORMIGÓN ARMADO EN LABORATORIO.-	30.000			90.000
<b>SUB-TOTALES</b>						1.790.000
<b>TOTAL A PAGAR</b>			GUARANIES UN MILLON SETECIENTOS NOVENTA MIL			1.790.000

Liquidación del IVA (5%) Gs. (10%) Gs.

**TOTAL IVA:Gs.**

DUPLICADO: ASES. Tributario

GRAFICINTER S.R.L. - Rca. Francesa N° 1051 4/Petroleros  
 Del 1251 al 1300

Fotografía 28. Comprobante de gastos para ensayos.