

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**Análisis teórico/experimental de vigas reforzadas con PRFV y acero:
Comportamiento estructural a flexión y de optimización de costos en
refuerzos**

Tesis presentada por los Bachilleres:

Arenas Zegarra, Mauricio Sebastian

ORCID: 0009-0004-9802-1375

Casapia Vargas, Neyder Renzo

ORCID: 0009-0001-6948-7545

Para optar al Título Profesional de Ingeniero Civil

Asesor:

Mg. Bustamante Mora, Boris Andre

ORCID: 0000-0002-7612-315X

Arequipa - Perú

2025

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA CIVIL

TITULACIÓN CON TESIS

Dictamen Aprobación de Borrador

Arequipa, 13 de Junio del 2025

Dictamen: 011568-C-EPIC-2025

Visto el borrador del expediente 011568, presentado por:

2017800641 - CASAPIA VARGAS NEYDER RENZO

2017204161 - ARENAS ZEGARRA MAURICIO SEBASTIAN

Titulado:

**ANÁLISIS TEÓRICO / EXPERIMENTAL DE VIGAS REFORZADAS CON PRFV Y ACERO:
COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL A FLEXION Y DE OPTIMIZACIÓN DE COSTOS EN
REFUERZOS**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

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

INGENIERO CIVIL

**46735424 - LOAYZA RODRIGUEZ JOSE GERMAN
DICTAMINADOR**



**71256920 - TORRES ALMIRON JENIFFER CARLA
DICTAMINADOR**



**46309156 - MONTOYA VILLANUEVA FILIBERTO RODY
DICTAMINADOR**



Análisis teórico / experimental de vigas reforzadas con PRFV y acero: Comportamiento estructural a flexion y de optimización de costos en refuerzos

INFORME DE ORIGINALIDAD

8%

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
2	www.pubiabm.com.py Fuente de Internet	1%
3	Submitted to Universidad Tecnologica de los Andes Trabajo del estudiante	1%
4	doku.pub Fuente de Internet	1%
5	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	1%
6	rcc.cujae.edu.cu Fuente de Internet	1%
7	dokumen.pub Fuente de Internet	1%
8	epdf.pub Fuente de Internet	1%

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Apagado

DEDICATORIA

En primer lugar, a nuestro padre celestial por brindarme la vida, la fortaleza y la oportunidad de vivir esta experiencia tan significativa en mi formación profesional.

Dirigido a mis progenitores, por su presencia constante, su amor incondicional y por ser mi mayor inspiración a lo largo de este camino.

A toda mi familia, por hacer parte de este camino y porque desde siempre fueron mi pilar.

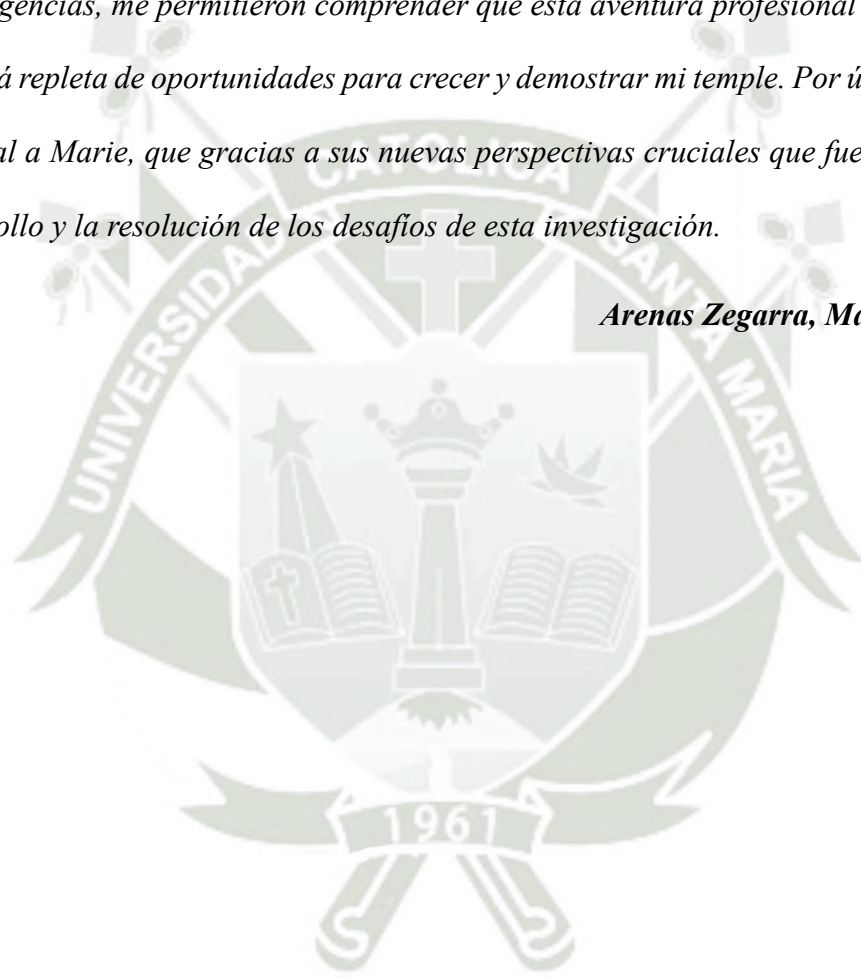
Y finalmente, a todas las personas que, de una u otra manera, corrieron a mi lado durante este proceso. Su compañía, enseñanzas y gestos de cariño van a ser parte de mi vida siempre. Gracias.

Casapía Vargas, Neyder Renzo

DEDICATORIA

Mi más profundo agradecimiento a todas aquellas almas generosas que iluminaron mi camino con su bondad y alegría durante este proceso. Agradezco también a quienes, con sus exigencias, me permitieron comprender que esta aventura profesional apenas comienza y estará repleta de oportunidades para crecer y demostrar mi temple. Por último, mi gratitud especial a Marie, que gracias a sus nuevas perspectivas cruciales que fueron clave para el desarrollo y la resolución de los desafíos de esta investigación.

Arenas Zegarra, Mauricio Sebastián



RESUMEN

La presente investigación evalúa el comportamiento estructural de vigas de concreto reforzadas con barras de polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV), barras de acero corrugado grado 60 y una combinación híbrida de ambos materiales.

El objetivo principal fue determinar si el refuerzo híbrido mejora la resistencia a flexión sin comprometer la ductilidad, y si representa una alternativa eficaz técnicamente y económica.

Para ello, se realizaron análisis teóricos mediante cálculos manuales y software estructural, complementados con ensayos experimentales a flexión en laboratorio. Dado que el equipo disponible no permitió medir la ductilidad de manera directa, se recurrió a analizar de gráficas momento-curvatura, cuyos resultados fueron consistentes con los cálculos manuales. Se concluyó que el refuerzo híbrido, con una cuantía alta cerca al valor máximo, su ductilidad mejora, aunque su resistencia disminuye con respecto al refuerzo de acero. Además, se evidenció una reducción aproximada del 15% en los costos de materiales con el uso de PRFV, gracias a su ligereza y facilidad de instalación se presume que el ahorro sea mucho mayor considerando mejoras de rendimientos. Finalmente, se recomienda profundizar en el estudio de otros elementos estructurales, considerar ensayos con sensores para medir deformaciones precisas, y aplicar análisis de costo-beneficio en condiciones reales de obra, lo que permitirá validar y optimizar el uso del PRFV como alternativa estructural.

Palabras claves: Vigas, PRFV, acero, resistencia a la flexión, refuerzo híbrido

ABSTRACT

This research evaluates the structural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymer (GRP) bars, grade 60 corrugated steel bars, and a hybrid combination of both materials.

The main objective was to determine whether hybrid reinforcement improves flexural strength without compromising ductility and whether it represents an efficient alternative in technical and economic terms.

To achieve this, theoretical analyses were conducted using manual calculations and structural software, complemented by experimental flexural tests in the laboratory. Since the available equipment did not allow for direct ductility measurement, moment-curvature graph analysis was employed, with results consistent with manual calculations.

It was concluded that hybrid reinforcement, with a high reinforcement ratio close to the maximum value, improves ductility, although its strength decreases compared to steel reinforcement. Additionally, an approximate 15% reduction in material costs was observed with the use of GRP. Due to its lightweight and ease of installation, it is presumed that savings could be even greater when considering improved performance.

Finally, it is recommended to further study other structural elements, consider testing with sensors to measure precise deformations, and conduct cost-benefit analyses under real construction conditions, which would allow for validation and optimization of FRP use as a structural alternative.

Keywords: Beams, PRFV, steel, flexural strength, hybrid reinforcement

ÍNDICE

DEDICATORIA	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1. Planteamiento del problema	2
1.1. Formulación del Problema.....	2
1.2. Justificación de la investigación.....	5
1.3. Alcances y limitaciones	6
1.3.1. Alcances.....	6
1.3.2. Limitaciones	6
1.4. Problema.....	8
1.4.1. Problema General	8
1.4.2. Problema Específico	8
1.5. Hipótesis	8
1.5.1. Hipótesis General	8
1.5.2. Hipótesis Específicas.....	8
1.6. Objetivos de Investigación	9
1.6.1 Objetivo General.....	9
1.6.2 Objetivos Específicos	9
1.7. Variables	9
1.7.1. Independiente.....	9
1.7.2. Dependiente	9
1.7.3. Operacionalización de Variables y/o Matriz de Categorización.....	10
CAPÍTULO II.....	13

2.1. Matriz de Estado del Arte	13
2.2. Marco Teórico.....	15
2.2.1. Antecedentes de Investigación.....	15
2.2.1.1.. Antecedentes Internacionales	15
2.1.1.2. Antecedentes Nacionales	17
2.2.2. Bases teóricas	18
2.2.2.1. Tipos de materiales	18
2.2.2.2. Polímero Reforzado con Fibras (PRF)	19
2.2.2.4. Corrosión	21
2.2.2.5. Recubrimiento	22
2.2.2.6. Método de Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD)	22
2.2.2.7. Factor de reducción	23
2.2.2.8. Tipos de fallas en los elementos sometidos a flexión pura.....	23
2.2.2.9. Esfuerzo	24
2.2.2.10. Deformación unitaria.....	25
2.2.2.11. Diagrama esfuerzo-deformación	25
CAPÍTULO III	26
METODOLOGÍA.....	26
3.1 Metodología.....	26
3.1.1 Tipo de Investigación	26
3.1.2 Diseño de investigación.....	26
3.1.3 Materiales y lugar de ejecución.....	26
3.1.4 Población, muestra y muestreo	27
3.1.5 Metodología de investigación.....	29
3.1.6 Diagrama de flujo	30
3.1.7 Aspectos éticos	32

CAPÍTULO IV	33
RESULTADOS.....	33
4.1 Introducción.....	33
4.1.1 Método de diseño	33
4.1.2 Secuencia de los pasos realizados	34
4.1.3 Método de diseño	40
4.1.4 Hipótesis básicas de diseño	40
4.1.5 Cálculo de resistencia a la flexión	41
4.1.6 Tipos de fallas.....	42
4.1.7 Determinación de cuantías.....	43
4.1.8 Factores de reducción	47
4.2 Cálculo de resistencia a la flexión en vigas con diferentes refuerzos	49
4.2.1 Vigas con refuerzo de acero - (MRA)	49
4.2.2 Vigas con refuerzo de polímero reforzado con fibra de vidrio.....	49
4.2.3 Cálculo del Momento resistente a la flexión	50
4.2.4 Vigas con refuerzo híbrido - (MRH)	52
4.3 Procedimiento del armado de vigas para ensayos	57
4.4 Presentación de variables.....	60
4.5 Resultados de ensayos validados	62
4.6 Resultados de ejercicios teóricos de viabilidad	63
4.7 Análisis comparativo	66
4.7.1 Costos	66
4.7.2 Resistencia	67
4.7.3 Ductilidad	69
CAPÍTULO V.....	71
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71

Conclusión General	71
Conclusiones Especifico.....	71
RECOMENDACIONES	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Desglose por areas de investigación	4
Tabla 2 Matriz de Categorización	10
Tabla 3 Matriz de Estado del Arte	13
Tabla 4 Resistencia promedio	34
Tabla 5 Tamaño máximo nominal	34
Tabla 6 Volumen del agua.....	35
Tabla 7 Contenido del aire	35
Tabla 8 Relación agua/ cemento	36
Tabla 9 Volumen del agregado.....	37
Tabla 10 Resumen de ecuaciones	46
Tabla 11 Cuantías máximas – Refuerzo de acero	47
Tabla 12 Valores.....	50
Tabla 13 Resultados de resistencia a la compresión de las probetas de concreto.....	60
Tabla 14 Comparación de precios de varillas de acero y el polímero reforzado con fibras de vidrio (PRFV) según su diámetro	61
Tabla 15 Comparación de resultados entre vigas virtuales y ensayadas: resistencia, costo y ductilidad	64
Tabla 16 Resultados teóricos de viabilidad estructural y económica en modelos a escala real con refuerzo de acero, polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) e híbrido	65
Tabla 17 Beneficio en Costo.....	66
Tabla 18 Resumen porcentual del ahorro en costos de refuerzo al usar polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) o combinaciones híbridas en comparación con el acero corrugado	67
Tabla 19 Resumen de momentos resistentes teóricos y experimentales.....	68
Tabla 20 Comparación porcentual del momento flector.....	69
Tabla 21 Porcentaje comparativo de curvaturas entre modelos.....	69

Tabla 22 Porcentaje comparativo de curvaturas entre modelos..... 70



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Daños y fallas de las estructuras por corrosión.....	3
Figura 2 Daños y fallas de las estructuras por corrosión.....	30
Figura 3 Bloque de Whitney.....	41
Figura 4 Diagrama esfuerzo-Curvatura para los distintos tipos de fallas en flexión.....	43
Figura 5 Cuantía limite.....	45
Figura 6 Factor de reducción de refuerzos de acero según su tipo de falla.....	47
Figura 7 Factor de reducción de refuerzos de PRVF según su tipo de falla.....	48
Figura 8 Grafico esfuerzo deformación del acero y el polímero reforzado con fibras de vidrio (PRFV)	52
Figura 9 Distribución del esfuerzo y de la deformación para una sección rectangular.....	53
Figura 10 Esquema del ensayo de flexión para vigas reforzadas	58
Figura 11 Comparación gráfica de los costos unitarios de varillas corrugadas de acero y el polímero reforzado con fibras de vidrio (PRFV) según el diámetro	61
Figura 12 Detalle de las secciones transversales de las vigas ensayadas con refuerzo de acero, polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) e híbrido	62
Figura 13 Detalle de las secciones teóricas modeladas para análisis estructural con refuerzo de acero, polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) e híbrido	62
Figura 14 Comparación de costo unitario por metro lineal de refuerzo según tipo de viga ensayada.....	66
Figura 15 Comparación del costo unitario del refuerzo en las vigas teóricas con acero, polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) e híbrido.....	66
Figura 16 Comparación de resistencias: laboratorio, cálculo manual y software	67
Figura 17 Resumen de momentos resistentes teóricos y experimentales.....	68
Figura 18 Comparación de curvaturas para evaluar ductilidad entre resultados manuales y de cálculo de software	69
Figura 19 Comparación de la curvatura entre resultados manuales y de software	70

INTRODUCCIÓN

El diseño estructural de elementos como vigas es crucial en la ingeniería civil, y la búsqueda constante de innovaciones que mejoren su rendimiento y eficiencia es fundamental para garantizar la seguridad y la durabilidad de las estructuras. Integrando barras de polímero reforzado con fibras de vidrio (PRFV), una tecnología emergente que promete ofrecer características excepcionales en términos de resistencia y durabilidad.

La creciente demanda de soluciones estructurales más sostenibles y eficientes ha impulsado la exploración de materiales avanzados, y los polímeros reforzados con fibras de vidrio se presentan como una opción prometedora en la ingeniería civil. La combinación de polímeros de alta resistencia con fibras proporciona propiedades mecánicas superiores y una mayor capacidad de carga, por ello podremos diseñar la viga para el momento solicitado, pero a un costo menor, al tiempo que reduce el peso de la estructura y mejora la resistencia a la corrosión.

El propósito principal de este trabajo investigativo es estudiar el comportamiento teórico/experimental del diseño de una viga con refuerzo híbrido con barras de polímero reforzado con fibras de vidrio PRFV y acero que mejore la resistencia a la flexión, aprovechando las propiedades mecánicas de ambos materiales, considerando no solo las particularidades mecánicas inherentes de estos materiales, sino también su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga y entorno. Se busca, así, proporcionar a los ingenieros y diseñadores una herramienta precisa y aplicable para llevar a cabo un diseño eficiente y seguro de vigas con refuerzo híbrido, aprovechando al máximo las ventajas de los materiales compuestos.

A través de revisión de literatura especializada, simulaciones computacionales y análisis exhaustivo de pruebas experimentales, se pretende establecer un fundamento sólido para el diseño óptimo de una viga con refuerzo híbrido con barras de polímero reforzado con fibras de vidrio PRFV, con la finalidad de contribuir al desarrollo de estudios en el área de las estructuras híbridas y promoviendo la adopción responsable de tecnologías innovadoras en la ingeniería estructural.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1. Planteamiento del problema

1.1. Formulación del Problema

Globalmente las infraestructuras se basan principalmente en estructuras fabricadas con concreto armado, reconocido como el material primordial, esto se debe a sus destacadas características de índole mecánica y física, así como su accesibilidad económica. Este compuesto se compone de estribos de acero de refuerzo y barras longitudinales, recubiertos por una matriz de concreto, formando la base de numerosas edificaciones. Las proyecciones para el crecimiento habitacional sugieren la necesidad de una evolución hacia construcciones más complejas. Para alcanzar este objetivo, es imperativo minimizar los fallos, centrándose especialmente en la durabilidad de las estructuras. En consecuencia, resulta esencial evaluar y reducir los defectos mediante alternativas eficientes (Stupenengo, 2011).

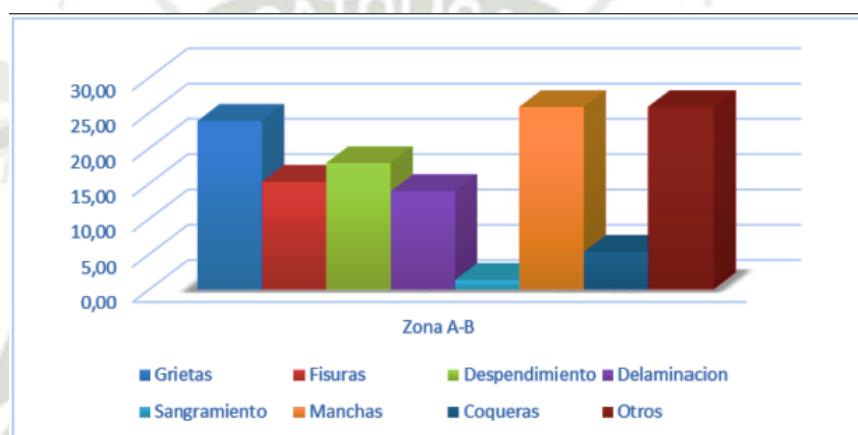
Las estructuras de concreto armado se encuentran expuestas a una gran variedad de daños y fallas producto del mismo uso como de ataques del ambiente, siendo el daño principal la corrosión que se presenta en el concreto reforzado, el cual llega a ocasionar inconvenientes en la estructura en función a la durabilidad y seguridad generando a su vez costos elevados por concepto de reparación (Peña et al., 2023). Por lo que, según Díaz y Vega (2021) refieren que una estructura de concreto armado y la corrosión constante del acero corrugado se presenta como un desafío crítico en la Ingeniería Civil, dado al impacto que tiene sobre la durabilidad e integridad estructural. Los autores destacan que, en entornos agresivos, como las zonas costeras con mayor humedad, la exposición a agentes corrosivos acelera este proceso, comprometiendo la capacidad y la durabilidad de estas estructuras.

Lo antes expuesto se debe a que tanto el Co_2 como la humedad penetran los poros del concreto y reaccionan químicamente, formando carbonatos. Estos, al debilitar la barrera química del acero, facilitan la corrosión por humedad, generando expansión y grietas uniformes en toda la estructura. Los cloruros, comunes en ambientes marinos, provocan picaduras profundas y aleatorias, aumentando la retención de humedad y el riesgo de

corrosión en el acero de refuerzo, especialmente en construcciones informales que suelen omitir el recubrimiento mínimo (Conexión Cinvestav, 2020).

En un estudio realizado en Latinoamérica publicado en la Revista Gaceta Técnica, se evidencia que 116 estructuras presentaban daños y fallas de un total de 151 que conformaban el estudio lo que equivale a un 76.82% de edificaciones con síntomas de fallas por consecuencia de la corrosión. La mayoría de las fallas de los elementos estructurales se presentaron en los manchones, vigas y columnas. Los daños y fallas son detallados por los autores de la siguiente manera:

Figura 1 Daños y fallas de las estructuras por corrosión



Nota. Se evidencia los daños y fallas porcentualmente presentes en la zona de estudio. Tomado de (Peña et al., 2023).

