

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Rommel Cuevas Kauffmann, Ing. Ángel Navarro Mora, Ing. Hugo Navarro Serrano, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

GUSTAVO
ADOLFO
ROJAS MOYA
(FIRMA)

Firmado digitalmente
por GUSTAVO
ADOLFO ROJAS
MOYA (FIRMA)
Fecha: 2022.01.19
11:51:38 -06'00'

Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director

Rommel
Lezing Cuevas
Kauffmann

Firmado digitalmente
por Rommel Lezing
Cuevas Kauffmann
Fecha: 2022.01.20
14:12:07 -06'00'

Ing. Rommel Cuevas Kauffmann.
Profesor Guía

ANGEL
HUMBERTO
NAVARRO
MORA (FIRMA)

Firmado digitalmente
por ANGEL HUMBERTO
NAVARRO MORA
(FIRMA)
Fecha: 2022.01.19
10:52:48 -06'00'

Ing. Ángel Navarro Mora.
Profesor Lector

HUGO EDUARDO
NAVARRO
SERRANO (FIRMA)

Firmado digitalmente por
HUGO EDUARDO NAVARRO
SERRANO (FIRMA)
Fecha: 2022.01.20 13:36:29
-06'00'

Ing. Hugo Navarro Serrano.
Profesor Observador

Análisis comparativo del comportamiento mecánico en vigas de concreto hidráulico con reforzamiento de acero y reforzamiento híbrido de acero-PRFV sometidas a flexión.

Abstract

This project compared the flexure behavior of concrete beams reinforced in a hybrid way with steel-GRP, with beams reinforced only with steel. This in order to promote an implementation of alternative reinforcement systems in concrete structures.

Initially the hybrid reinforcement beam and the traditional reinforcement prototype beam were designed, taking into consideration the capabilities of the equipment and the availability of materials.

A characterization of the components of the reinforced beams was carried out and experimental data were obtained to have inputs and to be able to model the beams using the finite element software Abaqus.

A total of 4 beams were made, 2 beams with each reinforcement configuration. These beams were brought to their maximum capacity by subjecting them to flexural by applying loads to thirds of their length.

The results obtained show that the beams with hybrid reinforcement tend to have greater deflections as load is applied, they show cracking at an earlier loading age, and the final cracking of the beam is greater compared to the prototype beam. These results were corroborated with those obtained using finite element modeling software.

Keywords: GFRP, hybrid reinforcement, reinforced concrete, finite element modeling, bending, characterization

Resumen

El presente proyecto comparó el comportamiento a flexión de vigas de concreto reforzadas de manera híbrida con acero-PRFV, con vigas reforzadas únicamente con acero (refuerzo tradicional). Esto con el fin de promover una implementación de sistemas alternativos de refuerzo en las estructuras de concreto.

Inicialmente se diseñó la viga de refuerzo híbrido y la viga prototipo de refuerzo tradicional, teniendo en consideración las capacidades de los equipos y la disponibilidad de materiales.

Se realizó una caracterización de los componentes de las vigas reforzadas y se obtuvieron datos experimentales para tener insumos y poder modelar las vigas mediante el software de elementos finitos Abaqus.

Se elaboraron un total de 4 vigas, 2 vigas con cada configuración de refuerzo. Estas vigas fueron llevadas a su capacidad máxima sometiénolas a flexión mediante la aplicación de cargas en los tercios de su longitud.

Los resultados obtenidos demuestran que las vigas con refuerzo híbrido tienden a tener mayores deflexiones conforme se le aplica carga, presentan un fisuramiento a una edad más temprana de carga, y el agrietamiento final de la viga es mayor en comparación con la viga prototipo. Estos resultados fueron corroborados con los obtenidos mediante el software de modelación de elementos finitos.

Palabras clave: PRFV, refuerzo híbrido, concreto reforzado, modelación elementos finitos, flexión, caracterización.

Análisis comparativo del comportamiento mecánico en vigas de concreto hidráulico con reforzamiento de acero y reforzamiento híbrido de acero-PRFV sometidas a flexión.

ANDREY DAVID TREJOS PERLAZA

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Diciembre de 2021

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio.....	1
Resumen ejecutivo	3
Introducción	5
Resultados.....	49
Análisis de los resultados	56
Conclusiones	65
Apéndices	67
Anexos.....	89
Referencias.....	90

Prefacio

La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado siempre ha sido una gran preocupación, uno de los problemas más urgentes en el control de la durabilidad se relaciona con la corrosión del refuerzo de acero. Las estructuras costeras, las instalaciones de la industria química, los puertos y los puentes son ejemplos de estructuras críticas sujetas a la corrosión del refuerzo. Una solución a este problema es utilizar un material de refuerzo alternativo como lo son las barras FRP, tal como lo mencionan Azevedo, Teixeira y Carneiro (2019).

En Costa Rica, el Código Sísmico actual (2010), especifica que materiales como las barras de PRFV no deben ser utilizadas en elementos estructurales de concreto reforzado, ya que el comité del ACI 440 y 440.2R no lo recomiendan para elementos sometidos a flexión y a compresión, esto debido a que no hay suficiente investigación que respalde su funcionalidad. (CSCR s.f; ACI-440.1R-15. 2015). Aparte de que no se ha buscado la implementación del material en la construcción debido a su indeseado comportamiento en estructuras sismo resistentes, no se ha tropicalizado su uso a nivel nacional, por lo tanto, este estudio busca evaluar de forma comparativa el comportamiento de vigas de concreto reforzado con barras de PRFV mientras se utilizan recursos nacionales con el fin de buscar futuras implementaciones a nivel país e incentivar la tropicalización de su uso.

Actualmente se cuenta con una Guía de diseño y construcción de concreto estructural reforzado con barras de FRP realizada por el Comité 440 del ACI, sin embargo, la guía se centra en estructuras que son construidas en su totalidad con refuerzo de FRP, por lo que deja de lado el diseño de las vigas consideradas híbridas FRP-acero, las cuales poseen como refuerzo una combinación de ambos materiales. Dada la falta de guía de diseño de estructuras híbridas, han surgido diferentes propuestas de diseño que buscan cubrir ese vacío.

Es bien sabido que el acero para el refuerzo de las estructuras tiene un comportamiento deseable en estructuras de concreto, esto debido a que presentan gran ductilidad, lo que ocasiona que las vigas no fallen de manera frágil, sin embargo, el combinar diferentes materiales de refuerzo puede traer consigo el aprovechamiento de propiedades de ambos materiales, como da a entender Pang, Qu, Zhu y Xu (2016), es posible obtener comportamientos deseados en las estructuras de concreto, si se logra diseñar con las cantidades adecuadas. En la misma línea, este proyecto busca comprobar de manera experimental lo citado anteriormente por Pang. et al, (2016), ya que propone condiciones para predecir el comportamiento de los elementos sometidos a flexión.

Entre los objetivos de desarrollo sostenibles de las Naciones Unidas (2021) se encuentra el noveno objetivo que busca el desarrollo de estructuras resilientes que promuevan la industrialización sostenible y que fomenten la innovación, el undécimo que trata de construir ciudades seguras, resilientes y sostenibles y el duodécimo objetivo busca garantizar pautas de consumo de producción sostenibles. Por lo tanto, la adopción de una tecnología como es la implementación de barras PRFV en estructuras de concreto, encaja en los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas.

Dadas las características de las barras de polímeros, la construcción de elementos de concreto solicita menores requerimientos, generando así estructuras más livianas, de menor costo y menor consumo energético para el transporte y la colocación, lo que se traduce como un aumento de productividad en las obras. A parte de aportar a la economía, las barras PRFV implican beneficios ambientales significativos, primeramente, por el hecho de que su vida útil es mucho más larga que el acero, y su

implementación implica una reducción de dióxido de carbono y clorofluorocarbonos cuando se compara con el acero (Nanni et al. 2014).

Además de buscar beneficios ambientales a nivel país en el sector construcción, este proyecto, mediante su objetivo principal de comparar el comportamiento de las vigas de concreto reforzado de manera tradicional con vigas reforzadas con acero-PRFV sometidas a flexión, pretende contribuir a la tropicalización del uso de las nuevas tecnologías a nivel nacional y el respaldo de nuevos conocimientos y metodologías de diseño estructural, además de incentivar su investigación en los muchos casos en que puede ser implementado este material.

El agradecimiento de este trabajo va dirigido primeramente a Dios, porque me regaló las fuerzas y la sabiduría para poderlo llevar a cabo. A mi familia, porque me ha sido mi motor principal para seguir adelante y me han brindado su apoyo en todo momento. Le agradezco mucho a Sharon Barboza, por acompañarme siempre y de manera incondicional en el proceso. A mi profesor Rommel Cuevas, por la guía de este trabajo, por contagiarme la emoción de desarrollar una investigación y hacer que disfrutara al máximo el proceso de esta. Además, quiero agradecer a mis compañeros que me ayudaron durante el trabajo y a los técnicos del CIVCO que siempre estuvieron dispuestos a brindarme apoyo. También agradezco a la Escuela de Ingeniería en Construcción, por darme la formación y ayudarme a descubrir lo que me apasiona.

Resumen ejecutivo

El presente proyecto fue realizado en las instalaciones del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), y tuvo como objetivo principal comparar el comportamiento mecánico de vigas de concreto reforzado con acero tradicional con vigas reforzadas de manera híbrida con acero y polímero reforzado de fibras de vidrio (PRFV) sometidas a flexión. Este objetivo nace de la necesidad de implementar nuevos sistemas de refuerzo para el concreto, donde se aprovechen las características de materiales alternativos en la construcción.

Para efectuar la comparación, se diseñó una viga patrón o viga prototipo reforzada de manera tradicional con acero ASTM A36, este diseño se realizó en función de la capacidad de los equipos del laboratorio, y la disponibilidad de los materiales.

Seguidamente se realizó un diseño de viga híbrida de acero-PRFV que tuviera una capacidad teórica con al menos 5% de diferencia con respecto a la viga prototipo, en la cual se implementó el polímero en zona de tensión de la sección del concreto. Como resultado se obtuvieron vigas de 15x25 cm de sección transversal, una longitud de 190 cm y una configuración de 2 varillas No.3 en la zona de compresión para ambas vigas, 2 varillas No.4 en la zona de tensión para la viga patrón y 2 varillas No.2 más 1 barra No.4 de PRFV en zona de tensión para la viga híbrida.

Además, se determinó que el concreto no era capaz de soportar el esfuerzo cortante por cuenta propia, por lo que se realizó el diseño de la distribución de los aros y se determinó una configuración de aros No.3 a cada 10 cm para inducir una falla dúctil y observar su comportamiento controlado por una falla en tensión.

Para construir las vigas, fue necesario realizar una caracterización de los agregados con los que se elaboró la mezcla de concreto y una caracterización de los elementos de refuerzo (acero y PRFV), estas caracterizaciones fueron

realizadas en conformidad con los ensayos normados por el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) y las normas del American Society of Testing and Materials (ASTM). Para la realización de los ensayos de Pull-Out y determinación del esfuerzo de rotura de las barras de PRFV no fue posible apegarse a una normativa, debido a la imposibilidad de modificar el elemento y la falta de equipo para efectuar el ensayo.

Con respecto al concreto, se utilizó la metodología de diseño de mezcla del comité ACI-211 para determinar las proporciones de los agregados, una vez se encontraron caracterizados los agregados, se realizaron dos mezclas de corrección de diseño para evitar errores en la colada de las vigas, mediante estas fue posible corregir el diseño y aproximar la resistencia a la deseada.

Mediante una máquina universal de ensayos se determinó el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último de rotura del acero para poder realizar cálculos de resistencia según las metodologías y tener parámetros más aproximados para realizar modelados de las vigas en software computacional. El esfuerzo de rotura del PRFV no fue posible determinarlo debido a que no se contó con el equipo necesario, por lo que se utilizó el valor especificado por los fabricantes del producto.

Se fabricaron las armaduras y se posicionaron en formaletas modulares previamente armadas, se utilizaron separadores previamente contruidos para respetar las dimensiones de recubrimiento, una vez colada la mezcla de concreto en el encofrado, se realizó un vibrado de las vigas con un vibrador de 2,5 cm.

Se elaboraron 4 vigas en total, 2 vigas con la configuración de refuerzo únicamente de acero y 2 vigas con la configuración de refuerzo híbrido acero-PRFV, así mismo, se colaron 9 cilindros de 150x300mm para cada par de vigas con el fin de monitorear el desarrollo de resistencia a la compresión y 3 vigas no reforzadas de 150x150x600 mm para cada par de vigas con el

objetivo de conocer la resistencia a la tensión del concreto (módulo de rotura).