En el Perú se utiliza predominantemente el concreto armado como método tradicional de construcción, el cual consiste en reforzar el concreto con barras y estribos de acero. Como es bien sabido, el concreto exhibe una notoria resistencia a las cargas de compresión, mientras que el acero proporciona resistencia a las fuerzas de tracción y corte. No obstante, ciertas estructuras de concreto armado suelen estar más expuestas que otras, especialmente en entornos agresivos como la zona costera de nuestro país, lo que las vuelve más susceptibles a problemas como la corrosión. Este fenómeno afecta significativamente la resistencia mecánica del elemento, disminuyendo su vida útil y su rendimiento ante cargas aplicadas (Bonić et al., 2015).

En un estudio realizado en edificaciones afectadas en tres zonas de la ciudad de Lima los investigadores detectaron que un 13.33% de las viviendas presentaban corrosión y un

24.44% presentaban un grado de corrosión grave, detallándose esta información en la siguiente tabla:

Tabla 1 *Desglose por áreas de investigación*

Ubicación	P.J. Primero de Mayo	P.J. Villa María	Urb. El Trapezio	PROMEDIOS
Zona	(Zona I)	(Zona II)	(Zona III)	TOTAL
Número de obras investigadas	15	15	15	45
Ausencia de corrosión	46.67%	33.33%	66.67%	48.89%
Presencia de óxido	6.67%	20.00%	13.33%	13.33%
Presencia de corrosión	13.33%	20.00%	6.67%	13.33%
Presencia grave de corrosión	33.33%	26.67%	13.33%	24.44%

Nota. Se evidencia porcentualmente los daños causados en los diversos elementos. Tomado de (Cerna et al., 2010).

Ante este panorama, la incorporación de barras de polímero reforzadas con fibras de vidrio (FRP) emerge como una solución prometedora para contrarrestar la corrosión, ofreciendo ventajas sobre el acero corrugado convencional. A pesar de su propensión a la falla frágil y su menor módulo de elasticidad, el desafío radica en concebir un diseño con refuerzo híbrido que maximice las virtudes de las barras de polímero FRP y, al mismo tiempo, mejore el módulo de elasticidad (Nanni, 2022).

Este enfoque integral busca solucionar el desafío de la corrosión, asegurando la funcionalidad y seguridad de las estructuras en entornos agresivos. La clave reside en alcanzar un equilibrio óptimo entre la resistencia a la corrosión y la ductilidad estructural en el diseño híbrido. El objetivo final es maximizar el tiempo de vida de las estructuras y minimizar gastos asociados a la rehabilitación o reforzamiento estructural, aprovechando la competitividad en precio de las barras de polímero y su facilidad de manejo debido a su menor peso.

1.2. Justificación de la investigación

Teórica

La realización de este trabajo investigativo propone mejorar el entendimiento sobre el comportamiento real de una viga con refuerzo híbrido aprovechando las múltiples ventajas del material PRFV y contrarrestando su principal desventaja como material frágil, utilizando el acero grado 60, contribuyendo así al desarrollo de nuevas teorías y conceptos en el diseño estructural.

Práctica

Las estructuras de concreto armado se ven gravemente afectadas al presentarse problemas corrosivos, estas pueden ser debido al ambiente, humedad, al no respetar el recubrimiento mínimo en estructuras de concreto armado, entre otras razones provocando un declive en su integridad y resistencia, por ello al diseñar vigas híbridas se va a lograr erradicar este problema puesto que las barras PRFV son anticorrosivas.

Según RPP (2021), en el estado peruano el 80% de casas son edificaciones informales y universo el 50% presentan altos índices de vulnerabilidad a un terremoto de alta magnitud.

La informalidad en las construcciones de casas en el Perú abarca muchas prácticas que no respetan los requerimientos mínimos instaurados por el Reglamento Nacional de Edificaciones

Social

Al plantearse el diseño de unas vigas con refuerzo híbrido y con ello evitar problemas de corrosión y conservar los beneficios de las barras de polímero reforzadas con fibra de vidrio (PRFV), no solo tendremos estructuras más resistentes sino más duraderas y seguras. Contribuyendo al bienestar de la sociedad al mejorar la resiliencia de las edificaciones ante eventos extremos, alargar su vida útil y alentar prácticas más amigables con el medio ambiente.

Económica

El enfoque económico será beneficiado, puesto que, aparte que las barras polímero reforzadas con fibras de vidrio (PRFV) son más económicas que las barras de acero corrugado grado 60.

Según el INEI, en el 2019, los gastos reparativos y conservación de las infraestructuras deteriorada por la corrosión alcanzaron un aproximado de 2,9 mil millones de soles, equivalente a 800 millones de dólares estadounidenses (Corrosión y protección, 2023).

El mayor beneficio económico se verá reflejado en la fase de ejecución, debido a que la maniobrabilidad que presentan por ser hasta 4 veces más ligeras que el acero convencional, nos ayudaría a reducir costos en mano de obra y a su vez en rendimiento, lo que se verá reflejado en el presupuesto final.

1.3. Alcances y limitaciones

1.3.1. Alcances

- El trabajo investigativo abarcará desde el cálculo teórico de resistencia a flexión hasta la recopilación y análisis de información de los hallazgos experimentales de ensayos de vigas de concreto armado reforzadas con acero, barras de polímero reforzadas con fibras de vidrio (PRFV) y un sistema híbrido.
- Los resultados teóricos esperados serán respaldados por fórmulas establecidas en las normativas internacionales para diseño de vigas reforzadas con acero y barras de polímero reforzadas con fibras de vidrio (PRFV).
- Con la finalidad de calcular la resistencia a la flexión de las vigas híbridas se van a establecer nuevas fórmulas tentativas en base a la bibliografía existente.

1.3.2. Limitaciones

- La selección de la resistencia a la compresión del concreto ($f'c$) y el área de refuerzo (A_s) estuvo condicionada por la capacidad máxima de carga del equipo de ensayo, el cual permite aplicar una fuerza máxima de 10 kN. Esta limitación restringió el uso de configuraciones con mayores cuantías de refuerzo híbrido, ya que un aumento en el refuerzo incrementaría la capacidad resistente de las vigas, superando el umbral de carga del equipo.
- Las vigas ensayadas estuvieron limitadas a una sección transversal de 15×15 cm, ya que esta es la medida máxima compatible con el equipo de ensayo del laboratorio.

Esta restricción impidió evaluar vigas de otras dimensiones que podrían presentar diferentes comportamientos estructurales.

- La investigación se enfocó exclusivamente en ensayos de flexión mediante carga en tres zonas, sin considerar otros tipos de solicitaciones estructurales como esfuerzos de corte, torsión o combinaciones de cargas.
- No se evaluaron el impacto de factores ambientales como humedad, temperatura, exposición a agentes químicos o cargas repetitivas (fatiga) sobre el desempeño del PRFV y el refuerzo híbrido.



1.4. Problema

1.4.1. Problema General

¿De qué manera mejora el comportamiento estructural a flexión y optimización de costos de vigas con refuerzo híbrido con polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) y acero?

1.4.2. Problema Específico

¿De qué manera el diseño de una viga con refuerzo híbrido mejorará la resistencia a flexión en comparación con una viga diseñada con refuerzo PRFV?

¿Debido a la alta resistencia a la tracción del PRFV disminuirá la cuantía total que necesite la viga bajo las mismas solicitaciones?

¿La viga con refuerzo híbrido disminuirá los costos de los refuerzos en comparación a un diseño convencional con acero?

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis General

El refuerzo híbrido de polímero reforzada con fibra de vidrio (PRFV) y acero en vigas de concreto armado mejora su comportamiento estructural a flexión, permitiendo una reducción en costos de refuerzo.

1.5.2. Hipótesis Específicas

El diseño de una viga con refuerzo híbrido mejorará la resistencia a flexión en comparación con una viga diseñada con refuerzo PRFV

La alta resistencia a la tracción del PRFV se disminuirá la cuantía total que necesite la viga bajo las mismas solicitaciones.

Los costos de los refuerzos de la viga reforzada con PRFV y acero disminuirá en comparación con un diseño convencional de una viga con refuerzo de acero.

1.6. Objetivos de Investigación

1.6.1 Objetivo General

Analizar comportamiento estructural a flexión y optimización de costos en refuerzos de manera teórica y experimental de vigas reforzadas con polímero reforzada con fibra de vidrio (PRFV) y acero.

1.6.2 Objetivos Específicos

Verificar la resistencia a flexión de una viga con refuerzo híbrido en comparación con una viga diseñada con refuerzo PRFV.

Determinar la cuantía total que necesita la viga con refuerzo híbrido en comparación con una viga con refuerzo de acero, bajo las mismas solicitaciones.

Determinar los costos de los refuerzos de la viga reforzada con PRFV y acero en comparación con un diseño convencional de una viga con refuerzo de acero.

1.7. Variables

1.7.1. Independiente

Incorporación de polímero reforzada con fibra de vidrio (PRFV) y acero como refuerzo de una viga armada.

1.7.2. Dependiente

- Resistencia a flexión.
- Cuantía
- Costos

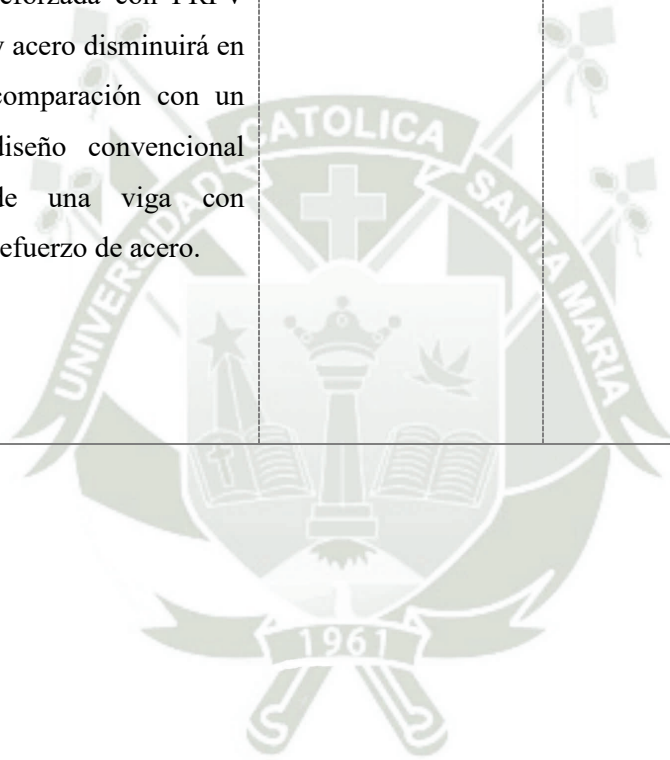
1.7.3. Operacionalización de Variables y/o Matriz de Categorización

Tabla 2 Matriz de Categorización

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES	MEDIDA	METODOLOGIA
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variables Independientes			
¿De qué manera mejora el comportamiento estructural a flexión y optimización de costos de vigas con refuerzo híbrido con polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) y acero?	Analizar el comportamiento estructural a flexión y optimización de costos en refuerzos de manera teórica y experimental de vigas reforzadas con polímero reforzada con fibra de vidrio (PRFV) y acero.	El refuerzo híbrido de polímero reforzada con fibra de vidrio (PRFV) y acero en vigas de concreto armado mejora su comportamiento estructural a flexión, permitiendo una reducción en costos de refuerzo.	Incorporación de polímero reforzada con fibra de vidrio (PRFV) y acero como refuerzo de una viga armada.	Cantidad y diámetro de varillas de refuerzo.	# y Φ	<p>Tipo de Investigación: Cuantitativa</p> <p>Diseño de Investigación: - Experimental</p> <p>Población: Especímenes de probetas de concreto para el diseño de mezcla y vigas armadas reforzadas con acero</p>

Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Variables Dependientes			corrugado, barras de polímero reforzadas con fibras de vidrio e híbridas.
¿De qué manera el diseño de una viga con refuerzo híbrido mejorará la resistencia a flexión en comparación con una viga diseñada con refuerzo PRFV?	Verificar la resistencia a flexión de una viga con refuerzo híbrido en comparación con una viga diseñada con refuerzo PRFV.	El diseño de una viga con refuerzo híbrido mejorará la resistencia a flexión en comparación con una viga diseñada con refuerzo PRFV.	Resistencia a flexión.	Curva esfuerzo-deformación	kgf·m	Muestra: Análisis patrón:
			Cuantía.	Área de reforzada	cm ²	•N° de vigas diseñadas = 08 diseños. •N° diseño de mezcla para el concreto= 01 diseño. Análisis experimental:
¿Debido a la alta resistencia a la tracción del PRFV disminuirá la cuantía total que necesite la viga bajo las mismas sollicitaciones?	Determinar la cuantía total que necesita la viga con refuerzo híbrido en comparación con una viga con refuerzo de acero, bajo las mismas sollicitaciones.	La alta resistencia a la tracción del PRFV se disminuirá la cuantía total que necesite la viga bajo las mismas sollicitaciones.	Costos de las varillas de refuerzo.	Presupuesto de varillas de refuerzo.	S/	•N° de vigas reforzadas con PRFV= 05 und •N° de vigas híbridas= 03 und •N° probetas de concreto= 8 und

<p>¿La viga con refuerzo híbrido disminuirá los costos de los refuerzos en comparación a un diseño convencional con acero?</p>	<p>Determinar los costos de los refuerzos de la viga reforzada con PRFV y acero en comparación con un diseño convencional de una viga con refuerzo de acero.</p>	<p>Los costos de los refuerzos de la viga reforzada con PRFV y acero disminuirá en comparación con un diseño convencional de una viga con refuerzo de acero.</p>			<p>•N° de und. de Análisis Total= 16 especímenes.</p>
--	--	--	--	--	---



CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Matriz de Estado del Arte

Tabla 3 Matriz de Estado del Arte

Autor	Año	Título	Contenido de valor
Díaz, Amador, & Martínez, Refuerzo Híbrido	2020	Reforzamientos mixtos (Acero y polímeros con refuerzo de fibras) en vigas de hormigón armado.	Se desarrolló un procedimiento analítico para el diseño de vigas de hormigón armado con refuerzo híbrido (acero y PRF), asegurando compatibilidad y equilibrio estructural conforme a los códigos ACI 318-14 y ACI 440 1R-15. Se identificó una región común en el diagrama de dominios que cumple con los requisitos de ambos materiales.
Vélez, Alejandro	2018	Refuerzos estructurales de concreto con la implementación de polímeros reforzados con fibras (FRP), Caso investigativo: Reforzamiento de Edificio de concreto de 2 niveles	Se propuso una metodología innovadora para reforzar estructuras con FRP, destacando ventajas como instalación rápida, mantenimiento con plena funcionalidad del edificio y adaptación a formas geométricas complejas. El FRP mejora el desempeño estructural y exhibe buena adherencia a acabados.
Chávez, Leonardo; Santa, Julio	2021	Diseño de vigas con reforzamiento de barras GFRP ejecutando la normativa mundial con aplicación a la realidad de Colombia	Se diseñó un software para calcular vigas reforzadas con GFRP sometidas a cortante y flexión. La validación fue exitosa, pero se recomienda revisión por expertos debido a la criticidad de las fallas por tracción en comparación con las de compresión.
Díaz, Isel; Vega, Aylet	2021	Diseño de tanques de hormigón armado con barras de polímero	se evaluó la utilización de barras PRFV como reforzamiento en depósitos de agua deteriorados por fisuración y corrosión del acero. Se concluyó que el PRFV es una solución duradera, resistente y competitiva en precio para estructuras hidráulicas.
Andrei, Catalin	2014	Diseño y análisis de vigas híbridas de PFRP y hormigón	Se analizaron perfiles de vigas híbridas de PFRP y hormigón armado, demostrando mayor capacidad flectora con menor masa respecto a vigas convencionales. Se diseñaron y fabricaron 03 vigas híbridas con perfiles PFRV a pequeña escala, con distintas configuraciones de sección transversal para ser ensayadas a flexión, para que

			posterior a ello se eligiera 01 diseño y a partir de este diseño se fabricaron 08 vigas híbridas a escala real.
Alarcon, Stephany; Delgado, Luis	2023	Proposición del uso de de barras de Polímeros con Refuerzo de Fibras de Vidrio (PRFV), mediante la técnica Inhibir Reparar-Fortalecer (IRF) para rehabilitación estructural en vigas y losas de concreto armado con refuerzo corroído	Se estudió la aplicación de barras PRFV en la rehabilitación de vigas y losas de viviendas, concluyendo que esta técnica es óptima y económica para mitigar problemas de corrosión estructural.
Galvez, Renzo	2022	Análisis del comportamiento en flexión de vigas de sección no rectangular y de alma delgada reforzadas longitudinalmente con barras de polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP)	se analizaron secciones no rectangulares reforzadas con GFRP, evidenciando mayor resistencia última en comparación con el acero convencional, además de mejoras en peso y costo. También se concluyó que esta sección de alma delgada no es la más indicada para refuerzos con GFRP porque se tiene que asegurar que el concreto absorba toda la acción del cortante para que el refuerzo pueda desarrollar todo su potencial. El total de ensayos fue a compresión 03 y a flexión 03.
Barnuevo, Wilson	2022	Análisis del desempeño de las varillas de fibra de vidrio y acero a la flexión de vigas de concreto simple apoyados con cargas a los tercios del tramo, Lima 2022	Se compararon vigas de concreto reforzadas con PRFV y acero corrugado, observando que el PRFV mejora la resistencia estructural a partir de los 28 días respecto al acero tradicional Por cada diámetro ensayó 3 muestras de vigas
Tavares, D. y Giongo, J.	2009	Evaluación teórica y experimental de vigas de concreto armadas con barras metálicas de GFRP.	Se evaluó el comportamiento de vigas de concreto armado con GFRP, determinando su carga-deformación y capacidad resistente mediante pruebas experimentales en 06 vigas, 01 de ellas con acero corrugado.
Mendieta Lezcano, Francisco Alejandro; Peralta Iriarte, Verónica Bel	2020	Evaluación experimental y computacional del comportamiento a la flexibilidad de vigas de hormigón armado híbrido (acero – PRFV)	Se ensayaron 12 especímenes de vigas de concreto con refuerzos de acero, PRFV y armados híbridos, con el objetivo de analizar su desempeño estructural.

Gracey, Marcos Arias; Gerbaudo, Carlos Fabián	2022	Investigación del desempeño de vigas de concreto con refuerzo de varillas de fibra de vidrio con polímero	Realizaron ensayos experimentales en 02 vigas de hormigón sometidas a flexión para estudiar su comportamiento bajo carga.
Sánchez Hdez., Juan A.	2019	Análisis de los criterios de diseño de vigas de concreto sub-reforzada con varillas de PRFV	Se analizaron 03 vigas de concreto reforzadas con cuatro barras de PRFV de 4 mm de diámetro, evaluando su capacidad estructural y comportamiento mecánico.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Antecedentes de Investigación

2.2.1.1.. Antecedentes Internacionales

Díaz et al. (2020), la investigación publicada; tenía el propósito de brindar una propuesta, mediante modelos analíticos e hipótesis definidas en los códigos ACI 318-14 y ACI 440 1R-15, con la finalidad de diseñar componentes de hormigón armados con acero y PRF proponiendo una técnica para diseñar vigas de hormigón armado con un reforzamiento de acero y PRF partiendo del análisis de compatibilidad y ecuaciones de equilibrio que cumpla los requerimientos de diseño instaurados en los reglamentos de cada material; concluyendo con que se logró determinar en el diagrama de dominios, una región en común que cumple con los requerimientos de diseño dispuesto para cada material.

Vélez (2018), realizó una investigación sobre Reforzamiento de estructuras de hormigón con la utilización de polímeros con refuerzo de fibras (FRP); cuyo propósito fue presentar una innovadora metodología para reforzamiento con FRP y una caracterización exhaustiva en la aplicabilidad a niveles de geometría asimétrica; concluyendo que el reforzamiento con FRP puede ser utilizado exitosamente para mejorar el cumplimiento de las vigas y columnas respecto a los códigos de diseño, el FRP presentó ventajas como la rápida y limpia instalación, a la vez que el edificio puede mantenerse funcional, al ser un material ligero puede prepararse e instalarse a mano, al ser un material delgado puede ajustarse con mayor facilidad a la geometría de los elementos estructurales, además que es estéticamente armoniosa con la construcción ya que el FRP plasma una buena adhesión a las pinturas, morteros, entre otros.

Chávez y Santa (2021), realizaron un trabajo de investigación sobre el Diseño de vigas con reforzamiento de de barras GFRP utilizando reglamentos globales aplicable al

entorno colombiano, cuyo propósito fue abordar la teoría y procedimientos para diseñar vigas sometidas a pruebas cortantes y de flexibilidad con barras GFRP, desarrollando a su vez un software y manual para facilitar el cálculo de diseño; concluyendo que el software se ha aprobado exitosamente, no obstante, los hallazgos encontrados deben ser aprobados y evaluados por expertos calificados y experimentados en estos materiales, debido a que la falla por tracción en las vigas reforzadas con GFRP da como resultado ser más crítica en comparación a la que se genera por compresión, se optó por esta última condición, evitando daños excesivos por cargas verticales, y respecto al desempeño que tendría la viga, dado el tipo de falla que presentará (controlada por compresión), se producirían deflexiones reducidas.