Con respecto a la resistencia del concreto a los 28 días, se obtuvo un valor con una diferencia de 9,7% con respecto al propuesto según el diseño de mezcla del ACI 211, y en relación al módulo de rotura, se obtuvieron valores de 14,1% y 13,3% de la resistencia a la compresión para las mezclas de vigas reforzadas con acero y vigas reforzadas de manera híbrida respectivamente.

Se realizaron análisis longitudinales con el equipo de radar de penetración terrestre para concreto (GPR) para corroborar la distribución de los aros en las vigas construidas, en los cuales se encontraron anomalías en los aros de una de las vigas.

Durante la realización de los ensayos de las vigas reforzadas, se monitoreó la carga aplicada, la deflexión de las vigas en el centro del claro y las deformaciones unitarias en el centro de la viga, tanto en la zona de tensión como en la de compresión.

Mediante los datos de deformaciones unitarias y el momento en la zona en la que se midieron las deformaciones, se construyó un gráfico de momento curvatura, mediante el cual se determinó que las vigas con reforzamiento híbrido tienden a ser más dúctiles que las vigas con reforzamiento de acero, sin embargo, no fue posible recolectar los datos en su totalidad debido a problemas que presentaron las galgas extensiométricas durante el ensayo, ya que en algunos casos recolectaron datos sin sentido y en otros casos no recolectaron datos.

Con ayuda de la carga aplicada y la deflexión de las vigas en el centro del claro, se construyó un gráfico de carga contra deflexión, donde se encontró que las vigas de reforzamiento híbrido tienen una mayor deflexión cuando se alcanza su carga máxima en comparación con las vigas con refuerzo de acero, aproximadamente deflexiones de un 75% más en el punto de carga máxima.

Se modelaron las 2 configuraciones de vigas en el software de elemento finito Abaqus en donde se obtuvieron valores de carga máxima con diferencias de 3,9% de la capacidad obtenida mediante los ensayos a flexión.

Durante el ensayo se monitoreó la aparición de grietas y la distribución de las mismas, con los resultados obtenidos se elaboraron diagramas de agrietamiento o diagramas de daño, donde se observó que las

vigas con reforzamiento híbrido obtuvieron un agrietamiento mayor en términos de cantidad de grietas, en comparación con las vigas reforzadas tradicionalmente. Además, el agrietamiento en las vigas híbridas se produjo mucho más temprano en la aplicación de carga que el de las vigas de acero, obteniendo grietas no permisibles según el criterio del ACI después del 50% de su capacidad máxima, mientras que las grietas no permisibles en las vigas con reforzamiento de acero aparecieron después del 90% de su capacidad máxima. Los datos de daño obtenidos de manera experimental fueron congruentes con los obtenidos mediante el software de elemento finito.

Adicionalmente, se realizó un ensayo alternativo al de Pull-Out para para las varillas de acero y las barras de PRFV, en donde se colaron cilindros con una sección de la varilla/barra embebida en el concreto, la cual fue extraída a los 28 días de elaborados, y se registró la magnitud de extracción y el comportamiento de la falla, donde, a pesar de que se obtuvieron magnitudes de extracción muy similares, lo especímenes que contenían las barras de PRFV se agrietaron significativamente, mientras que las varillas de acero no dañaron el concreto del espécimen.

Introducción

El presente proyecto tiene como objetivo principal comparar el comportamiento mecánico de vigas de concreto reforzado con acero, con vigas reforzadas de manera híbrida con acero-PRFV sometidas a flexión, con la finalidad de conocer de manera experimental el aporte de las barras PRFV en comparación con las barras de acero que se utilizan comúnmente para el refuerzo de elementos de concreto.

En la actualidad, el desarrollo de comparativas entre materiales da pie a futuras investigaciones en busca de avanzar por la ruta de la evolución de los nuevos materiales y la sustitución de algunos otros que se vuelven de más difícil acceso. Aunado a lo anterior, la utilización de materiales compuestos presenta un constante crecimiento y evolución en diferentes sectores, siendo las obras civiles y edificaciones uno de los rubros donde más se ha destacado (Muraya, 2020).

Según lo expresan Tavares, Giongo y Paultre (2018), la utilización de barras de polímeros reforzados de fibras (PRF), es una de las más recientes alternativas para prevenir los inconvenientes que tienen relación con el refuerzo de acero en elementos de concreto armado, ya que las barras poliméricas no presentan expansión en el concreto debido a la corrosión tal como sucede con las barras de acero, lo que aumenta la esperanza de vida del elemento reforzado (Rovira, Almerich y Martín, 2011). Además, tal como lo resaltan diferentes investigaciones, las barras PRFV poseen resistencias mayores en temas de tracción y fatiga en comparación con el acero tradicional.

Teniendo en cuenta que las barras PRFV superan de manera positiva en algunas propiedades al acero, se puede sustituir este en elementos de concreto, de manera que se aprovechen al máximo las propiedades del PRFV. Para este caso, la característica que se plantea aprovechar del PRFV es la alta resistencia a la

tracción, la cual se debe evaluar mediante modelos a escala real, específicamente en vigas de concreto.

El evaluar el comportamiento de los elementos mediante modelos a escala real, permite obtener resultados más representativos en comparación a aquellos modelos de escalas modificadas.

Objetivos

Objetivo General

Comparar el comportamiento mecánico de vigas de concreto reforzado con acero dulce (ASTM A36) con vigas reforzadas de manera híbrida con acero-PRFV sometidas a flexión.

Objetivos Específicos

- Caracterizar los componentes de las vigas de concreto hidráulico mediante ensayos de laboratorio e información de proveedores
- Conocer metodologías propuestas de diseño a flexión de vigas de concreto con refuerzos híbridos de acero-PRFV.
- Determinar la capacidad de las vigas de concreto con refuerzo híbrido acero-PRFV y de acero mediante un ensayo de flexión.
- Analizar comparativamente las capacidades obtenidas del ensayo a flexión de las vigas de concreto con refuerzo híbrido acero-FRP y de acero mediante el ensayo de flexión.

Alcance y limitaciones

El presente proyecto consiste en una comparación de vigas de concreto hidráulico, de las cuales, dos fueron reforzadas con acero y otras dos fueron reforzadas de manera híbrida con acero y barras de PRFV. Dichos elementos de concreto fueron

sometidos a un ensayo a flexión con el fin de evaluar las diferencias experimentales en el comportamiento de ambas configuraciones de refuerzo. Durante el desarrollo surgieron las siguientes limitantes:

- Para la determinación del momento último de resistencia de las vigas con diferentes configuraciones de acero, se elaboraron 4 vigas con 150 mm de espesor, 250 mm de peralte y 1.90m de largo.
- Para el control de la resistencia a la compresión del concreto colado, se realizaron cilindros de 300x150mm, los cuales fueron fallados a 7, 14 y 28 días en conformidad con la norma ASTM C39.
- Para el control del módulo de rotura del concreto hidráulico elaborado, se fabricaron vigas de 150x150x600mm, las cuales fueron falladas a los 28 días en conformidad con la norma ASTM C78.
- No se controlaron las condiciones de laboratorio, tales como temperatura y humedad relativa.
- Fue imposible medir el módulo de elasticidad de las barras de acero y de PRFV debido a la falta de un transductor que permitirá realizar la medición.
- Para la determinación del esfuerzo máximo de tracción de las barras de PRFV, se modificó su sección transversal a un diámetro conocido con el fin de obtener un resultado aproximado, ya que no se contó con especímenes de falla, sin embargo, los datos utilizados para los cálculos y modelos fueron los obtenidos mediante su ficha técnica.

Marco Teórico

Normativa técnica

Con el fin de que los procedimientos utilizados para la determinación de las propiedades de los materiales que componen las vigas se encontraran normalizados por entes especializados, se optó por apegarse a las normas de procedimientos dictadas por el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) y la Asociación Americana de Pruebas y Materiales (por sus siglas en inglés ASTM). Además, la mayoría de las especificaciones se apegan a las solicitudes impuestas por el Código Sísmico de Costa Rica 2010/14 (CSCR-10/14) y por el Reglamento para el Concreto Estructural diseñado por el Instituto Americano del concreto, específicamente el comité 318 en el año 2018 (ACI 318-14).

Dada la diversidad de ensayos requeridos para la correcta fabricación de las vigas de concreto reforzado, es necesario desglosarlos a continuación.

Técnica para muestreo de los agregados para concreto. (INTE C67:2020 y ASTM D75-19).

Esta norma establece el procedimiento adecuado para la extracción de las muestras de agregados a analizar, con el fin de aumentar la representatividad de dichas muestras.

“El muestreo es tan importante como el ensayo y el encargado debe de tomar toda precaución para obtener muestras que exhiban la naturaleza y condición de los materiales que representan” (ASTM D75, 2019)

La norma describe diferentes métodos de extracción en función de su lugar de almacenaje y transporte, a continuación, se muestran las cantidades mínimas de muestras en kilogramos presentados en la normativa.

CUADRO 1. TAMAÑO MÍNIMO DE LAS MUESTRAS EXTRAÍDAS EN CAMPO PARA AGREGADO FINO Y GRUESO HASTA 25 mm

Tamaño del agregado (mm)	Masa mínima de muestra de campo (kg)
2,36 [No. 8]	10
4,75 [No. 4]	10
9,5 [3/8 pulg]	10
12,5 [1/2 pulg]	15
19 [3/4 pulg]	25
25 [1 pulg]	50

Fuente: ASTM C75

Norma para la reducción de muestras de agregados a tamaños de ensayo. (INTE C62:2020 y ASTM C702-18).

“Esta práctica proporciona procedimientos para reducir la muestra total obtenida en el campo o producidas en el laboratorio al tamaño conveniente para realizar un número de ensayos para describir el material y medir su calidad” (ASTM D702, 2020).

La reducción por efectuar se realiza sobre la muestra principal obtenida mediante el método descrito anteriormente (ASTM D75-19), buscando así que la nueva porción de muestra sea representativa de la muestra principal y por ende del material origen.

La norma técnica describe tres tipos de procedimientos para realizar la reducción de las muestras, el método A, consiste en la separación de la muestra por medio de un separador mecánico, el método B consiste en separar la muestra de manera manual por medio de cuarteo y el método C corresponde a un método de separación llamado muestreo de reservas en miniaturas, el cual es utilizado únicamente para agregados finos.

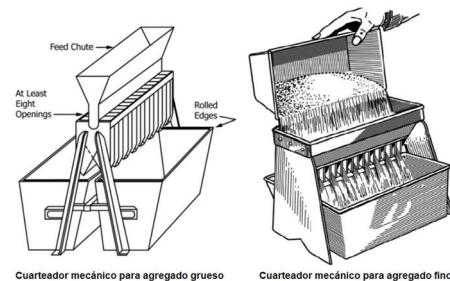


Figura 1 Cuarteadores mecánicos para agregado fino y grueso (Método A)

Fuente: ASTM C70.

Método de ensayo para la determinación de materia orgánica en los agregados finos para concreto. (INTE C59:2015 y ASTM C40-20).

Tal como lo indica el documento que describe la norma ASTM C40 (2020), “este método de ensayo es utilizado para hacer una determinación preliminar de la aceptabilidad de los agregados finos”

De manera general, el procedimiento del ensayo consiste en someter una muestra del agregado fino a una solución de hidróxido de sodio por un periodo de 24 horas en estado de reposo, cumplido este plazo, se realiza una comparación de líquido sobrenadante de la muestra con una serie de cristales de colores estandarizados en la escala de Gardner. En función de esta comparación es posible determinar si la muestra contiene materia orgánica perjudicial o si no es necesario realizar más análisis y aceptar el agregado para su uso.



Figura 2. Escala Gardner utilizada para el ensayo de colorimetría.

Método de ensayo. Determinación por lavado del material que pasa por el tamiz 75 μm (No. 200) en agregados minerales. (INTE C49:2018 y ASTM C117-17)

Esta norma define mediante dos procedimientos diferentes, la manera de cuantificar el material que pasa el tamiz No. 200, el primer método consiste en un lavado del material mediante agua corriente, y el segundo método consiste en un lavado mediante el uso de un agente humectante.

Este procedimiento es importante ya que permite la separación eficiente de partículas muy finas (pasan tamiz No. 200) a aquellas más gruesas (ASTM C117, 2017). Aparte de ayudar a la separación de partículas, permite también disminuir la pérdida de material que se adhiere a los tamices. Además, como lo expresa la norma ASTM 117 (2017), el resultado puede funcionar como un indicador de la degradación del agregado.