Díaz y Vega (2021), realizaron un trabajo de investigación sobre Diseño de tanques de hormigón armado con barras de polímero con reforzamiento de fibras de vidrio, cuya finalidad fue proponer un diseño de las paredes de 2 estructuras utilizando barras de PRF como refuerzo del hormigón puesto que muchos estructuras los cuales funcionan como depósitos en Cuba presentan un alto grado de desgaste corrosivo debido a la fisuración y corrosión del refuerzo de acero; concluyendo que el empleo del refuerzo de barras PRFV es una solución ventajosa y válida para estas estructuras de obras hidráulicas puesto que permiten tener estructuras resistentes, duraderas y competitivas en precio.

Andrei (2014) realizó un trabajo de investigación sobre Diseño y análisis de vigas híbridas de PFRP y hormigón; cuyo propósito fue estudiar el desempeño a la flexión y cizalladura de vigas híbridas de hormigón armado y perfiles de PFRP, y proporcionar un proceso analítico para el diseño de estas para que se puedan trabajar en conjunto y que logren un rendimiento mejorado en su desempeño; concluyendo con que las vigas híbridas ensayadas presentaron una alta capacidad flectora frente a las vigas de hormigón armado equivalentes, obteniendo un masa de casi la mitad, proponiendo que los materiales estructurales híbridos, de perfiles PFRP y hormigón armado, se pueden presentar como una alternativa viable para construcciones nuevas, como por ejemplo: vigas de puentes, proyectos de rehabilitación, o pisos de viviendas.

2.1.1.2. Antecedentes Nacionales

Alarcón y Delgado (2023), investigó sobre una Alternativa de utilización de barras de Polímeros con Refuerzo de Fibras de Vidrio (PRFV), a través de la técnica Inhibir Reparar-Fortalecer (IRF) para rehabilitación estructural en vigas y losas de concreto armado con un reforzamiento corroído; el presente trabajo investigativo se enfocó en utilizar barras de Polímeros Reforzados con Fibras de Vidrio (PRFV) para rehabilitar estructuralmente las vigas y losas de una vivienda donde varias filtraciones de humedad terminaron dañando la integridad de los elementos de concreto armado generando un grado de corrosión en el acero de refuerzo del 50%. Por esta razón los investigadores vieron por conveniente utilizar una técnica de rehabilitación estructural llamado Inhibir- Reparar-Fortalecer (IRF) utilizando las barras de PRFV debido a que según sus propiedades mecánicas este material tiene una resistencia a la tracción 3 veces más alto que el acero convencional y por la nula corrosión que este puede presentar por ser un elemento no metálico. Se concluye que el efecto de la corrosión en el acero afecta directamente a la resistencia inicial del elemento y la utilización de las barras PRFV con la técnica de rehabilitación IRF terminan siendo una solución tanto óptima para el problema de la corrosión como económica a comparación de demoler y construir de nuevo la sección dañada.

Gálvez (2022), investigó sobre Evaluación del comportamiento en flexión de vigas de sección no rectangular y de alma delgada con reforzamiento longitudinalmente con barras de polímeros con reforzamiento de fibra de vidrio (GFRP), el cual tuvo como fin el análisis del comportamiento de secciones no rectangulares y alma delgada, así como fuera un perfil metálico “W”, reforzadas con barras de Polímeros con Reforzamiento de Fibra de Vidrio (GFRP) como alternativa al acero de construcción corrugado que se usa en la gran mayoría de obras en el Perú, este tipo particular de refuerzo y sección fueron elegidos por 2 grandes razones en específico, la primera fue porque este tipo de sección no suele ser analizada en concreto armado con acero y aún menos con refuerzos de GFRP y la segunda razón fue la alta resistencia corrosiva y a la tracción que presenta este material. Concluyendo que las vigas armadas con GFRP tiene una resistencia ultima por encima de un 76% a la viga armada con acero convencional pese a que el área de refuerzo fue la misma en ambas vigas. También se concluyó que esta sección de alma delgada no es la más indicada para refuerzos con GFRP porque se tiene que asegurar que el concreto absorba toda la acción del cortante para que el refuerzo pueda desarrollar todo su potencial.

Barnuevo (2022), investigó sobre Evaluación del desempeño de las varillas de fibra de vidrio y acero al esfuerzo a flexión de vigas de concreto simplemente apoyadas con cargas a los tercios del tramo, Lima 2022, mediante el cual analizó los resultados teóricos y experimentales de vigas de concreto armado con varillas de fibra de vidrio y de acero corrugado con el fin de proponer a las varillas de PRFV como una alternativa constructiva al acero corrugado que normalmente se usa en la construcción, para corroborar la hipótesis del estudio se ensayaron varias vigas a 2 diferentes edades del concreto a los 7 y 28 días. Luego se recolecto el momento resistente y las deflexiones inmediatas de todos los especímenes. Concluyendo que el refuerzo con PRFV arroja mejores resistencias a los 7 días, pero a los 28 días el armado con acero convencional termina resistiendo más.

2.2.2. Bases teóricas

2.2.2.1. Tipos de materiales

– Materiales isotrópicos y anisotrópicos

Son elementos que poseen las mismas características físicas en todas las direcciones se llaman isotrópicos. Los materiales que tienen propiedades diferentes según la dirección se llaman anisotrópicos. Un ejemplo de materiales anisotrópicos son los que están hechos de fibras que les dan más resistencia o flexibilidad. (Beer et al., 2010)

– Material Frágil y Dúctil

Los materiales que presentan una baja tenacidad y una alta resistencia a la fractura se denominan frágiles. Estos materiales se caracterizan por una transición brusca de la fase elástica a la fase plástica, sin deformación apreciable, lo que implica una rotura súbita e impredecible. Por el contrario, los materiales que exhiben una alta tenacidad y una baja resistencia a la fractura se llaman dúctiles. Estos materiales se distinguen por una mutación gradual de la fase elástica a la fase plástica, con una deformación considerable, lo que permite una detección anticipada de la falla. Un ejemplo de material dúctil es el acero estructural, que experimenta un fenómeno de fluencia cuando se somete a una carga superior a su límite elástico. (Beer et al., 2010)

Los materiales que presentan una alta habilidad de disipación de energía mecánica se denominan dúctiles. Estos materiales son preferidos por el profesional de ingeniería con el fin de diseñar estructuras y componentes sometidos a cargas dinámicas o cíclicas, ya que pueden amortiguar los choques o las vibraciones. Además, estos materiales exhiben una gran plasticidad antes de la rotura, lo que permite detectar y prevenir el colapso de la estructura o el componente. (Hibbeler, 2017)

– **Fibra**

Es un material natural o artificial que tiene forma de filamento delgado y flexible, de origen mineral o biológico. Esta terminología se aplica por lo general a elementos que presentan una relación de aspecto (longitud/diámetro) mayor o igual a 100, típicamente entre 0,10 y 0,13 mm. (Caneiro et al., 2017)

– **Polímero**

Se denomina polímero a un material natural o artificial que tiene una estructura macromolecular formada por la unión de muchas unidades repetitivas llamadas monómeros.

– **Resina y matrices**

Durante el procesamiento, el polímero se encuentra en estado líquido o viscoso y se le llama resina. Después del curado, el polímero se solidifica y se le llama matriz. La resina tiene como función principal dar forma al material compuesto, que está constituido por la matriz. La matriz tiene como propiedades típicas una baja rigidez y una alta ductilidad, lo que le permite transferir las cargas entre las fibras y la superficie de contacto, así como proteger a las fibras de agentes externos que puedan deteriorarlas. (Faria et al., 2017)

2.2.2.2. Polímero Reforzado con Fibras (PRF)

Se denomina polímeros reforzados con fibras (PRF) a un tipo de material compuesto que consiste en una matriz polimérica que contiene fibras dispersas en su interior. La matriz puede ser de diferentes tipos de resinas, como epoxi, poliéster o vinilo. Las propiedades mecánicas de este material están determinadas principalmente por el tipo de fibra, que puede ser de diferentes materiales, como vidrio, aramida, carbono o basalto. (Caneiro et al., 2017)

– **Polímero Reforzado con Fibras de Vidrio (PRFV)**

Las fibras de vidrio de alta resistencia, por lo general se utilizan como resina vinilester. Esta resina tiene como ventajas su alta capacidad de aislamiento térmico y eléctrico, su excelente comportamiento frente a la corrosión, su resistencia a elevadas temperaturas y su eficiente respuesta a la fatiga. Las fibras de vidrio aportan rigidez y resistencia mecánica al material compuesto, así como una mayor protección frente a la degradación química en ambientes hostiles. (Noricumbo et al., 2014)

Estos materiales en comparación que la fibra de carbono, presentan una menor rigidez y resistencia, pero tiene un menor costo y una mayor relación entre la resistencia y el peso. (Caneiro et al., 2017)

– **Los Compuestos FRP para concreto reforzado**

Debido a la condición operacional de las estructuras, las composiciones FRP pueden ser utilizados en estructuras orientados a la sanidad, plantas químicas, plantas de tratamiento de aguas residuales, instalaciones petroquímicas, en la industria papelera y textil, torres de enfriamiento de agua, plantas nucleares, estructuras cerca y dentro del mar, instalaciones telefónicas, torres de telecomunicaciones y de transmisión, torres de control en aeropuertos, hospitales (instalaciones de resonancia magnética y rayos X), acuarios, albercas, muelles, puertos, diques, pilotes, postes de concreto de alumbrado o conducción, centros de cómputo, instalaciones subterráneas, ductos, estructuras sujetas a agentes corrosivos, entre otros usos. (Gaytán, 2008)

– **Ventajas del Polímero Reforzado con Fibras de Vidrio (PRFV)**

- Elevada resistencia a tracción.
- Resistente a la corrosión y sustancias químicas.
- Transparencia magnética.
- Elevada resistencia a la fatiga.
- Reducido peso con relación al peso del acero (de 7 a 10 veces inferior).
- Reducida conductividad térmica y eléctrica.
- Competitividad en precios. Elevada durabilidad (Caneiro et al., 2017).

– **Desventajas del Polímero Reforzado con Fibras de Vidrio (PRFV)**

- Comportamiento frágil sin deformación plástica previa a la fractura. Refuerzo unidireccional con propiedades óptimas en la dirección de las fibras. Refuerzo bidireccional con propiedades variables según el ángulo de las fibras (material ortotrópico). Dependencia de las propiedades mecánicas con el porcentaje volumétrico de fibras en cada dirección.
- Bajo valor del módulo de Young (especialmente cuando es fibra de vidrio, aproximadamente una cuarta parte del valor del acero).
- Resistencia a la compresión mucho menor que a la tracción.
- Módulo de elasticidad a compresión menor que el de tracción (en el orden del 20% acorde a algunas investigaciones según Caneiro-Wainshtok 2015; $E'f \approx 0,80E_f$).
- Reducida resistencia al esfuerzo cortante.
- Imposibilidad de curvar el material en obra.
- Vulnerabilidad al daño por radiación ultravioleta (se recomienda evitar el almacenamiento prolongado del material al aire libre). (Caneiro et al., 2017)

2.2.2.4. Corrosión

Se denomina corrosión al proceso de degradación de un componente, generalmente un metal, por la acción de un agente químico o electroquímico presente en el ambiente. La corrosión del acero de refuerzo produce una capa de óxido que ocupa un volumen de 2 a 4 veces superior que el del acero original. Esta herrumbre reduce la adherencia entre el acero y el hormigón, lo que puede causar la fisuración y el desprendimiento del recubrimiento. Esto afecta negativamente la propiedad mecánica del acero y del elemento de hormigón armado, disminuyendo su resistencia y durabilidad. (Noricumbo et al., 2014)

– **Factores que afectan y desencadenan la corrosión de las armaduras**

- Dosificación del concreto
- Compacidad y homogeneidad
- Espesor de recubrimiento del concreto
- Humedad ambiental
- Consecuencia del oxígeno

- Consecuencia de la temperatura
 - Estado superficial del acero
 - Tensiones mecánicas del acero
 - Corrientes erráticas o de interferencia
 - Contacto galvánico entre dos metales
 - Carbonatación
 - Lixiviación por aguas blandas
 - Presencia de coqueas en contacto con armaduras
 - Existencia de fisuras (Cerna, Galicia, y Villarreal, 2010)
- **Principalmente factores de corrosión**

A nivel global, la corrosión se debe principalmente a dos factores:

1. **Carbonatación:** El concreto reacciona con el CO₂ existente en las capas atmosféricas, lo que disminuye la alcalinidad del concreto y reduce su capacidad protectora del acero de refuerzo de la corrosión.
2. **Cloruros:** En las áreas costeras, los cloruros presentes en el agua marítima pueden penetrar en el concreto y causar corrosión en el acero de refuerzo (Conexión Cinvestav, 2020).

2.2.2.5. Recubrimiento

Se denomina recubrimiento al espesor de concreto que rodea al acero de refuerzo y que cumple una función protectora frente al fuego y la corrosión. El encargado del diseño debe asegurar que el recubrimiento cumpla con un valor mínimo que garantice la durabilidad de las estructuras. El valor mínimo depende de la tipología de estructura y del ambiente al que esté expuesta. (Nilson, 2001)

2.2.2.6. Método de Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD)

El diseño del estado límite (LSD) es un método de diseño que separa la incertidumbre de la carga de la incertidumbre del material. Este modelo se conoce como diseño del factor de carga y resistencia (LRFD) en los Estados Unidos. En este método, el factor de resistencia

o disminuye la resistencia nominal del componente y requiere que ésta sea igual o mayor que la carga aplicada o a la combinación de cargas que se calcula utilizando los factores de carga o de amplificación γ . En resumen, el SD y el LRFD son métodos de diseño que permiten una evaluación directa del riesgo y son utilizados para verificar los estados límites de las estructuras. (Hibbeler, 2017)

2.2.2.7. Factor de reducción

También llamado componente de resistencia; considera las incertidumbres relacionadas con la estructura misma y comúnmente es inferior de 1. Por una parte, si el factor de seguridad es muy próximo de 1 (muy inseguro), la probabilidad de falla se torna inadmisiblemente grande; por otra, si se escoge el factor muy alejado de 1 (muy conservador), el producto es un diseño costoso e ineficiente (Beer et al., 2010).

2.2.2.8. Tipos de fallas en los elementos sometidos a flexión pura

Los componentes sujetos a flexión generalmente se fracturan debido a la compresión del concreto. No obstante, puede ocurrir que el concreto falle con antelación o posterior de que ocurra la fluencia del acero. La forma en que ocurre la falla depende de la cantidad de refuerzo y existen 3 tipos de fallas asociados.

- 1. Falla por tensión:** También nombradas secciones sub-reforzadas, el acero fluye resultando una falla dúctil. Con lo que se presentan grandes deformación y agrietamientos andes del colapso, advirtiendo a los usuarios acerca del peligro inminente.
- 2. Falla por compresión:** También llamadas secciones sobre-reforzadas, no se permite que el acero se deforme gradualmente, lo que resulta en una falla brusca del concreto. Estas secciones reciben este nombre debido a su exceso de refuerzo. Aunque tienen una resistencia mayor en comparación con secciones sub-reforzadas de dimensiones similares, carecen de la habilidad de deformarse plásticamente. Esta tipología de falla no es deseable debido a su comportamiento frágil y el colapso resultante. En el diseño estructural, se llevan a cabo precauciones para evitar este tipo de falla en la medida de lo posible.

- 3. Falla balanceada:** Ocurre en el momento en que el concreto llega a la deformación unitaria final de 0.003 respectivamente en el tiempo que comienza la fluencia del acero (según ACI-10.3.2). Este tipo de falla es frágil e indeseado.

Para cada sección, hay una proporción específica de acero que provoca una falla balanceada, la cual se llama cuantía balanceada o básica (p_b). Si la sección tiene más refuerzo, fallará por compresión, y si tiene menos, la falla será por tracción. Para garantizar la seguridad, el código del ACI sugiere que todas las secciones se diseñen para fallar por tracción, por lo que limita la cuantía del refuerzo a $0.75p_b$ (Harmsen, 2002).

2.2.2.9. Esfuerzo

La fuerza por unidad de zona, o la intensidad de las fuerzas repartidas por medio de una sección dada, es nombrada como esfuerzo sobre esa sección y es representada con la letra griega (σ). Se consigue, por lo tanto, al dividir la magnitud P de la carga entre el área A . se utilizará un signo positivo para indicar un esfuerzo de tensión (el elemento a tensión) y un signo negativo para indicar un esfuerzo compresivo (el elemento a compresión). (Beer et al., 2010)

La magnitud de las fuerzas repartidas en una sección específica, o la fuerza por unidad de área, se denomina esfuerzo en esa sección y se simboliza con la letra griega (σ). Se calcula dividiendo la magnitud P de la carga por el área A . Se utiliza un signo positivo para representar un esfuerzo de tensión (el elemento está en tensión) y un signo negativo para representar un esfuerzo compresivo (el elemento está en compresión).

En cualquiera de las secciones transversales hay la presencia de fuerzas internas que pueden desarticularse en fuerzas normales y tangenciales a la sección (Nilson, 2001).

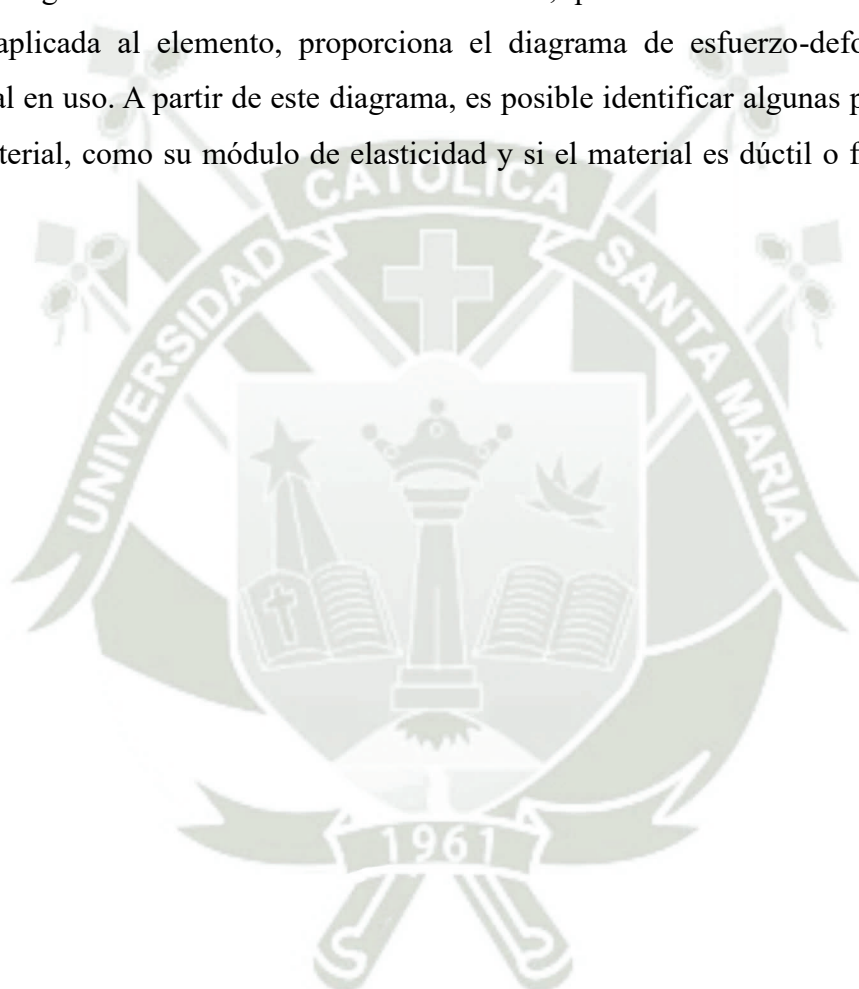
- 1. Esfuerzo de flexión:** Los elementos normales a la sección son los esfuerzos deflexión (tensión en un lado del eje neutro y compresión en el otro); su propósito es la de resistir el momento flector que actúa en la sección (Nilson, 2001).
- 2. Esfuerzo cortante:** Los elementos perpendiculares se conocen como esfuerzos cortantes que resisten las fuerzas transversales o cortantes (Nilson, 2001).

2.2.2.10. Deformación unitaria

También denominada deformación normal en un elemento, se define como la deformación del elemento por cada unidad de longitud (Beer et al., 2010).

2.2.2.11. Diagrama esfuerzo-deformación

El gráfico de esfuerzo versus deformación, que se obtiene a medida que aumenta la carga aplicada al elemento, proporciona el diagrama de esfuerzo-deformación para el material en uso. A partir de este diagrama, es posible identificar algunas propiedades clave del material, como su módulo de elasticidad y si el material es dúctil o frágil (Beer et al., 2010).



CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Metodología

3.1.1 *Tipo de Investigación*

La tipología será cuantitativa, dado que los investigadores presentan una problemática delimitada, a fin de comprobar las hipótesis se utilizó como medio la recopilación, observación y análisis de información.

3.1.2 *Diseño de investigación*

Se orientó hacia una metodología experimental, el encargado de la investigación debe manipular las variables de manera intencional, con la finalidad de analizar los posibles resultados.

3.1.3 *Materiales y lugar de ejecución*

Lugar

Estuvo centrado en el departamento de Arequipa, provincia de Arequipa, específicamente en el recinto del laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Santa María.