Método de Ensayo. Análisis granulométrico por tamices de los agregados fino y grueso. (INTE C46:2020 y ASTM C136-2019)

Esta norma establece el procedimiento mediante el cual se puede conocer la gradación de materiales que han sido propuestos para ser utilizados como agregados finos o gruesos. “Los resultados de este ensayo se utilizan para determinar la conformidad de la distribución por tamaños de partículas con los requisitos aplicables de la especificación” (ASTM C136, 2019).

Una vez realizado el ensayo es necesario analizarlo en función la norma ASTM MS 33, la cual se encuentra vigente para la clasificación de los agregados gruesos y la regulación de los agregados finos.

El procedimiento de determinación de granulometría es realizado mediante tamices que se acomodan en orden decreciente de tamaño de malla, de manera que permita determinar en función del peso, la gradación del material en análisis.

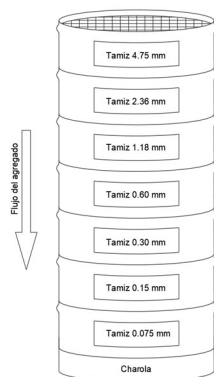


Figura 3. Esquema de tamices para granulometría de agregado fino

CUADRO 2. TAMAÑO NOMINAL MÁXIMO DE ABERTURAS DE TAMIZ PARA AGREGADO FINO	
Tamiz No.	Abertura (mm)
4	4,75
8	2,36
16	1,18
30	0,60
50	0,30
100	0,15
200	0,075

Fuente: ASTM C136

CUADRO 3. TAMAÑO NOMINAL MÁXIMO DE ABERTURAS DE TAMIZ PARA AGREGADO GRUESO	
Tamiz (pulg) [No.]	Abertura (mm)
(2.5)	63,0
(2)	50,0
(1.5)	37,5
(1)	25,0
(3/4)	19,0
(1/2)	12,5
(3/8)	9,53
[4]	4,75
[8]	2,36

Fuente: ASTM C136

Método de ensayo. Determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso.(INTE C68:2016 y ASTM C127-15)

Esta norma describe el procedimiento para determinar el valor de la gravedad específica del agregado grueso para diferentes condiciones de humedad, tales como seca al horno y saturada superficie seca. Además, mediante el mismo proceso, permite la determinación del porcentaje de absorción del material grueso.

Estos valores son de interés para la elaboración de mezclas de concreto, ya que corresponden a parámetros de entrada en los diseños de mezclas concreto hidráulico.

A continuación, se menciona la principal terminología que describe la norma.

Densidad relativa o gravedad específica

Corresponde a la relación que existe entre la densidad de un agregado y la densidad del agua destilada a una temperatura específica (ASTM C127,2015).

Gravedad específica en condición seca

Corresponde a la relación entre la densidad de un agregado que se encuentra en condición seca al horno y la densidad del agua destilada a una temperatura específica. (ASTM C127,2015).

Gravedad específica en condición saturada superficie seca

Corresponde a la relación entre la densidad de un agregado que se encuentra en condición saturada superficie seca y la densidad del agua destilada a una temperatura específica. (ASTM C127,2015).

Gravedad específica aparente

Corresponde a la relación que existe entre la densidad aparente de un agregado, y la densidad del agua destilada a una temperatura específica. (ASTM C127,2015).

Absorción de agua

Corresponde al incremento de masa del agregado producto del ingreso de agua a los poros vacíos existentes en el material durante un tiempo prescrito, dejando por fuera la masa de agua que queda adherida a la superficie del agregado. Este

valor cuantitativo es expresado como un porcentaje de la masa seca (ASTM C127,2015).

Método de ensayo. Determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino. (INTE C69:2016 y ASTM C128-15)

Al igual que el método anteriormente explicado, este método consiste en determinar la gravedad específica y la absorción del agregado, sin embargo, el procedimiento varía debido a que es para agregados finos.

Los resultados arrojados por el método también son esenciales para la elaboración del diseño de mezcla del concreto hidráulico.

Método de ensayo. Determinación de la resistencia al desgaste, del agregado grueso de tamaño hasta de 37.5 mm (1 1/2 pulgadas), por abrasión e impacto en la Máquina de Los Ángeles. (INTE C66:2016 y ASTM C131-20)

Este ensayo permite determinar la resistencia al desgaste que posee un material grueso específico, y además ha sido comúnmente utilizado como un “indicador de la calidad relativa o la competencia de varias fuentes de agregados que tienen una composición mineral similar.” (ASTM C131, 2020). En términos generales, el método de ensayo consiste en introducir una cantidad específica de agregado grueso en una Máquina de los Ángeles, la cual consiste en un tambor giratorio que posee esferas de acero de masa conocida. Una vez que la máquina empieza a girar, las esferas de acero impactan con el agregado, generando un desgaste por abrasión e impacto. Por último, se determina una pérdida de masa que se expresa como un porcentaje de la masa original.



Figura 4 Máquina de los Ángeles

Método de prueba estándar para la determinación de la densidad aparente (peso unitario) e índice de vacíos en el agregado. (INTE C58:2013 y ASTM C29-17)

Esta norma describe el procedimiento estándar para la determinación del peso específico y la cantidad de vacío en el agregado. Dado que es funcional para agregados finos como para agregados gruesos, hace una distinción en los procesos del ensayo. Para la determinación del peso unitario suelto de finos y gruesos se utiliza el método llamado paleo, para determinar el peso unitario compactado del agregado grueso es necesario utilizar el procedimiento denominado varillado, por último, para conocer el valor del peso unitario compactado del material fino, se debe ejecutar un procedimiento que recibe el nombre de sacudidas.

Los parámetros determinados mediante esta norma “se requieren para utilizarse en muchos métodos para seleccionar las proporciones de las mezclas de concreto” (ASTM C29, 2017)

Definiciones y método de prueba estándar para pruebas mecánicas de productos de acero. (INTE C403:2020 y ASTM A370-20)

Esta norma detalla los procedimientos para cuantificar las propiedades de los elementos de acero, para este caso es necesaria para la determinación de la resistencia a tensión de las

varillas de acero a utilizar para fabricar elementos de concreto reforzado.

El procedimiento para obtener dicho parámetro es mediante una maquina universal que somete una probeta de acero a tensión hasta que esta llegue a su falla, de esta manera es posible determinar la magnitud el esfuerzo de fluencia y de rotura del acero.

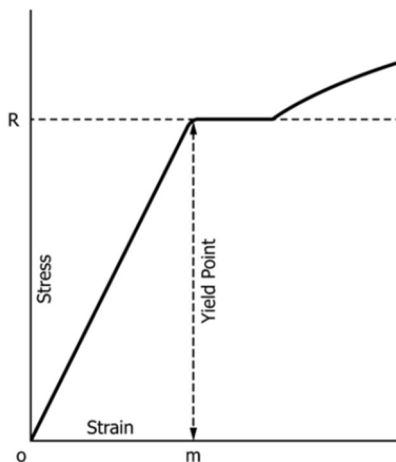


Figura 5. Diagrama de esfuerzo-deformación con el punto de fluencia señalado.

Fuente: ASTM C70

Método de ensayo para las propiedades de tracción de varilla plástica pultrada reforzada con fibra de vidrio (ASTM D3916-16)

Esta norma establece el procedimiento para conocer la resistencia a tensión de las barras poliméricas pultradas elaboradas a base de fibra de vidrio.

El procedimiento descrito es similar al mencionado anteriormente para la determinación de la resistencia a tensión de las varillas de acero, con ligeras diferencias en las dimensiones de los especímenes y del equipo utilizado.

Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio (INTE C18:2016 y ASTM C192-19)

Esta norma “establece los requisitos normalizados para la preparación de los materiales, la mezcla del concreto, y la preparación y curado de especímenes de concreto para ensayo bajo condiciones de laboratorio”. (ASTM C192, 2019).

Esta norma permite desarrollar información importante para evaluar mezclas de concreto y sus materiales, correlacionar resistencias con ensayos no destructivos y provisionar especímenes para fines de investigación (ASTM C192, 2019).

Método de ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión uniaxial de especímenes cilíndricos de concreto (INTE C39:2020 y ASTM C39-21)

Esta norma describe la práctica para la determinación de la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto elaboradas mediante la norma ASTM C192-19 (INTE C18:2016)

Los resultados obtenidos mediante este ensayo “son usados como base para el control de calidad de las operaciones de dosificación, mezclado, y colocación del concreto; determinación del cumplimiento de las especificaciones; control para la evaluación de la efectividad de aditivos; y usos similares. (ASTM C39, 2021)

Para monitorear el comportamiento del concreto, es necesario realizar el ensayo normado a diferentes edades, según conveniencia.

CUADRO 4. EDADES DE FALLA DE CILINDROS SEGÚN ASTM C39	
Edad de ensayo	Tolerancia permisible
24 horas	± 0,5 horas
3 días	± 2,0 horas
7 días	± 6,0 horas
28 días	± 20 horas
90 días	± 2 días

Fuente: ASTM C39

Otro método utilizado para determinar la resistencia en el concreto, es mediante un esclerómetro o martillo Smith, el cual, a pesar de tener variaciones importantes en la determinación

de la resistencia real del concreto hidráulico, permite determinar la uniformidad de la resistencia a lo largo de un elemento, además, una de las ventajas que tiene la utilización de este equipo para determinar la resistencia de la compresión, es que corresponde a un ensayo no destructivo para el concreto.

Método de ensayo para la determinación de la resistencia a la flexión del concreto (utilizando una viga simple con cargada en sus tercios medios). (INTE C48:2018 y ASTM C78-2021)

Esta norma detalla el procedimiento estándar para determinar el módulo de rotura de vigas de concreto elaboradas y curadas según lo especificado en la norma anteriormente mencionada sobre elaboración y curado de especímenes de concreto (ASTM C192).

Generalmente, los resultados del módulo de rotura pueden ser utilizados para determinar cumplimiento de especificaciones del concreto, evaluar la uniformidad de la mezcla, entre otros. (ASTM C78, 2021)

Este método determina el módulo de rotura mediante una aplicación de cargas en los tercios medios de las probetas de concreto, tal como se muestra en el esquema.

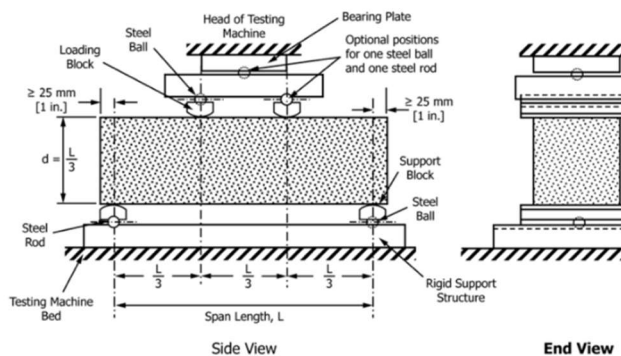


Figura 6. Diagrama de carga de viga de concreto para la determinación de la resistencia a la flexión.

Fuente: ASTM C78.

Método de ensayo. Obtención y ensayo de núcleos extraídos y vigas aserradas

de concreto. (INTE C47:2021 y ASTM C42-20)

Este método describe la practica normalizada para realizar la extracción de cilindros y vigas de prueba de elementos de concreto, esto con el fin de evaluar el concreto que los compone, estas evaluaciones se pueden realizar mediante la resistencia a la compresión uniaxial en el caso de las muestras cilíndricas, y el módulo de rotura en el caso de las vigas.

Concreto Reforzado

El concreto hidráulico corresponde a una mezcla de arena, grava otros materiales que se encuentran unificados en una son la masa rocosa que tiene como matriz cementante una pasta a base de cemento y agua. En ocasiones posee también aditivos que se utilizan para cambiar ciertas características en el concreto como lo son la durabilidad tiempo de fraguado y ductilidad. (McCormac, 2011)

El concreto posee una alta resistencia a la compresión y una baja resistencia a la tracción, es por eso que para subsanar esta baja resistencia se refuerza comúnmente con acero, ya que este proporciona la resistencia a la atención que le hace falta el concreto. A este elemento compuesto se le conoce como concreto reforzado (CR).

Aparte del acero, el concreto reforzado puede estar armado con otros materiales con propiedades beneficiosas para el concreto, para esta ocasión se elaboran elementos de concreto reforzado con barras poliméricas de fibra de vidrio y se comparan con elementos de concreto reforzado con acero de carbón.

Según McCormac (2011), el concreto reforzado posee una cantidad considerable de ventajas, las cuales se mencionan a continuación.

- A la compresión por unidad de costo en comparación con la mayoría de los materiales de construcción.
- Según con que se refuerce, posee una gran resistencia al fuego y al agua, de hecho, es considerado el material estructural que mejor se desarrolla en los casos donde el agua está presente.