Materia prima, insumos, equipos otros

- Agregado Grueso de Tamaño Nominal Máximo ½"
- Agregado fino
- Cemento: Yura MAX Tipo HS
- Agua potable de la red pública.
- Acero corrugado grado 60 de 3/8" y ½"
- Alambre N° 16
- Dados de concreto de 2 cm

- Varillas de Polímero Reforzado con Fibras de Vidrio (PRFV) de 3/8" y 1/2" con enrollado y arenado
- Fenólico para encofrado de 18 mm
- Trompo mezclador.
- Martillo, flexómetro, escuadra metálica, regla metálica, baldes, carretilla buggy, espátula, cucharón y palas.
- Equipo de ensayo a compresión para probetas
- Equipo de ensayo a flexión en 3 puntos

3.1.4 Población, muestra y muestreo

Población

Estuvo conformado por especímenes de probetas de concreto para el diseño de mezcla y vigas armadas reforzadas con barras de polímero reforzadas con fibras de vidrio (PRFV) y refuerzo híbrido (acero y PRFV).

Muestra

En los estudios experimentales de Andrei (2014) diseño y análisis de vigas híbridas de PFRP y hormigón se diseñaron y fabricaron **03 vigas híbridas con perfiles PFRV a pequeña escala**, con distintas configuraciones de sección transversal para ser ensayadas a flexión, para que posterior a ello se eligiera 01 diseño y a partir de este diseño se fabricaron **08 vigas híbridas a escala real** utilizando dos configuraciones que guardan cierta similitud con el diseño elegido previamente.

En otro estudio Tavares y Giongo (2009) se estudió armaduras de PRFV, haciendo énfasis en su comportamiento cuando estas son sometidas a tensiones normales, para ello se procedió con **el análisis teórico y experimental de vigas de concreto armado** para determinar el diagrama carga-deformación y capacidad resistente, fueron analizadas **06 vigas simplemente apoyadas, una de ellas fue reforzada con acero corrugado y el resto fueron armadas con PRFV.**

Barnuevo (2022) en su investigación se ensayó vigas reforzadas con PRFV y con acero, a los 7 y 28 días, se analizó varias cuantías de refuerzo alternando el diámetro de varillas, **por cada diámetro ensayó 3 muestras de vigas.**

Gálvez (2022) realizó ensayos a compresión y flexión de vigas de sección no rectangular y de alma delgada reforzadas longitudinalmente con barras de polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP), **el total de ensayos a compresión fue 03 y a flexión 03.**

Mendieta y Peralta (2020) **ensayaron 12 especímenes de vigas** de hormigón armado que contienen barras de acero, de polímero reforzado con fibras de vidrio y armado híbrido; teniendo 3 de cada tipo.

Gracey y Gerbaudo (2022) presentan en su investigación los hallazgos de los **ensayos experimentales de 2 vigas de hormigón ensayadas a flexión.**

Sánchez (2019) puso a prueba **3 vigas de concreto reforzada con 4 barras de PRFV de 4 mm de diámetro**, para determinar su capacidad y comportamiento.

Por los antecedentes previamente referenciados se tomó como mejor opción que la muestra conste de 1 diseños de mezclas (propiedades físicas incluidas), 8 vigas de concreto armado para ensayo a flexión, 8 modelos virtuales para comparación y 8 probetas de concreto para ensayo a compresión. Analizadas de la siguiente manera:

Análisis patrón:

- Diseño de mezcla (propiedades físicas incluidas): $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$
- Configuraciones vigas de concreto armado para ensayo a flexión: 8 vigas.
- Modelo reforzado con PRFV 1 (MRP-1) 5 und.
- Modelo reforzado Híbrido 1 (MRH-1) 3 und.

3.1.5 Metodología de investigación

Se iniciará calculando las propiedades matemáticas de la viga con refuerzo de acero y otra con barras de polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV). Con base en ambos procedimientos, se diseñará la viga con refuerzo híbrido.

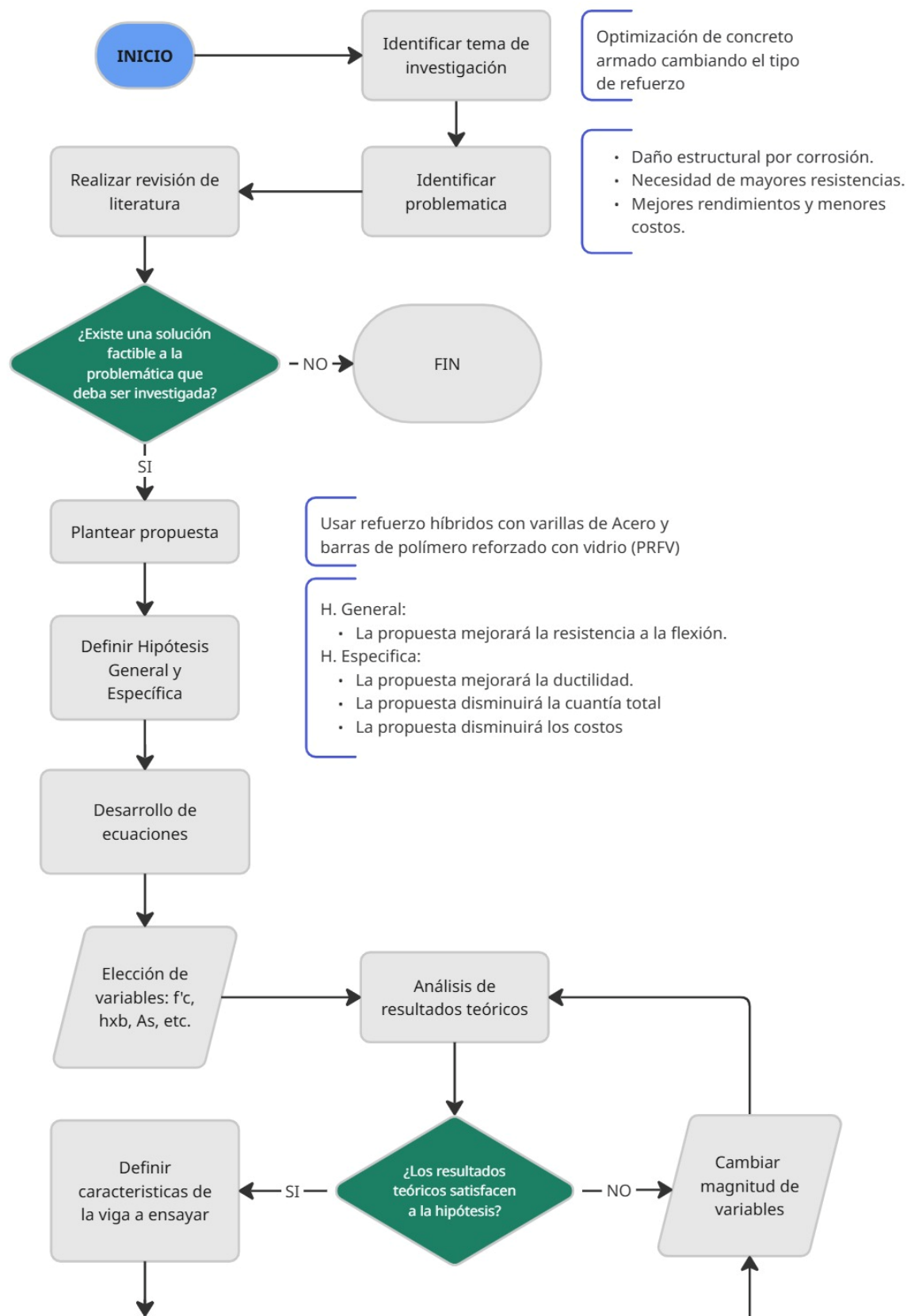
Con los diseños a escala para ensayar en laboratorio, se definen las cantidades de materiales necesarios y se procede a su construcción.

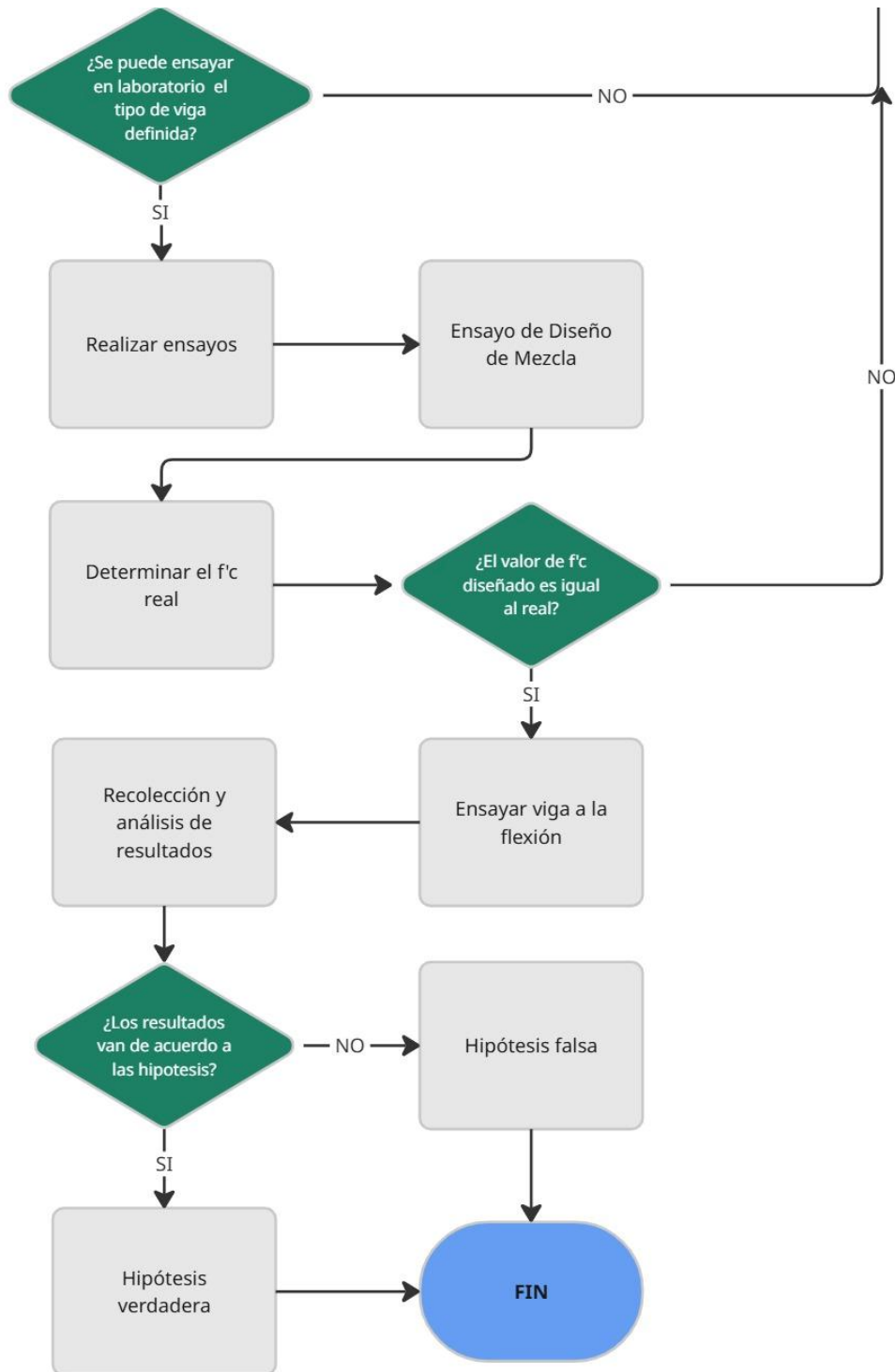
Una vez concluidos los ensayos, se procederá con la recolección y análisis de datos, estableciendo su relación teórico-experimental.

Además, se desarrollarán vigas con las tres configuraciones de refuerzo (PRFV, acero e híbrido) considerando variables más ajustadas al uso real. Estos cálculos serán exclusivamente teóricos, evaluando la correspondencia entre los modelos a escala ensayados en laboratorio y las vigas teóricas.

3.1.6 Diagrama de flujo

Figura 2 Daños y fallas de las estructuras por corrosión





3.1.7 Aspectos éticos

La investigación contará con sustento teórico cuyas referencias serán incorporadas siguiendo las indicaciones de las normas APA 7ma edición, respetando así el derecho de autor de la teoría incorporada. La segunda parte contará tomará en consideración las normativas del Reglamento Nacional de Edificaciones y los códigos ASTM C78, ACI 318-14, ACI 440 1R-15 y ACI 440 2R-08 para el diseño de materiales de concreto armado con acero y barra de polímero reforzada con fibra de vidrio (PRFV).



CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo describiremos el diseño de mezcla de concreto, por el método ACI 318-19, así como el cálculo de la resistencia a la flexión en vigas, independiente del tipo de refuerzo tendremos como del acero, el polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) y el híbrido tendremos procedimientos parecidos que a continuación desarrollaremos.

4.1.1 Método de diseño

El comité 211 del ACI ha desarrollado un procedimiento de diseño de mezcla el cual, fundamentándose en algunas tablas realizadas por medio de ensayos de los agregados, los cuales posibilitan a obtener valores de materiales con diferencias notables que integran el m³ de concreto (Institute, s.f.).

Tenemos los siguientes valores sacados de la ficha técnica de los materiales adquiridos:

– **Cemento**

Yura MAX Tipo HS

Peso Específico: 2.9 g/cm³.

– **Agua**

Potable de la red pública.

Peso Específico: 1000 kgf/m³

– **Agregado Grueso**

Tamaño Máximo Nominal: ½”

Peso seco compactado: 1600 kgf/m³

Peso específico de la masa: 2370 kgf/m³

Absorción: 2.1 %.

Contenido de humedad: 0.4%.

– **Agregado Fino**

Peso específico de la masa: 2610 kgf/m³

Absorción: 1%.

Contenido de humedad: 3%.

Módulo de Fineza: 2.1

4.1.2 Secuencia de los pasos realizados

Se siguieron los siguientes pasos:

a. Determinación de la resistencia promedio

Tabla 4 Resistencia promedio

f'c	f'cr
<210	f'c + 70
210 a 350	f'c + 84
>350	f'c + 98

La resistencia del concreto del diseño será 175 kg/cm²

Entonces $f'cr = 175 + 70 = 245 \text{ kg/cm}^2$

b. Selección del tamaño máximo nominal

A la granulometría del agregado grueso le corresponde un TMN= 1/2"

c. Selección del tamaño máximo nominal

Tabla 5 Tamaño máximo nominal

Consistencia	Slump	Trabajabilidad	Método de compactación
Seca	0" a 2"	Poco trabajable	Vibración normal
Plástica	3" a 4"	Trabajable	Vibración ligera
Fluida	>5"	Muy trabajable	Chuseado

En nuestro caso se trabajará con un slump de 3" a 4"

d. Volumen unitario del agua

Tabla 6 *Volumen del agua*

Asentamiento	Agua en l/m ³ para los tamaños máx. nominales de agregado grueso y consistencia indicados							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
	Concreto sin aire incorporado							
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	...

Para un asentamiento de 3" a 4" y un TMN de 1/2" tendremos:

Volumen unitario de agua 216 L/m³

e. Contenido de aire

Tabla 7 *Contenido del aire*

Tamaño Máximo Nominal	Aire atrapado
3/8"	3.0 %
1/2"	2.5 %
3/4"	2.0 %
1"	1.5 %
1 1/2"	1.0 %
2"	0.5 %
3"	0.3 %
6"	0.2 %

Para un tamaño máximo nominal de 1/2" tendremos un 2.5% de contenido de aire atrapado.

f. Relación agua/cemento

Tabla 8 Relación agua/ cemento

F'cr (28 días)	Relación agua – cemento de diseño en peso	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
150	0.80	0.71
200	0.70	0.61
250	0.62	0.53
300	0.55	0.46
350	0.48	0.40
400	0.43	...
450	0.38	...

Para una $f'_{cr} = 294 \text{ kg/cm}^2$ interpolaremos según la tabla de relación agua/cemento

200	0.70
245	x
250	0.62

Para una resistencia promedio correspondiente a $f'_{cr} = 245 \text{ kg/cm}^2$ se obtiene una relación agua/cemento por resistencia de 0.628.

g. Factor cemento

$$\text{Factor cemento} = \frac{\text{Volumen unitario de agua}}{\text{Relación agua cemento}}$$

$$\text{Factor cemento} = \frac{216}{0.628} = 343.31 \text{ kg/m}^3$$

Si transformamos este valor en bolsas de cemento, tendremos lo siguiente:

$$\text{Factor cemento} = 343.31 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ bolsa}}{42.5 \text{ kg}}$$

$$\text{Factor cemento} = 8.08 \text{ bolsas/m}^3$$

h. Contenido de agregado grueso

Tabla 9 Volumen del agregado

Tamaño Máximo Nominal del agregado grueso	Volumen de agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumen de concreto, para diversos módulos de finura del agregado fino			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
1"	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	0.76	0.74	0.72	0.70
2"	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	0.81	0.79	0.77	0.75
6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Para un Módulo de Finura para el Agregado Fino de 2.93 y Tamaño Máximo Nominal de 1/2", interpolaremos:

Obtenemos un Volumen agregado seco compactado de 0.537.

Peso del Agregado Grueso Seco

$$= \text{Vol. de agregado seco compactado} \times \text{Peso unit. seco compactado}$$

$$\text{Peso del Agregado Grueso Seco: } 1600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.537$$

$$\text{Peso del Agregado Grueso Seco: } 859.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

i. Cálculo de volúmenes absolutos

$$\text{Cemento} = \frac{\text{Factor cemento}}{\text{Peso específico del cemento}}$$

$$\text{Cemento} = \frac{343.31 \text{kg/m}^3}{2.9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 1000} = 0.1184 \text{ m}^3$$

$$\text{Agua} = \frac{\text{Volumen unitario de agua}}{\text{Peso específico del agua}}$$

$$\text{Agua} = \frac{216 \text{ L/m}^3}{1000} = 0.216 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = 2.5\% = 0.025 \text{ m}^3$$

$$\text{Agregado Grueso} = \frac{\text{Peso del Agregado Grueso Seco}}{\text{Peso Específico del Agregado Grueso}}$$

$$\text{Agregado Grueso} = \frac{859.2 \text{ kg/m}^3}{2370 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 1000} = 0.3626 \text{ m}^3$$

$$\text{Total de Volúmenes Absolutos conocidos} = 0.722 \text{ m}^3$$

j. Contenido de Agregado Fino

Volumen absoluto agregado fino = 1 - Total de volúmenes absolutos conocidos

$$\text{Volumen absoluto agregado fino} = 1 - 0.722 = 0.278 \text{ m}^3$$

Peso del agregado fino en estado seco = Volumen absoluto del agregado fino * P.E. de la masa

$$\text{Peso del agregado fino en estado seco} = 0.2078 \text{ m}^3 \times 2.61 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 1000$$

$$\text{Peso del agregado fino en estado seco} = 725.58 \text{ kg/m}^3$$

k. Valores de Diseño de Mezcla

- Cemento: 343.31 kg/m³ (factor cemento)
- Agua de diseño: 216 L/m³ (Volumen unitario del agua)
- Agregado grueso seco: 859.2 kg/m³ (Peso del agregado grueso seco)
- Agregado fino seco: 725.58 kg/m³ (Peso del agregado fino seco)

l. Corrección por Humedad del Agregado

- **Agregado grueso**

Contenido de humedad: 0.4 %

Calculamos el contenido de humedad del valor de diseño del agregado grueso:

$$859.2 \frac{kg}{m^3} \times (1\% + 0.4\%) = 871.2 \frac{kg}{m^3}$$

– **Agregado fino**

Contenido de humedad: 1.366%

Calculamos el contenido de humedad del valor de diseño del agregado fino:

$$725.58 \frac{kg}{m^3} \times (1\% + 0.3\%) = 734.01 \frac{kg}{m^3}$$

– **Humedad superficial de los agregados**

Humedad superficial del agregado grueso: $0.4\% - 2.1\% = -1.7\%$

Humedad superficial del agregado fino: $3\% - 1\% = 2\%$

– **Aporte de humedad de los agregados**

Aporte humedad agregado grueso:

$$859.2 \frac{kg}{m^3} \times -1.7\% = -14.61 \frac{L}{m^3}$$

Aporte humedad agregado fino:

$$725.58 \frac{kg}{m^3} \times 2\% = 14.51 \frac{L}{m^3}$$

Total, del aporte de humedad: -0.1 L/m^3

– **Agua efectiva**

Volumen unitario del agua – Total del aporte de humedad

$$216 \frac{L}{m^3} - (-0.1) \frac{L}{m^3} = 216.1 \frac{L}{m^3}$$

– **Pesos de los materiales corregidos por humedad del agregado**

Cemento: 385.7 kg/m^3

Agua de diseño: 216.1 L/m^3

Agregado grueso seco: 871.2 kg/m^3

Agregado fino seco: 734 kg/m³

m. Proporción en peso

$$\frac{385.7}{385.7} : \frac{734}{385.7} : \frac{871.2}{385.7} : \frac{216.1}{385.7}$$

$$1 : 1.90 : 2.26 : 0.56$$

Relación agua/cemento del diseño: 0.628

Relación agua/cemento efectivo: $216.1/385.7 = 0.56$ (corregida)

n. Peso por tanda de una bolsa de cemento (saco)

Cemento: $1 \times 42.5 \text{ kg} = 42.5 \text{ kg/saco}$

Agua de diseño: $0.56 \times 42.5 \text{ kg} = 23.8 \text{ L/saco}$

Agregado fino seco: $1.90 \times 42.5 \text{ kg} = 80.75 \text{ kg/saco}$

Agregado grueso seco: $2.26 \times 42.5 \text{ kg} = 95.95 \text{ kg/saco}$

4.1.3 Método de diseño

El método de diseño que se empleará será el Método de Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD) ya anteriormente mencionada en el marco teórico, siendo el método de diseño más utilizado en la actualidad ubicadas en las normas nacionales E.060 y la normal americana ACI 318-19.