- Posee alta rigidez.
- La necesidad de mantenimiento es menor.
- Si se compara con otros materiales, el concreto reforzado tiene una larga vida de servicio, de hecho, bajo condiciones apropiadas, las estructuras de concreto reforzado pueden utilizarse indefinidamente sin reducir sus capacidades de carga, dado que la resistencia al concreto no se ve afectada por el tiempo, sino que aumenta con el pasar de los años.
- Es el único material disponible para cimentaciones, contrapisos, losas, muros y construcciones similares que posee una alta relación de funcionalidad economía.
- El concreto puede ser elaborado con materiales locales y baratos.
- No requiere de mano de obra de alta calificación para su construcción, en comparación con materiales como el acero estructural.

Acero como refuerzo de concreto

El concreto armado con acero de refuerzo funcionan de manera integral de una excelente manera en las estructuras de concreto reforzado, ya que las ventajas que posee cada uno de los materiales es compensado por las desventajas que posee el otro, un gran ejemplo, tal como se mencionó anteriormente, es la desventaja que tiene el concreto de poseer baja resistencia a la tensión, que es compensado por la alta resistencia a la tensión que posee el acero, ya que este posee una resistencia de al menos 100 veces mayor a la del concreto (McCormac, 2011).

El acero en los elementos de concreto reforzado es utilizado en formas de varilla redonda lisa y corrugada, Además, están fabricada con diferentes grados de carbón, de lo cual depende directamente su resistencia.

A continuación, se muestran dos cuadros que detallan información (dimensiones y propiedades mecánicas) sobre las varillas que se comercializan actualmente en Costa Rica, específicamente

aquellas varillas que se fabrican bajo la norma ASTM A615.

CUADRO 5. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE VARILLAS DE ACERO COMUNENTE COMERCIALIZADAS EN COSTA RICA.

Número designación	Diámetro nominal (mm)	Área (cm ²)
3	9,52	0,71
4	12,70	1,92
5	15,88	2,00
6	19,05	2,84
7	22,22	3,87
8	25,40	5,10
9	28,65	6,45
10	32,26	8,19
11	35,81	10,06
14	43,00	14,52

Fuente: Arcelor Mittal

CUADRO 7. PROPIEDADES MECÁNICAS DE VARILLAS DE ACERO COMUNENTE COMERCIALIZADAS EN COSTA RICA.

Parámetro	Grado 40	Grado 60
Esfuerzo de fluencia mínimo (kg/cm ²)	2855	4283
Resistencia mínima a la tensión (kg/cm ²)	4283	5608

Fuente: Arcelor Mittal

PRFV como refuerzo de concreto

Las barras poliméricas reforzadas con fibra de vidrio (PRFV) son consideradas un material de refuerzo alternativo, dado que algunas de sus propiedades son superiores a las del acero, sin embargo, algunas otras son inferiores, por lo tanto, no pueden ser utilizadas para reforzar algunos elementos y tener un desempeño tan bueno como el del acero. Sin embargo, en muchos casos, las barras PRFV deben de ser consideradas para ser implementadas en los elementos de CR. El comité 440.1R del ACI (2015) lista una serie de características que poseen las BPFV que son

importantes a tener cuenta, las cuales se mencionan a continuación.

- Impermeables al ion cloruro y a los ataques químicos.
- La resistencia a la tracción es mayor a la del acero.
- Pesan una cuarta o quinta parte de los que pesan las varillas de acero convencionales.
- Transparentes a campos magnéticos y frecuencias de radio.
- No poseen conducción térmica ni electromagnética.
- Requiere un menor recubrimiento de concreto siempre que el diseño estructural lo permita.
- No requiere la aplicación de epóxidos o cualquier otro aditivo para retrasar la corrosión.
- Poseen alta resistencia a la fatiga.
- Su vida de servicio es mucho mayor a la del acero en condiciones de ambientes corrosivos.

Dado que el refuerzo universal en la actualidad es el acero, es importante conocer las diferencias principales que modifican el desempeño entre las PRFV y las varillas de acero convencionales.

- Las barras PRFV poseen un comportamiento lineal hasta la falla, a diferencia del acero que de desempeña tanto en el rango elástico como en el plástico.

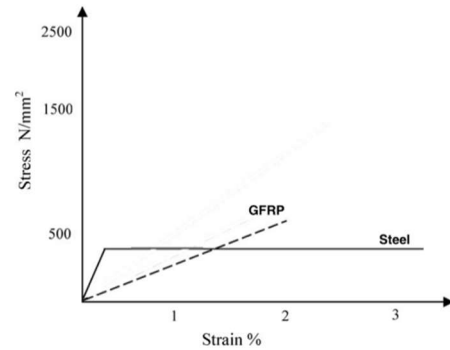


Figura 7. Gráfica comparativa esfuerzo deformación de acero y PRFV.

Fuente: Kadhim, Donchev, Al-Mishhdani y Al-Shaarbaf

- Las barras PRFV poseen una configuración anisotrópica, mientras que el acero es isotrópico.
- Las barras PRFV poseen un umbral de rotura por fluencia mucho menor que el del acero.
- El coeficiente de expansión térmica de las barras PRFV es diferente en la dirección radial que en la longitudinal.
- El tiempo de resistencia al fuego y condiciones de temperaturas elevadas es considerablemente menor que el del acero.
- En caso de que se produzca una degradación, esta no daña el concreto como lo hace el acero, cuyo mecanismo de degradación es la oxidación que expande el concreto y produce fallas en los elementos.

El ACI 440.1R (2015) manifiesta que algunos de los casos en que pueden ser utilizadas y aprovechadas las barras PRFV son los siguientes.

- En cualquier caso, donde un miembro de concreto sea susceptible a la corrosión por iones de cloruro o químicos.
- En cualquier miembro de concreto que limite el uso de materiales férricos como refuerzo debido a consideraciones electromagnéticas.

- Aplicaciones que no requieran conductividad térmica.
- Cuando se requieran alternativas a los recubrimientos epóxicos y galvanizados.
- Cuando se requiera ahorrar en el uso de barras de acero inoxidable

Códigos de diseño para concreto reforzado con acero y PRFV.

A nivel nacional se debe diseñar cumpliendo lo establecido por el Código Sísmico de Costa Rica 2010 / 2014 (CR2010/14), el cual consiste en un documento que “establece requisitos mínimos para el análisis, diseño y construcción sismorresistente de edificaciones y obras afines que se construyan en el territorio de la República de Costa Rica” (CSCR-10/14, 2014). Específicamente, el capítulo 8 de dicho código regula el diseño de elementos de concreto reforzado con acero.