En esencia este método se basa en la siguiente inecuación; la resistencia a la flexión de diseño será la resistencia nominal multiplicada por un factor de reducción (ϕ) mientras que las cargas serán mayoradas, como se muestra a continuación:

$$(\text{Resistencia reducida})\Phi M_n \geq M_u (\text{Cargas mayoradas}) \quad \text{Ecu. 1}$$

4.1.4 Hipótesis básicas de diseño

Se tiene que establecer unas suposiciones antes del análisis de los tipos de vigas.

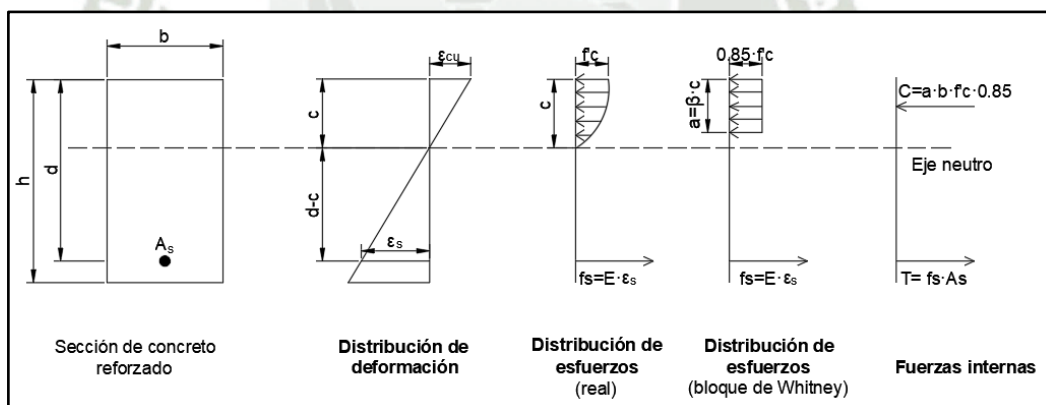
Resumiendo, el código ACI 318-19 (American Concrete Institute, 2019) son:

- Las deformaciones en concreto y refuerzo son directamente proporcionales a su distancia al eje neutro.
- La concreta falla al alcanzar una deformación unitaria ultima de 0.003.
- El esfuerzo en el acero antes de alcanzar la fluencia es igual al producto de su módulo de elasticidad por su deformación unitaria. $f's = E_s * \varepsilon_t$ Ecu. 2
- La resistencia a la tensión del concreto es despreciada
- La distribución de los esfuerzos de compresión en la sección de concreto se ha asumido de modo que sea coherente con los resultados obtenidos en los ensayos. Los requerimientos del punto anterior son satisfechos por la distribución rectangular de esfuerzos, propuesta por Whitney.

4.1.5 Cálculo de resistencia a la flexión

Comenzamos describiendo la distribución de esfuerzos y deformación en una viga sometida a flexión.

Figura 3 *Bloque de Whitney*



Nota. Se evidencia el bloque de Whitney. Tomado de JDMacademy (2023)

Para el diseño, el Reglamento E.060 en el artículo de 10.2.7.3 permite la utilización de una distribución rectangular de esfuerzos de compresión (bloque de Whitney) como reemplazo de distribuciones de esfuerzos más exactas, ver Figura 3. En el bloque rectangular equivalente de esfuerzos, se utiliza un esfuerzo promedio de $0.85f'c$ con un rectángulo de altura $a = \beta_1 * c$ (Ecu. 3). Se ha determinado experimentalmente un valor de β_1 igual a 0.85 para concreto con $f'c$ entre 17 y 28 MPa y menos en 0.05 por cada 7 MPa de $f'c$ sobre 28

MPa, su valor límite inferior de β_1 igual a 0.65 para resistencias del concreto mayores de 56 MPa. (Ministerio de Vivienda, 2009)

Utilizando las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos obtendremos las fórmulas para poder determinar el momento resistente.

$$\Sigma C = \Sigma T$$

$$a \cdot b \cdot f'c \cdot 0.85 = A_s \cdot f_y \quad \text{Ecu. 4}$$

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{b \cdot f'c \cdot 0.85}$$

Si tomamos momentos con respecto donde se aplica la fuerza equivalente de compresión, obtendremos lo siguiente:

$$\Sigma M_c = 0$$

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad \text{Ecu. 5}$$

M_n conocido como momento nominal representa el momento resistente de la sección de viga. Este valor no es el valor que se usa para diseñar debido a que aún falta multiplicarlo por el factor de seguridad.

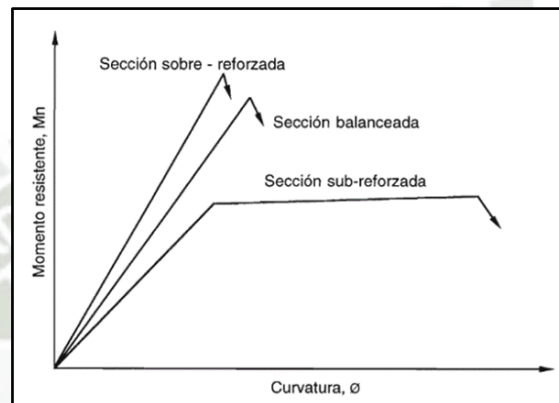
4.1.6 Tipos de fallas

Otro factor importante al momento del análisis de vigas es buscar el tipo de falla que se va a presentar debido a la flexión:

- a) **Falla por tracción:** A estas secciones se les llama sub-reforzada donde el acero fluye, presentando una falla dúctil que es la más recomendable por que advierte con grandes deformaciones antes que el elemento colapse. El código ACI 318-19 establece que esta falla se da cuando la deformación unitaria del refuerzo a tracción ϵ_t es mayor a $\epsilon_y + 0.003$.
- b) **Falla por compresión:** A estas secciones se les llama sobre-reforzada donde el acero no fluye, presentando una falla frágil que es la más peligrosa por que el concreto colapsa repentinamente. El código ACI 318-14 establece que esta falla se da cuando la deformación unitaria del refuerzo a tracción ϵ_t es menor que la deformación unitaria del refuerzo a del acero ϵ_y .

- c) **Falla intermedia:** corresponde a la zona de transiciones en la cual la deformación unitaria neta del refuerzo a tracción ϵ_t se encuentra en el rango de ϵ_y y $\epsilon_y+0.003$. Es importante mencionar que, para elementos sometidos a flexión no presforzados, el Código ACI 318-14 no permite una deformación unitaria del refuerzo a tracción ϵ_t menor a 0.004 en vigas, losas en una y dos direcciones. (American Concrete Institute, 2019)

Figura 4 Diagrama esfuerzo-Curvatura para los distintos tipos de fallas en flexión



Nota. Se evidencia el Diagrama esfuerzo-Curvatura para los distintos tipos de fallas en flexión. Tomado de Harmsen, 2002.

Podemos concluir que una sección sobre-reforzada es más resistente y presenta fallas frágiles que son peligrosas a comparación de una sección sub-reforzada que tiene una resistencia última menor, pero tiene mayor ductilidad. En normativas anteriores como el código ACI 318-11 también se mencionaba a la sección balanceada como límite al momento de diseñar utilizando la cuantía balanceada aminorada por un coeficiente porcentual del 0.75 ρ_b así asegurando el comportamiento dúctil del elemento sometido a flexión. Sin embargo, la normativa vigente del ACI 318-19 ya no presenta este tipo de recomendaciones debido que esta limitación no garantizaba una falla por tracción en el elemento.

4.1.7 Determinación de cuantías

La cuantía es de uso fundamental para poder determinar qué tipo de falla tendrá la viga al momento de llegar a su capacidad máxima. Este valor es la relación entre el área de acero y el área transversal del elemento de concreto.

$$\rho = \frac{A_s}{b * d}$$

a) Cuantía mínima

Si una sección está en la zona controlada a tensión ($\rho f < \rho f b$), se debe proporcionar una cantidad mínima de refuerzo para evitar fallas al agrietarse el concreto $\Phi M_n \geq M_{cr}$, donde M_{cr} es el momento de agrietamiento. Las disposiciones de ACI 318 para refuerzo mínimo se basan en este concepto, y con modificaciones son aplicables a miembros con barras de polímero reforzadas con fibras de vidrio (PRFV).

Área mínima de Acero:

Para el sistema internacional de unidades sería:

$$A_{f,min} = \frac{0.25\sqrt{f'c}}{f_{fu}} b_w d \geq \frac{1.4}{f_{fu}} b_w d \dots(\text{S.I.}) \quad \text{Ecu. 7}$$

Las modificaciones resultan de un factor de reducción de resistencia diferente: 0.55 para secciones controladas por tensión en lugar de 0.9. El área de refuerzo mínima para miembros reforzadas con barras de polímero reforzadas con fibras de vidrio (PRFV) se obtiene multiplicando la ecuación ACI 318 existente para refuerzo de acero por 1.64 ($0.90/0.55=1.64$).

Área mínima de PRFV:

Para el sistema internacional de unidades sería:

$$A_{f,min} = \frac{0.41\sqrt{f'c}}{f_{fu}} b_w d \geq \frac{2.3}{f_{fu}} b_w d \dots(\text{S.I.}) \quad \text{Ecu. 8}$$

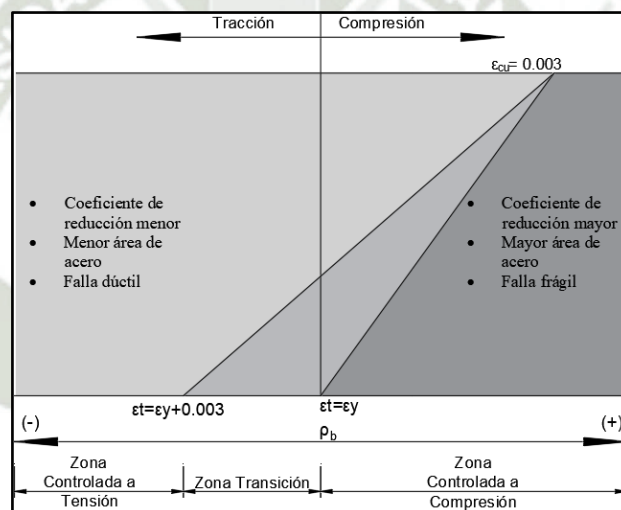
Para las secciones que no están en la zona controlada a tensión ($\rho f > \rho f b$), la cantidad mínima de refuerzo para evitar fallas por fisuración será igual a la cuantía por la falla balanceada. Por lo tanto, la ecuación de $A_{f,min}$ se requiere como verificación sólo si $\rho f \leq \rho f b$. (American Concrete Institute, 2019)

b) Cuantía máxima

Si una sección está en la zona controlada a tensión ($\rho f < \rho f b$), se debe proporcionar una cantidad máxima de refuerzo para así prevenir fallas frágiles, por lo que este concepto no aplica en secciones controladas a compresión.

A lo largo de las diferentes versiones del código ACI 318, se identificó la cuantía máxima, se halló por medio de varios métodos. En primer lugar, podemos utilizar la consideración del código ACI 318-19 donde se usa una deformación unitaria neta mínima de $\epsilon_y + 0.003$. En segundo lugar, el límite que colocó el código ACI 318-14, utilizar como mínimo una deformación unitaria neta mínima de 0.004 y en tercer lugar utilizar la recomendación del código ACI 318-99, utilizar el 75% de la cuantía balanceada.

Figura 5 *Cuantía límite*



El desarrollo de las ecuaciones para determinar la **cuantía máxima** asegurando la falla en zona controlada a tracción según las diferentes versiones del ACI 318:

$$\frac{\epsilon_{cu}}{c} = \frac{\epsilon_t}{d - c} \quad \text{Ecu. 9}$$

$$d - c = \frac{\epsilon_t * C_c}{\epsilon_{cu}}$$

$$d = c + \frac{C_c * \epsilon_t}{\epsilon_{cu}}$$

$$d = c \left(1 + \frac{\epsilon_t}{\epsilon_{cu}} \right)$$

$$C_c = \frac{d}{\left(1 + \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{cu}}\right)}$$

$$a = \beta C_c$$

$$a = \frac{\rho * F_y * d}{0.85 F_c}$$

$$\beta C_c = \frac{\rho * F_y * d}{0.85 F_c}$$

$$\beta * \frac{d}{\left(1 + \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{cu}}\right)} = \frac{\rho * F_y * d}{F_c * 0.85}$$

Finalmente, obtenemos una fórmula para determinar la cuantía máxima dependiendo de los siguientes términos: f'_c , f_y , ε_t , ε_{cu} :

$$\rho = 0.85 * \beta * \frac{f'_c}{f_y} * \frac{\varepsilon_{cu}}{(\varepsilon_{cu} + \varepsilon_t)} \quad \text{Ecu. 10}$$

O

$$\rho = 0.85 * \beta * \frac{f'_c}{f_y} * \frac{E_s * \varepsilon_{cu}}{(E_s * \varepsilon_{cu} + f_y)} \quad \text{Ecu. 11}$$

Haciendo uso de la ecuación 2 y reemplazando la deformación unitaria del refuerzo sometido a tracción y del concreto a compresión. Obtenemos fórmulas más simples de emplear.

$\varepsilon_{cu} = 0.003$ → deformación unitaria límite del concreto

$\varepsilon_y = 0.002$ → deformación a la que el acero entra a su estado plástico

Tabla 10 Resumen de ecuaciones

ACI 318.19	ACI 318.14	ACI 318.99
$\varepsilon_t = 0.003 + \varepsilon_y$	$\varepsilon_t = 0.004$	$\varepsilon_t = \varepsilon_y$
$\rho_{max} = \frac{0.00255}{\left(0.006 + \frac{F_y}{E}\right)} * \frac{\beta \cdot F_c}{F_y}$	$\rho = \frac{51}{140} \cdot \frac{\beta \cdot F_c}{F_y}$	$\rho_b = \frac{0.00255}{\left(0.003 + \frac{F_y}{E}\right)} \cdot \frac{\beta \cdot F_c}{F_y}$

Al reemplazar las variables faltantes con los siguientes datos del acero:

- Resistencia a la fluencia (f_y) 4200 kgf/cm²

- Módulo de elasticidad: 2039432 kgf/cm²

Solo se deja la variable de la resistencia a la compresión del concreto se obtiene la Tabla 11 con las cuantías máximas recomendadas por las diferentes versiones del ACI 318.

Tabla 11 *Cuantías máximas – Refuerzo de acero*

Resistencia del concreto f'c (kgf/cm ²)	Factor Beta β	Cuantía máxima ρ_{max}				
		ACI 318-19	ACI 318-14	ρ_b	$\rho_{max} = 75\% \rho_b$ ACI 318-11	$\rho_{max} = 50\% \rho_b$
210	0.85	1.34%	1.55%	2.14%	1.61%	1.07%
280	0.85	1.79%	2.06%	2.86%	2.14%	1.43%
350	0.8	2.11%	2.43%	3.36%	2.52%	1.68%
420	0.75	2.37%	2.73%	3.78%	2.83%	1.89%

Podemos observar que la nueva consideración de la norma actual del ACI 318-19 (American Concrete Institute, 2019) es la más conservadora a comparación de normas anteriores. Aunque en la práctica se suele utilizar una cuantía máxima del 50% de la cuantía balanceada así asegurando el tipo de falla dúctil y una mayor economía.

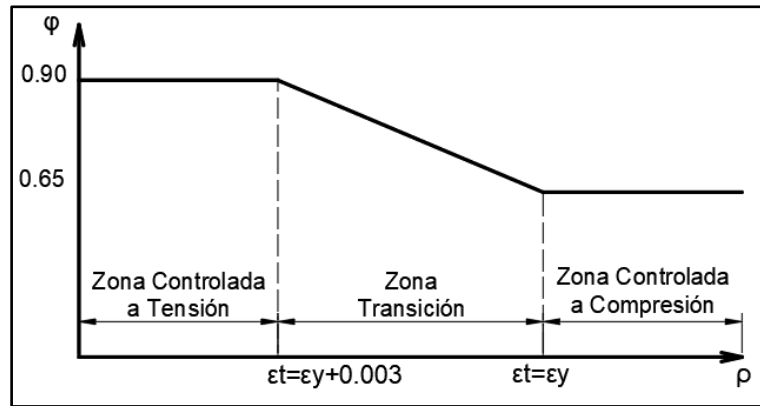
4.1.8 Factores de reducción

El factor de reducción para elementos sometidos a flexión siendo es más o menos conservador según la zona controlada en la que esta, puede ser Zona Controlada a Compresión, Zona Intermedia, Zona Controlada a Tensión.

El factor de reducción con refuerzos de acero oscila entre 0.90 a 0.65, como muestra la siguiente figura.

Para la guía ACI 318-19, el factor Φ para el diseño de una sección que se encuentra en la zona controlada por compresión es 0.65, mientras que para la zona controlada a tensión será 0.90. Como se puede observar en el siguiente gráfico:

Figura 6 *Factor de reducción de refuerzos de acero según su tipo de falla*

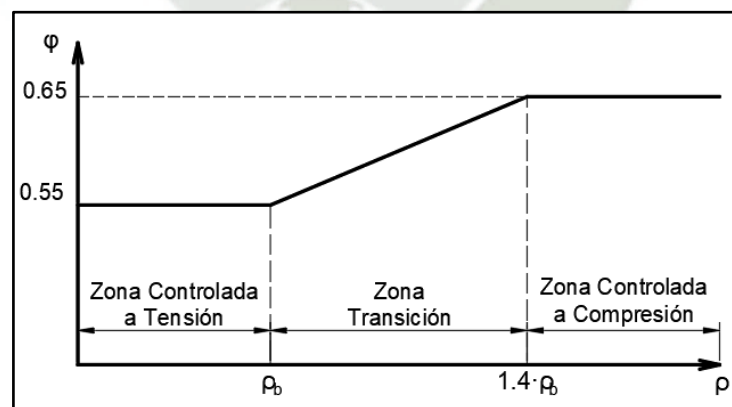


Mientras que el factor de reducción con refuerzos de barras de polímero reforzadas con fibras de vidrio (PRFV) oscila entre 0.55 y 0.65.

Debido a que los miembros de PRFV no exhiben un comportamiento dúctil, se debe optar por un factor de reducción de resistencia conservador para proporcionar una mayor reserva de resistencia en el miembro. Las recomendaciones japonesas para el diseño de miembros a flexión sugieren un factor igual a 0.77 (Sociedad japonesa de Ingenieros Civiles 1997).

Para la guía ACI 400.1R-15, el factor Φ para el diseño de una sección que se encuentra en la zona controlada por compresión es 0.65, mientras que para la zona controlada a tensión será 0.55. Como se puede observar en Figura 7:

Figura 7 Factor de reducción de refuerzos de PRVF según su tipo de falla



Factor de reducción de resistencia en función de la relación de refuerzo

4.2 Cálculos de resistencia a la flexión en vigas con diferentes refuerzos

Según los cálculos que se desarrollarán en este punto se proponen las 10 secciones que se muestran en la figura 7 con diferentes configuraciones de refuerzo transversales haciendo uso de varillas de acero corrugado grado 60 y barras de polímero reforzadas con fibras de vidrio (PRFV).

4.2.1 Vigas con refuerzo de acero - (MRA)

El cálculo que se muestra a continuación de la sección MRA es de manera tradicional y obedece al procedimiento descrito en el punto 5.1.5.

4.2.2 Vigas con refuerzo de polímero reforzado con fibra de vidrio

El cálculo que se muestra a continuación de la sección MRP tiene ciertas consideraciones extras que a comparación del acero.

Las secciones controladas por compresión como las controladas por tracción son aptos en el diseño de miembros a flexión reforzados con barras de polímero reforzados con fibras (FRP), a condición de que se ejecuten los criterios de resistencia y capacidad de servicio. Para compensar la falta de ductilidad, el miembro debe poseer una mayor reserva de resistencia. Por lo tanto, el margen de seguridad sugerido por esta guía contra fallas es mayor que el utilizado en el diseño tradicional de concreto reforzado con acero. Si el refuerzo de barra de polímero reforzada con fibra de vidrio (PRFV) se falla, la falla del miembro es repentina y puede ser catastrófica.

Las siguientes recomendaciones para el diseño general del PRFV se basan en principios de equilibrio y compatibilidad, y en las leyes constitutivas de los materiales. Las recomendaciones de diseño se basan en principios de diseño de estados límite.

Las hipótesis que se emplearán para el PRFV serán las mismas que las usadas para el acero por el código ACI 318-19.

Factor de reducción ambiental

La resistencia a la tracción son una de las propiedades proporcionadas por el fabricante; sin embargo, estas propiedades deben reducirse según el tipo y nivel de

exposición ambiental. Por ello la resistencia a la tracción se hallará mediante la siguiente fórmula:

$$F_{fu} = C_{mi} F_{fu}^*$$

F_{fu} : Resistencia a la tracción (diseño)

F_{fu}^* : Resistencia a la tracción garantizada

C_{mi} : Factor de reducción ambiental

*El módulo de elasticidad será el mismo entregado por el fabricante

El valor será elegido en la Tabla 12:

Tabla 12 Valores

Condición de exposición	Tipo de fibra	Factor de reducción ambiental C_{mi}
Concreto no expuesto a tierra y al clima	Carbón	1.0
	Vidrio	0.8
	Aramida	0.9
Concreto expuesto a tierra y al clima	Carbón	0.9
	Vidrio	0.7
	Aramida	0.8

4.2.3 Cálculo del Momento resistente a la flexión

La capacidad de flexión de un elemento reforzado con barras de polímero reforzadas con fibras de vidrio (PRFV) depende de si está en la zona controlada a tensión o compresión.

Cuando $\rho_f > \rho_{fb}$, el estado límite de control es la zona controlada a compresión, y la distribución de tensiones en el hormigón se puede aproximar con el bloque de tensiones de Whitney del ACI. Con base en el equilibrio de fuerzas y la compatibilidad de deformaciones, se puede derivar lo siguiente:

$$M_n = A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad \text{Ecu. 13}$$

$$a = \frac{A_f f_f}{0.85 f'_c (b)} \quad \text{Ecu. 14}$$

$$f_f = E_f \epsilon_{cu} \frac{\beta_1 d - a}{a} \quad \text{Ecu. 15}$$

Sustituyendo las ecuaciones 31 y 32 y despejando f_f tenemos:

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \epsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{\rho f} E_f \epsilon_{cu} - 0.5 E_f \epsilon_{cu}} \right) \leq f_{fu} \quad \text{Ecu. 16}$$

La resistencia nominal a la flexión se puede calcular a partir de la ecuación 13, 14 y 15. El refuerzo del PRFV es linealmente elástico en el estado límite de la zona controlada a compresión, por lo que el nivel de tensión del PRFV se puede encontrar a partir de la ecuación 16 porque es menor que f_{fu} .

Alternativamente, la resistencia nominal a la flexión en una sección se puede expresar en términos de la relación de refuerzo de PRFV, como se indica en la siguiente ecuación:

$$M_n = \rho f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho f f_f}{f'_c} \right) b d^2 \quad \text{Ecu. 17}$$

Cuando $\rho f < \rho f_b$, el estado límite la zona controlada a tensión, y la resistencia nominal a la flexión en una sección se puede calcular como se muestra a continuación:

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 C}{2} \right) \quad \text{Ecu. 18}$$

Aunque se conoce la tensión en el refuerzo, el análisis incorpora dos incógnitas: la deformación compresiva del hormigón en último momento cuando el PRFV se rompe en tensión (ϵ_c) y la profundidad al eje neutro C. El análisis que involucra estas incógnitas se vuelve complejo y no se resuelve fácilmente mediante una solución de forma cerrada. Los parámetros del bloque de tensión de Whitney equivalente de ACI tampoco son aplicables porque es posible que no se alcance la deformación máxima del hormigón ($\epsilon_c < \epsilon_{cu}$). En este caso, los parámetros del bloque de tensión de Whitney equivalente (α_1 y β_1) que se aproximan al centroide de la distribución de tensiones en el hormigón en el nivel de deformación particular alcanzado. El factor α_1 es la relación entre la tensión promedio del hormigón y la resistencia del hormigón. El factor β_1 es la asociación entre la profundidad del bloque de tensión de Whitney equivalente y la profundidad del eje neutro.

Para una sección dada, el producto de β_1 en la ecuación 13 varía según las características del material y la proporción de refuerzo del PRFV. Para una sección en la zona controlada tensión, el valor máximo para este producto es igual a $\beta_1 C_b$ y se logra cuando se alcanza la deformación máxima del hormigón (0.003). Por lo tanto, un cálculo del

límite inferior simplificado y conservador de la resistencia nominal a la flexión del miembro puede basarse en las siguientes dos ecuaciones:

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 C_b}{2} \right)$$

$$C_b = \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu}} \right) d$$

En esta investigación se diseñará compuestos sometidos a flexión, que se encuentren en un área controlada a compresión, debido a que el procedimiento más seguro; puesto que, tenemos mayor control de las variables con fórmulas más simplificadas.

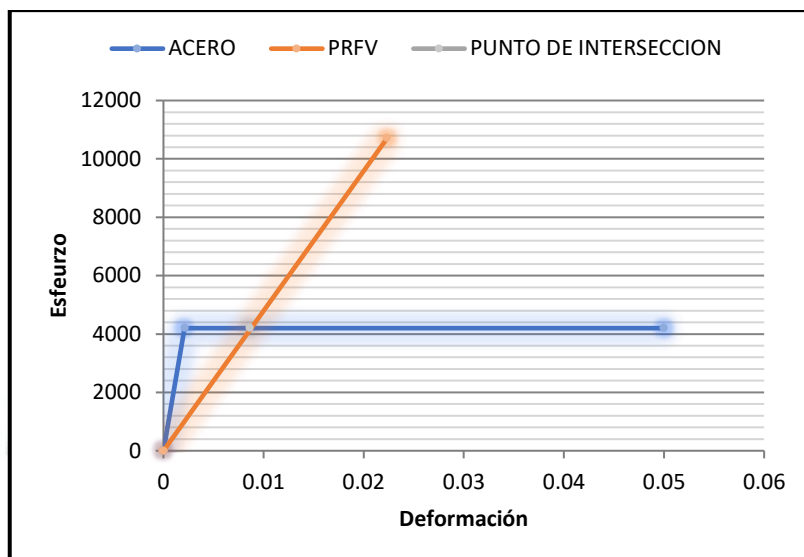
4.2.4 Vigas con refuerzo híbrido - (MRH)

- Cálculo manual

Para el correcto desenvolvimiento de este tipo de sección de viga que será ensayará a flexión, se debe tener los siguientes conceptos:

- La deformación del concreto y de los refuerzos es directamente proporcional al eje neutro.
- El polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) es un compuesto de gran resistencia, pero con módulo de elasticidad más bajo que el del acero, por lo que para poder desarrollar mayores resistencias se tiene deformar más.
- Es conveniente utilizar al PRFV como un refuerzo de vigas que tengan un más de una fila de refuerzos, así aseguramos que el PRFV obtenga mayor deformación de sus fibras, de tal manera que es posible llegar a mayores resistencias a la tracción.
- El PRFV al ser un material no corrosible es posible que disminuir el recubrimiento mínimo. (con el fin de cumplir con la relación que más adelante se explicará)..

Figura 8 Grafico esfuerzo deformación del acero y el polímero reforzado con fibras de vidrio (PRFV)



Ecuaciones típicas

$$E = fs/\varepsilon \quad \text{Ecu. 21}$$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{c} = \frac{\varepsilon_t}{d_1 - c} = \frac{\varepsilon_{prfv}}{d_2 - c} \quad \text{Ecu. 22}$$

$$C = T_1 + T_2$$

$$a \cdot b \cdot f'c \cdot 0.85 = A_s \cdot fy + A_{prfv} \cdot fs$$

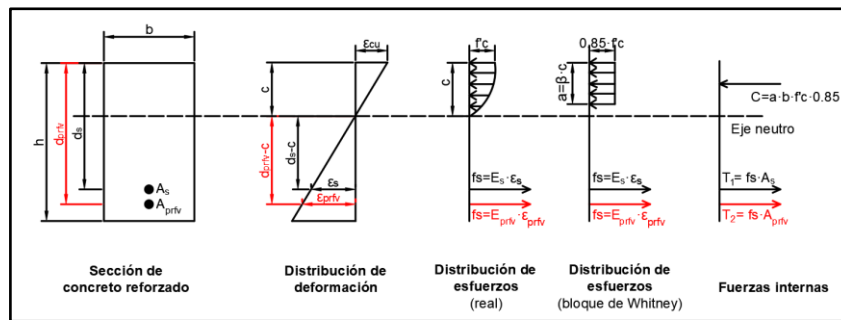
$$a = \frac{A_s \cdot fy + A_{prfv} \cdot fs}{b \cdot f'c \cdot 0.85} \quad \text{Ecu. 23}$$

$$Mn = A_s \cdot fy \cdot \left(d_1 - \frac{a}{2}\right) + A_{prfv} \cdot fs \cdot \left(d_2 - \frac{a}{2}\right) \quad \text{Ecu. 24}$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{b \cdot d_1} \quad \text{Ecu. 25}$$

$$\rho_2 = \frac{A_{prfv}}{b \cdot d_2} \quad \text{Ecu. 26}$$

Figura 9 Distribución del esfuerzo y de la deformación para una sección rectangular



Desarrollo de ecuaciones

PASO 1: Análisis de caso de falla balanceada de la sección, se considerará lo siguiente:

Para lograr que el acero fluya su deformación unitaria debe pasar 0.0021 al mismo tiempo que el concreto llega a su límite, se considera que la deformación unitaria máxima a compresión que pueda soportar el concreto es de 0.003. Una definidos los parámetros comenzamos con el desarrollo de ecuaciones.

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{c} = \frac{\varepsilon_t}{d_1 - c} \rightarrow \frac{0.003}{c} = \frac{0.0021}{d_1 - c}$$

$$c = \frac{10}{17} * d_1 \quad \text{Ecu. 27}$$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{c} = \frac{\varepsilon_{prfv}}{d_2 - c} \rightarrow \frac{0.003}{c} = \frac{fs/E_{prfv}}{d_2 - c}$$

$$(d_2 - c) * \frac{0.003}{c} = fs/E_{prfv}$$

$$\frac{17}{10d_1} \cdot \left(d_2 - \frac{10}{17} * d_1 \right) \cdot 0.003d_1 = fs/E_{prfv}$$

$$fs/E_{prfv} = 0.0051 \cdot \frac{d_2}{d_1} - 0.003 \quad \text{Ecu. 28}$$

Utilizando (ecu. 28) y asignando una deformación unitaria del polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) de 0.00876 para que nos entregue una resistencia mayor o igual a los 4200 kgf/cm².

Logramos lo siguiente:

$$\varepsilon_{prfv} = 0.0051 \cdot \frac{d_2}{d_1} - 0.003$$

$$0.00876 = 0.0051 \cdot \frac{d_2}{d_1} - 0.003$$

$$\frac{d_2}{d_1} = 2.25$$

Se concluye que si la relación **d2/d1 es igual a 2.25** tendemos fallas balanceadas.

PASO 2: Análisis de caso de falla dúctil de la sección, se considerará lo siguiente.

Para lograr que el acero fluya antes que el concreto su deformación unitaria debe pasar 0.005, También se considera que la deformación unitaria máxima a compresión que pueda soportar el concreto es de 0.003. Una vez que se definidos los parámetros comenzamos con el desarrollo de ecuaciones.

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{c} = \frac{\varepsilon_t}{d_1 - c} \rightarrow \frac{0.003}{c} = \frac{0.005}{d_1 - c}$$

$$c = 0.375 * d_1$$

Ecu. 30

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{c} = \frac{\varepsilon_{prfv}}{d_2 - c} \rightarrow \frac{0.003}{c} = \frac{\varepsilon_{prfv}}{d_2 - c}$$

$$(d_2 - c) * \frac{0.003}{c} = f_s / E_{prfv}$$

$$\frac{d_2 \cdot 0.003 - 0.375d_1 \cdot 0.003}{0.375d_1} = f_s / E_{prfv}$$

$$f_s / E_{prfv} = 0.008 \cdot \frac{d_2}{d_1} - 0.003$$

Ecu. 31

Utilizando (ecu. 31) y asignando una deformación unitaria del polímero reforzado con fibras de vidrio (**PRFV**) de **0.00876** para que nos entregue una resistencia mayor o igual a los 4200 kgf/cm².

Logramos lo siguiente:

$$\frac{f_s}{E_{prfv}} = 0.008 \cdot \frac{d_2}{d_1} - 0.003$$

$$0.00876 = 0.008 \cdot \frac{d_2}{d_1} - 0.003$$

$$\frac{d_2}{d_1} \leq 1.47 \quad \text{Ecu. 32}$$

Se concluye que con si la relación **d2/d1 menor o igual que 1.47** tendemos fallas dúctiles.

PASO 3: Desarrollo de una cuantía balanceada.

Ya tenemos la relación de las profundidades que se deben colocar los refuerzos ahora el siguiente paso es ver cuánto refuerzo se debe colocar para asegurar dicha falla balanceada.

Haciendo uso de la ecuación 23 y 27.

$$\frac{A_s \cdot f_y + A_{prfv} \cdot f_s}{b \cdot f'_c \cdot 0.85} = \frac{10}{17} * \beta d_1$$

Luego reemplazamos el área de refuerzo por sus valores en cuantías usando las ecuaciones 25 y 26.

$$\frac{\rho_1 \cdot b \cdot d_1 \cdot f_y + \rho_2 \cdot b \cdot d_2 \cdot f_s}{b \cdot f'_c \cdot 0.85} = \frac{10}{17} * \beta d_1$$

$$\rho_1 \cdot d_1 \cdot f_y + \rho_2 \cdot d_2 \cdot f_s = \frac{10}{17} * \beta \cdot d_1 \cdot f'_c \cdot 0.85$$

$$\rho_1 \cdot f_y + \rho_2 \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot f_s = \frac{10}{17} \cdot \beta \cdot f'_c \cdot 0.85$$

Asegurando una proporción aproximada $\frac{d_2}{d_1} \approx 2.25$, podemos llegar a un valor fs cercado y hasta por encima de 4200kgf/cm².

Entonces:

$$f_y \cong f_s$$

$$\rho_1 \cdot f_y + \rho_2 \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot f_y = \frac{10}{17} \cdot \beta \cdot f'_c \cdot 0.85$$

$$\rho_{total_b} = \rho_1 + \rho_2 \cdot \frac{d_2}{d_1} \leq 0.5 \cdot \beta \cdot \frac{f'_c}{f_y} \quad \text{Ecu. 33}$$

PASO 4: Desarrollo de una cuantía dúctil.

Ya tenemos la relación de las profundidades que se deben colocar los refuerzos ahora el siguiente paso es ver cuánto refuerzo se debe colocar para asegurar dicha falla balanceada.

Haciendo uso de las ecuaciones 23 y 27.

$$\frac{A_s \cdot f_y + A_{prfv} \cdot f_s}{b \cdot f'_c \cdot 0.85} = 0.375 \cdot \beta \cdot d_1$$

Luego reemplazamos el área de refuerzo por sus valores en cuantías usando las ecuaciones 25 y 26.

$$\frac{\rho_1 \cdot b \cdot d_1 \cdot f_y + \rho_2 \cdot b \cdot d_2 \cdot f_s}{b \cdot f'c \cdot 0.85} = 0.375 \cdot \beta d_1$$

$$\rho_1 \cdot d_1 \cdot f_y + \rho_2 \cdot d_2 \cdot f_s = 0.375 \cdot \beta \cdot d_1 \cdot f'c \cdot 0.85$$

$$\rho_1 \cdot f_y + \rho_2 \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot f_s = 0.375 \cdot \beta \cdot f'c \cdot 0.85$$

Asegurando una proporción aproximada de $\frac{d_2}{d_1} \approx 1.45$, podemos llegar a un valor f_s cercano y hasta por encima de 4200kgf/cm².

Entonces:

$$f_y \cong f_s$$

Ecu. 34

$$\rho_1 \cdot f_y + \rho_2 \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot f_y = 0.375 \cdot \beta \cdot f'c \cdot 0.85$$

$$\rho_{total_d} = \rho_1 + \rho_2 \cdot \frac{d_2}{d_1} = 0.32 \cdot \beta \cdot \frac{f'c}{f_y}$$

Según las varias simulaciones que se hicieron según los cálculos y el software se pudo concluir que para obtener los mejores resultados aprovechando las características de ambos tipos de refuerzos, se tiene que usar las siguientes verificaciones:

- $\frac{d_2}{d_1} \leq 1.47$
- $\rho_{ACERO} \geq 50\%$
- $\rho_{PRFV} \leq 50\%$
- $\rho_{TOTAL} \leq 0,32 * \frac{f'c}{f_y} * \beta$

4.3 Procedimiento del armado de vigas para ensayos

a. Preparación del encofrado

Se cortaron las planchas de fenólico para armar los encofrados, en total fueron 6 cuyas dimensiones son de 15x15x70 cm.

b. Preparación del refuerzo longitudinal

Las varillas de PRFV ya nos la entregan con las dimensiones solicitadas por lo tanto no hace falta hacer alguna modificación en obra.

Se cortaron las varillas de acero para las dimensiones requeridas según nuestros moldes de los encofrados

c. Preparación del refuerzo transversal

Se cortaron y doblaron los estribos de acuerdo con el refuerzo y encofrado que utilizamos

d. Preparación previa al vaciado

Una vez tenemos todo preparado, primero aplicamos petróleo a las caras internas del encofrado, luego se colocan los dados de concreto de 2 cm para colocarle encima el refuerzo y finalmente anclar los estribos.

e. Preparación de los materiales y mezclado de concreto

De acuerdo con la dosificación previamente hallada en laboratorio según las propiedades de nuestros materiales, procedemos a pesar todo por baldes, y al tener todo listo encendemos el trompo para verter los baldes por tanda de concreto.

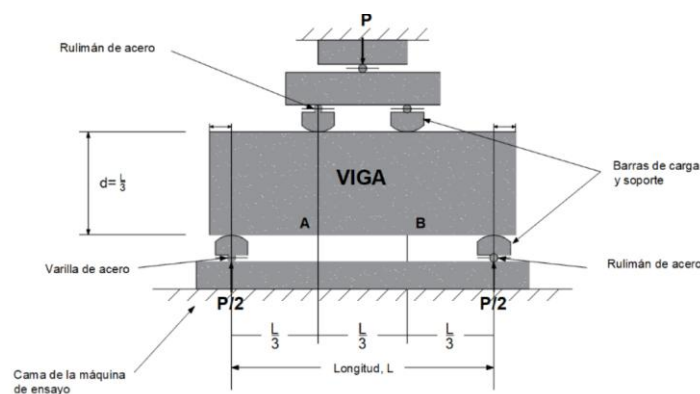
f. Vaciado de vigas

El concreto es vaciado en nuestros moldes de vigas previamente preparados, se hace con sumo cuidado para que el concreto no mueva de lugar a las vigas ni a los estribos. Finalmente dejamos las vigas reposar durante 24 horas.

g. Curado de concreto

Luego de las 24 horas procedemos a desmoldar, marcar las vigas con su código y las colocamos en la piscina para dejarlo curar por 28 días, para luego proceder con los ensayos.

Figura 10 Esquema del ensayo de flexión para vigas reforzadas





4.4 Presentación de variables

En este ítem, se exponen los hallazgos que se obtuvieron a través de pruebas de laboratorio, información proporcionada por el fabricante del Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV), y cálculos manuales. El objetivo es presentar la evidencia necesaria para resolver las hipótesis planteadas en esta investigación.

Resistencia a la compresión

Se evaluó la resistencia de las 8 probetas bajo carga y se obtuvo la resistencia promedio.

La probeta 6 fue descartada en el promedio debido a que su resultado arrojó un valor atípico en comparación al resto, considerando que todas las probetas se vaciaron con la misma mezcla y se le atribuye esta desviación un error al momento de la ruptura.

Tabla 13 Resultados de resistencia a la compresión de las probetas de concreto

N° TESTIGO	FECHA		Edad Días	D cm	Area cm ²	Carga Kgf	Resistencia			
	Moldeo	Rotura					f ^c _{real} Kgf/cm ²	f ^c Kgf/cm ²	f ^{cr} Kgf/cm ²	%f ^{cr} %
Prob. 1	31-Ene-25	05-Mar-25	33	10	78.5	13021	165.8	175	245	68%
Prob. 2	31-Ene-25	05-Mar-25	33	10	78.5	15168	193.1	175	245	79%
Prob. 3	31-Ene-25	05-Mar-25	33	10	78.5	13361	170.1	175	245	69%
Prob. 4	31-Ene-25	05-Mar-25	33	10	78.5	14696	187.1	175	245	76%
Prob. 5	31-Ene-25	05-Mar-25	33	10	78.5	15116	192.5	175	245	79%
Prob. 6	31-Ene-25	05-Mar-25	33	10	78.5	9102	115.89	175	245	47%
Prob. 7	31-Ene-25	05-Mar-25	33	10	78.5	11653	148.4	175	245	61%
Prob. 8	31-Ene-25	05-Mar-25	33	10	78.5	11968	152.4	175	245	62%

- f^c promedio= 172.77 kgf/cm²
- Desviación estándar= 18.60 kgf/cm²

Costos de varillas

Se compararon los precios de las **varillas de refuerzo de 9 m de longitud** de polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) con los de acero.

La Tabla 14 plasma la comparanza de precios, donde se observa que el precio por varilla de PRFV es **aproximadamente 30% menor en comparación con el acero.**

Tabla 14 Comparación de precios de varillas de acero y el polímero reforzado con fibras de vidrio (PRFV) según su diámetro

DIAMETRO	Área (cm ²)	Volumen (m ³)	Peso por Varilla (kgf)		Peso por metro de var. (kgf/m)		Precio por Metro Lineal		Precio por Kilogramo	
			Acero	PRFV	Acero	PRFV	Acero	PRFV	Acero	PRFV
6mm	0.28	0.00025	2.00	0.53	0.222	0.059	S/ 9.30	S/ 6.30	S/ 4.66	S/ 3.15
1/4"	0.32	0.00029	2.24	0.60	0.249	0.067	S/ 10.00	S/ 6.60	S/ 4.47	S/ 2.95
8mm	0.50	0.00045	3.55	0.95	0.395	0.106	S/ 16.50	S/ 11.80	S/ 4.65	S/ 3.32
3/8"	0.71	0.00064	5.03	1.35	0.559	0.150	S/ 23.00	S/ 16.00	S/ 4.57	S/ 3.18
12mm	1.13	0.00102	7.99	2.14	0.888	0.238	S/ 37.00	S/ 24.00	S/ 4.63	S/ 3.00
1/2"	1.27	0.00114	8.95	2.39	0.994	0.266	S/ 41.50	S/ 28.20	S/ 4.64	S/ 3.15
5/8"	1.98	0.00178	13.98	3.74	1.554	0.416	S/ 64.00	S/ 44.90	S/ 4.58	S/ 3.21
3/4"	2.85	0.00257	20.14	5.39	2.237	0.599	S/ 93.80	S/ 60.50	S/ 4.66	S/ 3.00

La Tabla 14 también contiene información sobre cómo las varillas de PRFV son mucho más livianas que las de acero corrugado, con una diferencia promedio de peso aproximadamente 3.75 veces menor.

Figura 11 Comparación gráfica de los costos unitarios de varillas corrugadas de acero y el polímero reforzado con fibras de vidrio (PRFV) según el diámetro



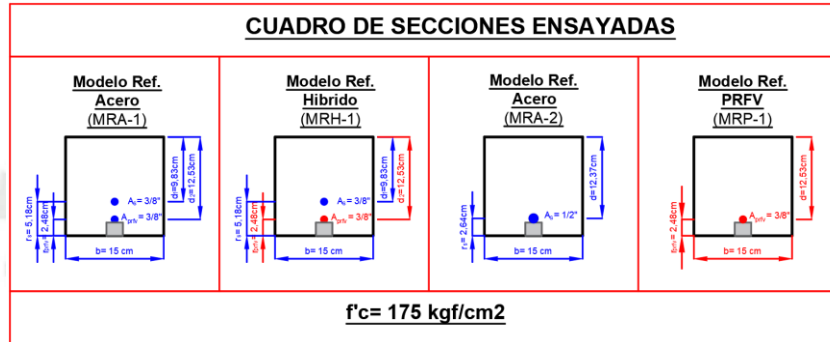
DISEÑOS DE VIGAS

Para el diseño de las vigas, se consideraron dos casos:

- Vigas ensayadas:** Estas vigas fueron diseñadas con las características necesarias para su ensayo en laboratorio, con dimensiones de 15 × 15 cm, una resistencia a la

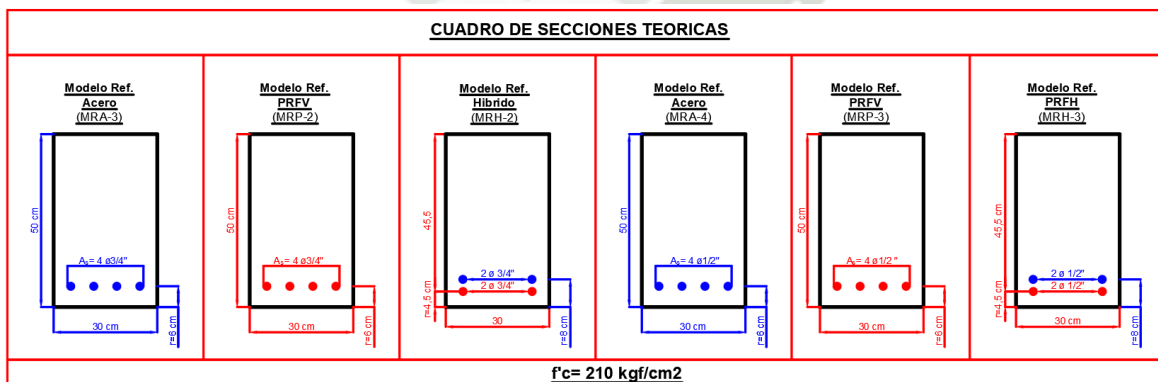
compresión de 175 kgf/cm^2 y una cuantía de refuerzo baja, lo que permitió inducir una falla controlada mediante el instrumento de ensayo.

Figura 12 Detalle de las secciones transversales de las vigas ensayadas con refuerzo de acero, polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) e híbrido



- b) **Vigas teóricas:** Se modelaron vigas con dimensiones más cercanas a las de uso real para evaluar la concordancia de los resultados de laboratorio con un modelo a escala real. Estas vigas tienen dimensiones de $50 \times 30 \text{ cm}$ y una resistencia a la compresión de 210 kgf/cm^2 . Se probó el uso de dos cuantías: una mínima y otra intermedia entre la máxima y la mínima, con el propósito de determinar cuál ofrece mejores resultados.

Figura 13 Detalle de las secciones teóricas modeladas para análisis estructural con refuerzo de acero, polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) e híbrido



4.5 Resultados de ensayos validados

A partir de las variables descritas en la sección anterior, las ecuaciones desarrolladas y el análisis computacional, se determinaron la resistencia a la flexibilidad, la cuantía óptima y los costos de refuerzo. Estos parámetros son esenciales con relación a la comprobación de las hipótesis propuestas en esta investigación.

La validación de los hallazgos teóricos se realizó por medio de la comparación con los hallazgos conseguidos en las pruebas.

Los resultados obtenidos respaldan las ecuaciones desarrolladas en esta investigación. Tal como se ve en la Tabla 13, los hallazgos conseguidos mediante el método manual y el computacional presentan una validación mutua en términos de resistencia y ductilidad. Por lo tanto, para el siguiente punto de análisis comparativo, se utilizará el promedio de ambos resultados.

4.6 Resultados de ejercicios teóricos de viabilidad

Una vez validados los resultados en la sección anterior, se presenta un ejemplo teórico de vigas que podrían emplearse en casos reales. Se siguió el mismo procedimiento para obtener resultados y analizar su relación con los hallazgos conseguidos en las pruebas de laboratorio.

Tabla 15 Comparación de resultados entre vigas virtuales y ensayadas: resistencia, costo y ductilidad

DATOS GENERALES						COSTOS			CARGAS Y RESISTENCIA						DUCTILIDAD	
ORDEN	TIPO	f _c kgf/cm ²	Descripción de refuerzos	As cm ²	Cuantía %	Costo de Refuerzo* S/	Costo Unit. Ref. (S/)/m		Carga (P) Kgf	Distancia entre apoyos (l) m	Momento Cal. en Lab. (M.L.) kgf-m	Momento Cal. en Lab. (M.L.) PROMEDIO kgf-m	Momento Cal. Manual (M. M.) kgf-m	Momento Cal. Software (M.S.) kgf-m	Curvatura Cal. Manual (M. M.)	Curvatura Cal. Software (M.S.)
Viga Virtual	MRA-1	175	Ref. Acero: 1φ 3/8" Ref. Acero: 1φ 3/8"	1.42	0.85%	S/ 23.00	S/2.56	S/ 5.11		Virtual			588.3	592.9	9.54E-4	9.80E-4
Viga 4	MRH-1	175	Ref. Acero: 1φ 3/8"	0.71	0.96%	S/ 23.00	S/2.56	S/ 4.33	8533	0.150	640.0	654.2	591.1	619.2	9.48E-4	1.00E-3
Viga 6			Ref. Acero: 1φ 3/8"	0.71		S/ 16.00	S/1.78		8331	0.150	624.8					
Viga 7			Ref. PRFV: 1φ 3/8"	0.71		S/ 16.00	S/1.78		9303	0.150	697.7					
Viga Virtual	MRA-2	175	Ref. Acero: 1φ 3/8"	0.71	0.38%	S/ 23.00	S/2.56	S/ 2.56		Virtual			352.8	354.9	1.91E-3	2.08E-3
Viga 1	MRP-1	175	Ref. PRFV: 1φ 3/8"	0.71	0.38%	S/ 16.00	S/1.78	S/ 1.78	7931	0.150	594.8	546.7	510.3	539.0	1.28E-3	1.33E-3
Viga 2									8016	0.150	601.2					
Viga 3									7273	0.150	545.5					
Viga 5									7641	0.150	573.1					
Viga 8									5586	0.150	419.0					

Tabla 16 Resultados teóricos de viabilidad estructural y económica en modelos a escala real con refuerzo de acero, polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) e híbrido

DATOS GENERALES								COSTOS			CARGAS Y RESISTENCIA		DUCTILIDAD	
TIPO	Recubrimiento	fc	Descripción de refuerzos	As	Cuantía Max	Cuantía Real	Cuantía Min	Costo de Refuerzo*	Costo Unit. Ref.		Momento Cal. Manual (M. M.)	Momento Cal. Software (M.S.)	Curvatura Cal. Manual (M. M.)	Curvatura Cal. Software (M.S.)
		kgf/cm ²		cm ²	%	%	%	S/	(S/)/m		kgf-m	kgf-m		
MRA-3	r= 6cm	210	Acero 4ø3/4"	11.36	1.34%	0.86%	0.33%	S/ 93.80	S/10.42	S/41.69	18.87	19.04	2.86E-04	3.10E-04
MRP-2	r= 6cm	210	PRFV 4ø3/4"	11.36	-	0.86%	0.36%	S/ 60.50	S/6.72	S/26.89	19.53	20.52	2.75E-04	2.85E-04
MRH-2	r1= 8 cm r2= 4.5 cm	210	Acero 2ø3/4" PRFV 2ø3/4"	11.36	1.36%	0.90%	-	S/ 93.80 S/ 60.50	S/10.42 S/6.72	S/34.28	19.51	18.92	2.75E-04	3.11E-04
MRA-4	r= 6cm	210	Acero 4ø1/2"	5.16	1.34%	0.39%	0.33%	S/ 41.50	S/4.61	S/18.44	9.10	9.13	6.30E-04	6.83E-04
MRP-3	r= 6cm	210	PRFV 4ø1/2"	5.16	-	0.39%	0.36%	S/ 28.20	S/3.13	S/12.53	14.26	14.95	3.90E-04	4.04E-04
MRH-3	r1= 8 cm r2= 4.5 cm	210	Acero 2ø1/2" PRFV 2ø1/2"	5.16	1.36%	0.41%	-	S/ 41.50 S/ 28.20	S/4.61 S/3.13	S/15.48	13.43	13.54	4.46E-04	4.52E-04

4.7 Análisis comparativo

4.7.1 Costos

La Figura 14 muestra los costos unitarios de los refuerzos usados en las **vigas ensayadas**, y la Tabla 17 se contiene el ahorro en porcentaje con respecto a los refuerzos tradicionales.

Figura 14 Comparación de costo unitario por metro lineal de refuerzo según tipo de viga ensayada

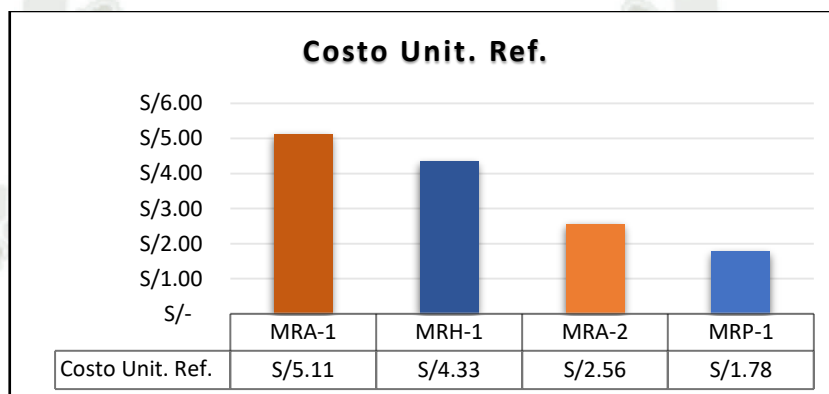


Tabla 17 Beneficio en Costo

Beneficio en Costos	
Comparación	Ahorro
MRH-1/MRA-1	15.2%
MRP-1/MRA-2	30.4%

La Figura 15 muestra los costos unitarios de los refuerzos usados en los **ejemplos teóricos**, y la Tabla 18 se contiene el ahorro en porcentaje con respecto a los refuerzos tradicionales.

Figura 15 Comparación del costo unitario del refuerzo en las vigas teóricas con acero, polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) e híbrido

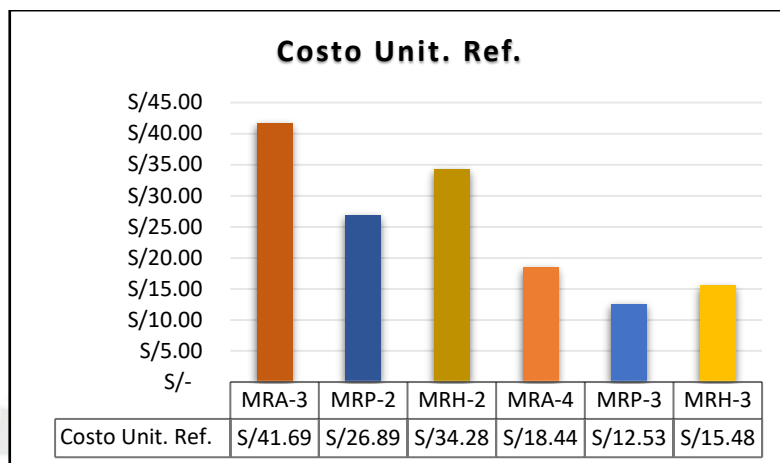


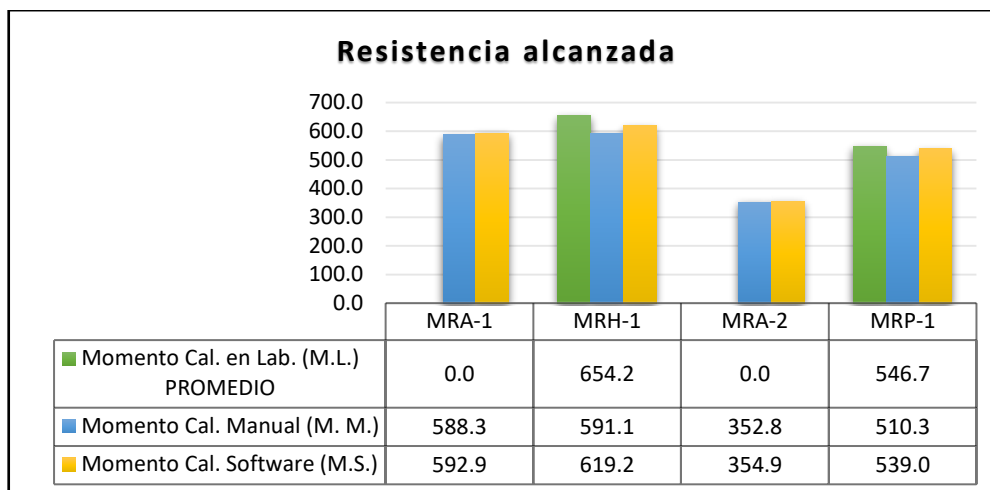
Tabla 18 Resumen porcentual del ahorro en costos de refuerzo al usar polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) o combinaciones híbridas en comparación con el acero corrugado

Beneficio en Costos	
Comparación	Ahorro
MRP-2/MRA-3	35.5%
MRH-2/MRA-3	17.8%
MRP-3/MRA-4	32.0%
MRH-3/MRA-4	16.1%

4.7.2 Resistencia

La figura 15 presenta la comparación de **la resistencia alcanzada en los ensayos** con los valores calculados teóricamente (métodos manual y computacional). En el mismo grafico se compara la utilización de refuerzo con barras de polímero reforzado con fibras de vidrio (PRFV) e híbrido frente al refuerzo convencional de acero.

Figura 16 Comparación de resistencias: laboratorio, cálculo manual y software



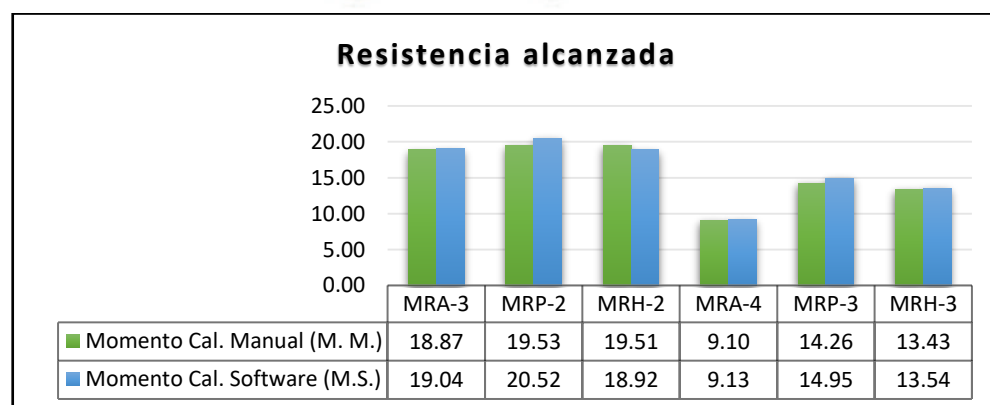
La Tabla 19 se observan las relaciones porcentuales de los resultados de resistencia entre los modelos con refuerzo híbrido y con refuerzo de PRFV versus el refuerzo convencional.

Tabla 19 Resumen de momentos resistentes teóricos y experimentales

Comparación	Beneficio en Resistencia				Resultados Exp./Teo.
	Met. Manual	Met. Software	Calculo Teórico (Promedio)	Calculo Experimental	
MRH-1/MRA-1	100.5%	104.4%	102.5%	110.8%	108.1%
MRP-1/MRA-2	144.6%	151.9%	148.3%	154.5%	104.2%

En la Figura 17 de resistencias alcanzadas con respecto a los **ejemplos teóricos**, se compara la utilización de refuerzo con polímero con reforzamiento de fibras de vidrio (PRFV) e híbrido frente al refuerzo convencional de acero.

Figura 17 Resumen de momentos resistentes teóricos y experimentales



La Tabla 20 se observan las relaciones porcentuales de los resultados de resistencia entre los modelos con refuerzo híbrido y con refuerzo de PRFV versus el refuerzo convencional.

Tabla 20 Comparación porcentual del momento flector

Comparación	Beneficio en Resistencia		Promedio
	Met. Manual	Met. Software	
MRP-2/MRA-3	103.5%	107.8%	105.6%
MRH-2/MRA-3	103.4%	99.4%	101.4%
MRP-3/MRA-4	156.7%	163.7%	160.2%
MRH-3/MRA-4	147.5%	148.3%	147.9%

4.7.3 Ductilidad

La comparación de la ductilidad en las **vigas ensayadas** se realiza entre la curvatura obtenida mediante los cálculos manuales y los resultados del software.

Figura 18 Comparación de curvaturas para evaluar ductilidad entre resultados manuales y de cálculo de software

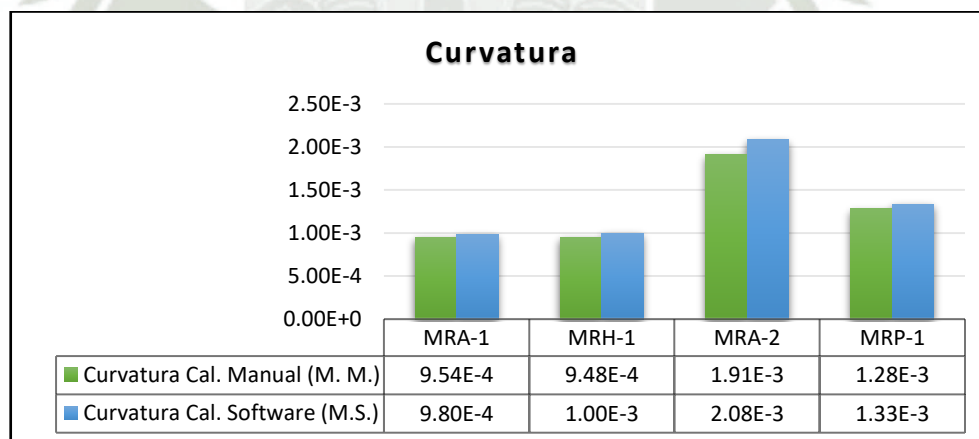


Tabla 21 Porcentaje comparativo de curvaturas entre modelos

Comparación	Comparación de Curvaturas		Promedio
	Met. Manual	Met. Software	
MRH-1/MRA-1	99%	102%	101%
MRP-1/MRA-2	67%	64%	66%

De manera similar, la comparación de la ductilidad en los **ejemplos teóricos** se realiza entre la curvatura obtenida mediante los cálculos manuales y los resultados del software, debido a la misma limitación en la medición de la deformación.

Figura 19 Comparación de la curvatura entre resultados manuales y de software

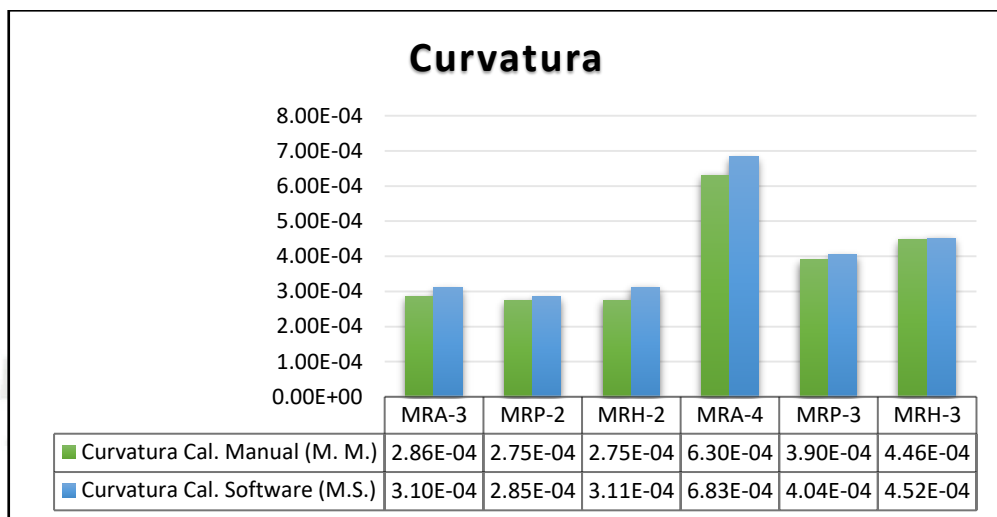


Tabla 22 Porcentaje comparativo de curvaturas entre modelos

Comparación de Curvaturas			
Comparación	Met. Manual	Met. Software	Promedio
MRP-2/MRA-3	96.1%	91.7%	93.9%
MRH-2/MRA-3	96.1%	100.2%	98.1%
MRP-3/MRA-4	61.9%	59.1%	60.5%
MRH-3/MRA-4	70.8%	66.2%	68.5%

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusión General

El estudio del comportamiento estructural teórico y experimental de vigas con refuerzo híbrido de barra de polímero reforzada con fibra de vidrio (PRFV) y acero, demostró que existe una asociación directamente proporcional entre la cuantía y la resistencia a la flexión e inversamente proporcional entre la cuantía y la ductilidad. Se observó que el refuerzo híbrido tiene la capacidad de conseguir niveles de resistencia semejantes o con superioridad al refuerzo convencional, siempre que se mantenga una cuantía adecuada que permita al PRFV alcanzar deformaciones útiles.

Conclusiones Específico

1.1 La fortaleza a la flexibilidad en vigas con refuerzo híbrido presenta dos valores distintos según la cuantía utilizada:

-Cuantía intermedia: en los datos recolectados de los ensayos, se obtuvo un valor comparable al refuerzo convencional, con un incremento del **2.5%** en el cálculo teórico y del **10.8%** en los ensayos experimentales. Mientras que en los resultados de las vigas teóricas arrojan un incremento de **1.4%** por encima de los resultados con vigas reforzadas con acero.

-Cuantía cercana a la mínima: En este caso, los resultados teóricos indican un aumento del **47.9%** respecto al refuerzo convencional. Sin embargo, estos valores provienen exclusivamente de cálculos teóricos y se estima que podrían aumentar si se ensayan a escala real, tal como se ocurrió con las vigas probadas en laboratorio.

1.2 Las vigas reforzadas con sistemas híbridos (por ejemplo, combinaciones de acero y materiales compuestos como PRFV) presentan ventajas significativas en términos de resistencia a la flexión, permitiendo reducir la cuantía total de refuerzo en comparación con vigas que emplean únicamente acero convencional. Esta eficiencia

estructural se traduce en un menor uso de material para satisfacer las mismas demandas de resistencia.

Sin embargo, esta ganancia en resistencia viene acompañada de una penalización en la ductilidad, cuyo grado depende directamente de la cuantía utilizada:

-Cuantía intermedia: La resistencia adicional es poco significativo, pero la ductilidad se conserva en un rango aceptable de $\pm 2\%$, lo que representa un equilibrio más favorable entre capacidad resistente y comportamiento plástico.

-Cuantía cercana a la mínima: Se observa un gran aumento en la resistencia a la flexión, pero la ductilidad se reduce en promedio un **30%**, lo que puede comprometer el comportamiento ante cargas sísmicas o eventos extremos.

- 1.3** Se comprobó que el uso de varillas de PRFV, así como su combinación con acero en configuraciones híbridas, constituye una alternativa estructural viable y eficiente frente al refuerzo convencional. Esta solución permitirá ahorros significativos en gastos de refuerzos (acero y PRFV), aproximadamente un 15%, además de disminuir los gastos en mano de obra y transporte, optimizando la ejecución en obra. Todo esto proyecta un menor requerimiento de mantenimiento a largo plazo, gracias a las propiedades del PRFV, como su menor peso, facilidad de manipulación y resistencia a la corrosión.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados y análisis puestos en práctica en el presente trabajo investigativo, se desprenden las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas:

1. Extensión a Otros Elementos Estructurales:
 - Se sugiere extender el estudio a otros materiales estructurales, como losas, columnas y muros de corte. Dada la alta resistencia a la tracción del polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV), su aplicación en estos elementos podría resultar en mejoras significativas en la eficiencia estructural, la reducción de peso y la durabilidad.
2. Se sugiere la utilización de deformímetros para medir con precisión la deformación unitaria y obtener una evaluación cuantitativa de la ductilidad del sistema estructural. Esta información es crucial para ofrecer la seguridad y la eficacia a largo plazo de las estructuras reforzadas con PRFV.
3. Análisis Paramétrico Detallado:
 - Se recomienda llevar a cabo un análisis paramétrico exhaustivo que explore la influencia de variables como la relación d_2/d_1 , la cuantía de refuerzo, la resistencia a compresión del concreto y las dimensiones de la sección transversal. Este análisis permitirá identificar configuraciones óptimas que maximicen el rendimiento estructural y minimicen los costos.
4. Evaluación de Vigas Doblemente Reforzadas:
 - Se recomienda realizar ensayos con vigas doblemente reforzadas, es decir, con refuerzo tanto en las áreas de tracción como en la de compresión. Esto permitirá evaluar el comportamiento del PRFV en condiciones de carga más complejas y optimizar el diseño de elementos estructurales.
5. Análisis de Costo-Beneficio en Proyectos Reales:
 - Es recomendable la realización de evaluaciones de costo-beneficio exhaustivo en proyectos de construcción reales. Este análisis debe considerar no solo el costo del material, sino también los tiempos de ejecución, los costos de mantenimiento y otros factores relevantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcon, S., & Delgado, L. (2023). *Propuesta de utilización de barras de Polímeros Reforzados con Fibras de Vidrio (PRFV), mediante la técnica Inhibir Reparar-Fortalecer (IRF) para rehabilitación estructural en vigas y losas de concreto armado con refuerzo corroído*. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).
- American Concrete Institute. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- Andrei, C. (2014). Diseño y análisis de vigas híbridas de PFRP y hormigón. *Universitat Politècnica de Catalunya*, 205-236. doi:DOI: 10.3926/oms.207
- Barnuevo, W. (2022). *Análisis del comportamiento de las varillas de fibra de vidrio y acero al esfuerzo a flexión de vigas de concreto simplemente apoyadas con cargas a los tercios del tramo, Lima 2022*. Lima: Universidad Privada del Norte.
- Beer, F., Johnston, R., DeWolf, J., & Mazurek, D. (2010). *Mecánica de Materiales quinta edición*. México: McGraw-Hill.
- Caneiro, J., Rivas, H., & Díaz, I. (2017). *Empleo de Barras y telas de mallas de PRF como refuerzo del hormigón y el ferrocemento. Diseño estructural*. Edita.me.
- Chávez, L., & Santa, J. (2021). *Diseño de vigas reforzadas con barras GFRP empleando normativa internacional aplicable al contexto colombiano*. Bogotá: Universidad de la Salle.
- Cerna, M., Galicia, W., & Villarreal, G. (2010). *Vida útil en estructuras de concreto armado desde el punto de vista de comportamiento del material*. Trujillo: Universidad Privada Antenor Orrego.
- Conexión Cinvestav. (5 de octubre de 2020). *La corrosión es el principal problema de las estructuras de concreto reforzado*. Obtenido de <https://conexion.cinvestav.mx/Publicaciones/la-corrosi243n-es-el-principal-problema-de-las-estructuras-de-concreto-reforzado>

- CORROSION Y PROTECCION. (30 de Junio de 2023). *CORROSION Y PROTECCION*.
Obtenido de <https://corrosionyproteccion.com/blog/costo-de-la-corrosion-en-mexico-colombia-per-y-estados-unidos>
- Díaz, I., & Vega, A. (2021). Diseño de tanques de hormigón armado con barras de polímero reforzado con fibras de vidrio. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 42(2), 3-13.
Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v42n2/1680-0338-riha-42-02-3.pdf>
- Díaz, I., Amador, M., & Martínez, J. (2020). Refuerzo Híbrido (Acero y polímeros reforzados con fibras) en vigas de hormigón armado. *Ciencia y Construcción*, 12, 70-77. Obtenido de <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/28/20>
- Faria, J., Rivas, H., & Díaz, I. (2017). Estructuras de armado de concreto con barras de Polímero Reforzado con fibras de vidrio (PRFV). *Arquitectura e Ingeniería*, 11(3), 1-16.
- Galvez, R. (2022). *Análisis del comportamiento en flexión de vigas de sección no rectangular y de alma delgada reforzadas longitudinalmente con barras de polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP)*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Gaytán, A. (03 de septiembre de 2008). *Compuestos FRP para la construcción*. Obtenido de <https://www.imcyc.com/cyt/septiembre03/compuestos.htm>
- Gracey, M. A., & Gerbaudo, C. F. (2022). *Estudio del comportamiento de vigas de hormigón reforzadas con varillas de compuesto de fibra de vidrio con polímero*.
- Harmsen, T. (2002). *Diseño de estructuras de concreto armado. Tercera edición*. Lima: Fondo Editorial Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Hibbeler, R. (2017). *Mecánica de materiales 9na edición*. México: Pearson .
- Institute, A. C. (s.f). *Academia.edu*. Obtenido de Diseño de Mezclas. Método ACI: https://www.academia.edu/19636430/DISENO_DE_MEZCLAS_CONCRETO_METODO_ACI
- JDMacademy. (14 de enero de 2023). *Teoría de rotura. CUANTÍA BALANCEADA mínima y máxima de acero*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=yI0ID6ogn-w>

- Mancilla Guzmán, A. I., & Chavez Mejia, J. C. (2018). Análisis de principales causas de corrosión en estructuras de concreto armado de viviendas autoconstruidas en la Urb. Manco Capac, San Juan de Lurigancho, 2018. 83.
- 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)*.
- Ministerio de Vivienda, C. y. (2009). *Norma Técnica de Edificaciones E.060*.
- Moreno, J., Varela, J., Visario, R., & Castro, P. (2022). Comportamiento a flexión de vigas de concreto reforzado con parámetros electroquímicos asociados con un nivel de corrosión alto. *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción ALCONPAT*, 12(3), 422-432. doi:de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción
- Nanni, A. (5 de julio de 2022). *¿Qué son los polímeros reforzados con fibra e vidrio y que aportan a la industria del concreto*. Obtenido de <https://360enconcreto.com/blog/detalle/polimeros-reforzados-con-fibra-vidrio/>
- Nilson, A. (2001). *Diseño de estructuras de concreto*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Noricumbo, M., Vidaud, E., & Vidaud, I. (28 de noviembre de 2014). *Una alternativa sustentable frente al ataque de la corrosión en el concreto armado*. Obtenido de <https://www.imcyc.com/revistacyt/index.php/tecnologia/348-una-alternativa-sustentable-frente-al-ataque-de-la-corrosion-en-el-concreto-armado>
- Ospino, F., & Martínez, J. (2021). *Análisis de los efectos de la corrosión en el comportamiento estructural para una edificación aporricada convencional de concreto reforzado en Colombia*. Barranquilla: Universidad de la Costa.
- Peña, D., Rodríguez, J., Salcedo, D., & Suarez, M. (2023). Estimación de daños ocasionados por la carbonatación en estructuras de concreto armado en la ciudad de Nirgua. *Gaceta Técnica*, 23(2), 88-106. doi:<https://doi.org/10.51372/gacetatecnica232.7>
- RPP. (23 de Junio de 2021). *RPP - Noticias del Perú y el Mundo*. Obtenido de <https://rpp.pe/economia/economia/el-80-de-las-viviendas-en-el-peru-son->

ANEXOS

1. Panel fotográfico

Registro fotográfico 01



Descripción: Peso del Agregado Grueso para ensayos

Registro fotográfico 02



Descripción: Peso del Agregado Fino para ensayo

Registro fotográfico 03



Descripción: Secado al Horno de las muestras de Agregado Fino y Agregado Grueso

Registro fotográfico 04



Descripción: Ensayo de Granulometría de Agregado

Registro fotográfico 05



Descripción: Determinación de la Densidad del Agregado Fino

Registro fotográfico 06



Descripción: Muestra de Agregado Grueso Saturado Superficialmente Seco
Registro fotográfico 07



Descripción: Determinación del Peso Sumergido del Agregado Grueso

Registro fotográfico 08



Descripción: Armado de refuerzo de acero y PRFV para Vigas

Registro fotográfico 09



Descripción: Vaciado de Vigas con refuerzo de acero y PRFV, y de probetas

Registro fotográfico 10



Descripción: Encofrado de Vigas con refuerzo de acero y PRFV

Registro fotográfico 10



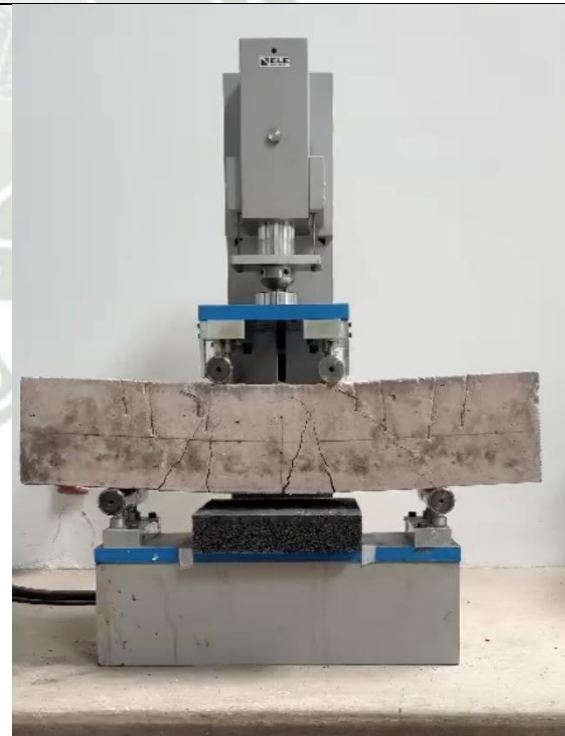
VIGA 1



MRP-1



VIGA 2



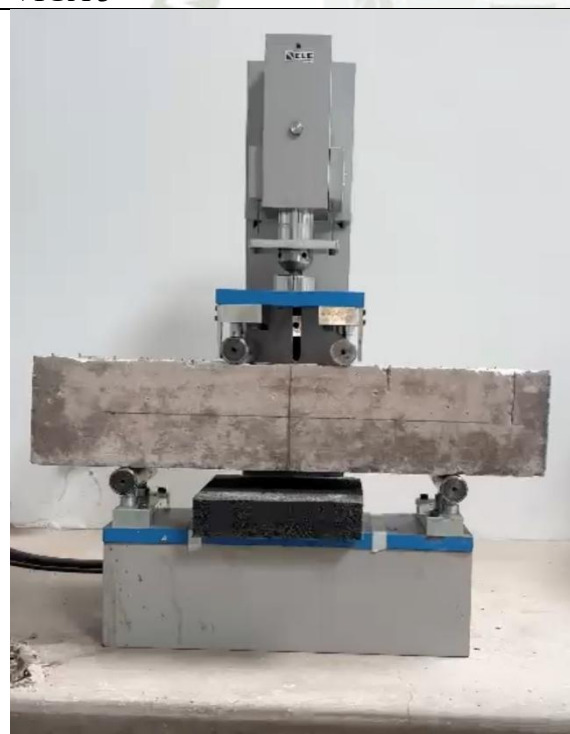
MRP-1



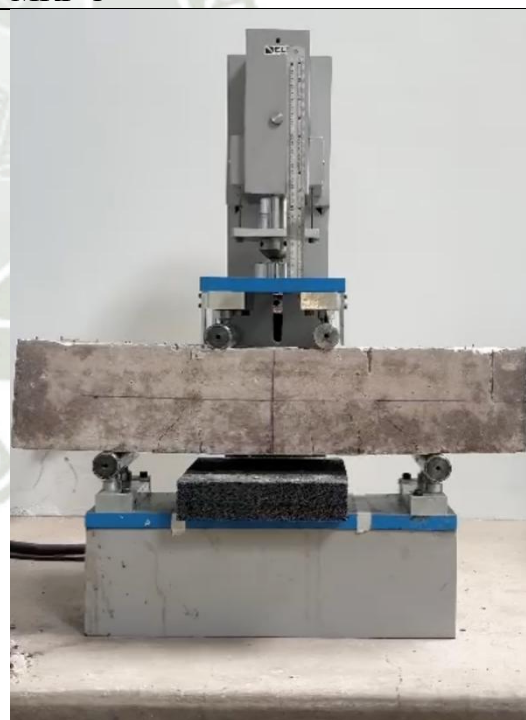
VIGA 3



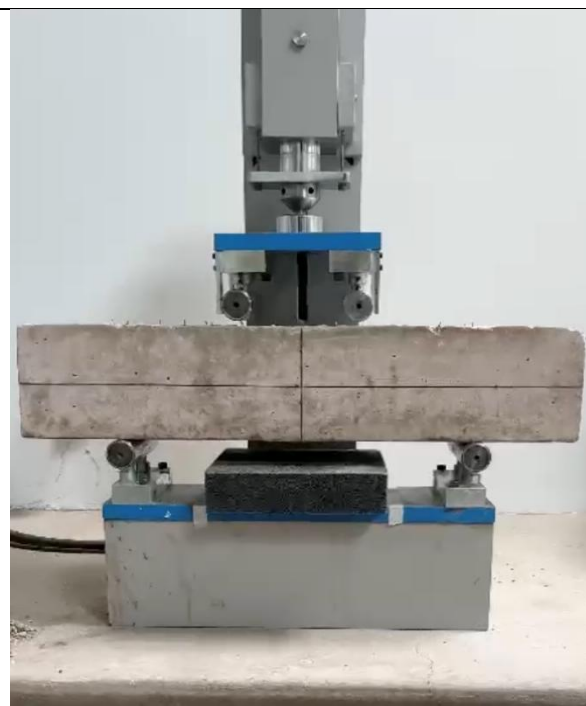
MRP-1



VIGA 4



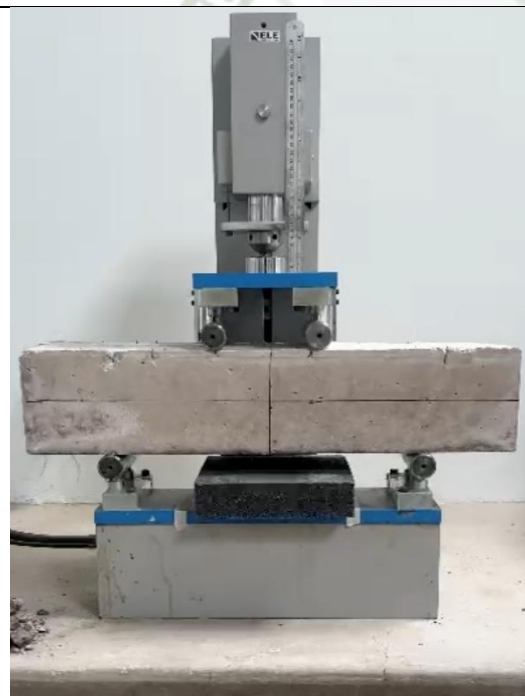
MRH-1



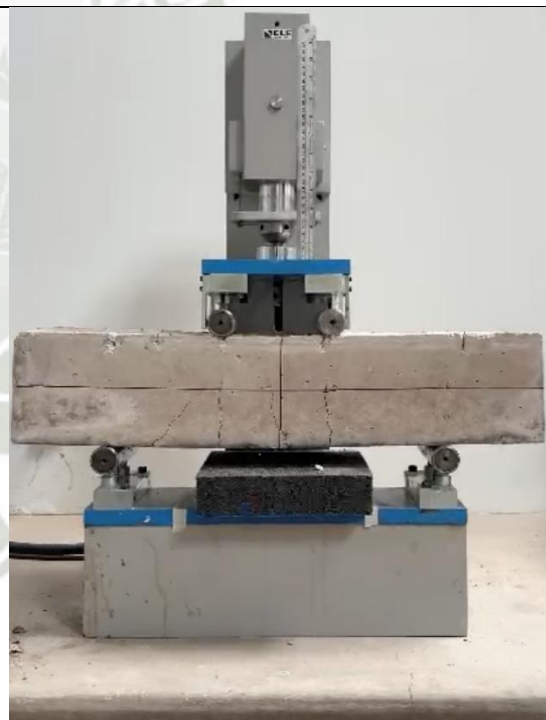
VIGA 5



MRP-1



VIGA 6



MRH-1



VIGA 7



MRH-1



VIGA 8



MRP-1

Descripción: Se evidencia las vigas ensayadas