El CSCR 10/14 indica que los elementos de concreto reforzado deben cumplir con las especificaciones dictadas por el comité 318 del American Concrete Institute (ACI), en su documento de Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural. Este documento forma parte de un Reglamento General de la construcción aceptado formalmente dentro de la ley estadounidense, y, como bien lo indica su contenido, establece los requisitos mínimos para el diseño, la construcción y la evaluación de la resistencia de elementos de concreto reforzado (ACI 318, 2014). Este documento ha sido base para la elaboración de códigos en muchos países, por lo que es considerado una referencia de reglamentaria de alta importancia.

A pesar de que existe una gran cantidad de códigos de diseño de concreto reforzado con acero a nivel mundial, esta investigación toma como referencia únicamente los mencionados anteriormente, el CSCR 2010/14 debido a que es la regulación nacional, y el ACI 318 dado que es una de las referencias internacionales más importantes.

A pesar de que existen diferentes documentos regulatorios de diseño de elementos de concreto reforzado con polímeros de fibras, se toma como referencia la Guía de diseño y construcción de concreto reforzado con barras de

fibras poliméricas reforzadas (FPR) (ACI 440.1R-15), esto debido a que es el equivalente al del ACI 318 para fibras, posee la misma estructura de contenido y cuando es posible se basa en las mismas metodologías de diseño.

El ACI 440.1R-15 consiste en un documento que proporciona las recomendaciones necesarias para diseñar y construir estructuras de concreto reforzado con FPR, y se encuentra basado en el conocimiento actual del uso de las fibras. Este mismo documento está pensado en ser funcional para el uso de barras de fibra de vidrio, fibra de carbono y fibra de aramida (poliamida aromática), ya que el comportamiento de los polímeros de fibras reforzadas suele ser muy similar cuando se utilizan para refuerzo de concreto.



Figura 8. Ejemplos de barras de PRF

Fuente: ACI 440.1R

Premisas de diseño.

Como cualquier otra metodología de diseño, la requerida para diseñar elementos de concreto reforzado con acero, posee una cantidad de premisas, las cuales sirven como base de razonamiento para desarrollar el diseño. Según Nilson (2004), las premisas para diseñar concreto reforzado son las siguientes.

- Las fuerzas internas que actúan sobre los elementos tales como esfuerzos normales y cortantes, momentos flectores, se encuentran en equilibrio con las cargas externas que actúan sobre dicho elemento.

- La deformación unitaria de las barras de refuerzo tanto cuando se somete a tensión como a compresión corresponde a la misma deformación del concreto circundantes, lo que significa que existe una adherencia perfecta en la interface entre el acero y el concreto.
- Las secciones transversales planas de los elementos continúan siendo planas cuando se encuentran sometidas a cargas.
- El concreto no es capaz de resistir esfuerzos a tensión.
- La teoría se base una las relaciones de esfuerzo-deformación reales y en las propiedades de resistencia del concreto y del refuerzo.

Fuentes de incertidumbre en el diseño

Dado que el elemento construido no resulta ser idéntico al que se diseñó de manera inicial, suele existir cierta incertidumbre en la resistencia total de un elemento a la resistencia teórica calculada en un inicio. Esta diferencia de resistencia entre el elemento real al modelo, según Nilson (2004), puede deberse a los siguientes factores.

- Las cargas reales a las cuales se somete el elemento pueden diferir de las supuestas en el diseño.
- Las cargas reales pueden estar distribuidas o posicionas de manera diferente a las supuestas.
- Las suposiciones y simplificaciones que se establecieron para el diseño pueden generar fuerzas internas diferentes a las que se supusieron.
- El comportamiento real estructural del elemento puede diferir al comportamiento supuesto dado la existencia de limitaciones del conocimiento.
- Las dimensiones reales del elemento pueden diferir a las del elemento modelo.

- El refuerzo puede no estar en una posición definida.
- Las diferencias reales de los materiales que componen el elemento pueden diferir de aquella especificadas.

Elementos bajo flexión

Entre los elementos de concreto reforzado que comúnmente se exponen a esfuerzos flectores producto de la aplicación de cargas a lo largo de su luz son las vigas, sin embargo, antes de hablar sobre el comportamiento de las vigas que se encuentran sometidas a flexión, es importante definir algunos conceptos clave para entender el comportamiento.

Fuerzas externas e internas

Existen dos tipos de fuerzas que actúan en los elementos, las fuerza externas que son todas aquellas que provienes de otro cuerpo y afecta el elemento en análisis, estas fuerzas ocasionan las fuerzas internas, tal como lo indica Nilson (2004), estas pueden descomponerse en fuerzas tangenciales y normales a la sección, de manera que las componentes que se encuentran de manera normal corresponden a esfuerzos de flexión (tensión en un lado del eje neutro y compresión en el lado opuesto); cuya función es la de resistir el momento flector que actúa sobre la sección. Por otra parte, las componentes que se encuentran de manera tangencia a la sección, son conocidos como esfuerzos de cortante que resisten las fuerzas transversales o cortantes

Deformaciones unitarias

Las deformaciones unitarias corresponden a la deformación que sufre un elemento por unidad de medida, dicha deformación es ocasionada debido a las fuerzas internas de compresión y tensión que sufre el elemento. Normalmente la deformación se denota con la letra épsilon del alfabeto griego (ϵ).

La imagen que se muestra a continuación permite apreciar de manera gráfica el comportamiento de las fuerzas en una viga sometida a flexión, así

como sus deformaciones unitarias. Donde “C” corresponde a la compresión y “T” a la tensión.

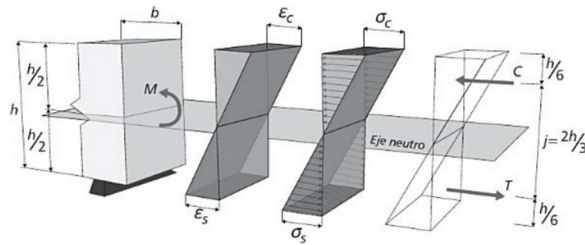


Figura 9. Comportamiento de las deformaciones y esfuerzos de un elemento de material homogéneo e isotrópico sometido a un momento flector.

Fuente: Lamus y Andrade, 2015

Deflexiones

A parte de los esfuerzos y las deformaciones, los elementos de concreto sufren deflexiones cuando son sometidos a fuerzas externas. Las deflexiones corresponden a una respuesta estructural que se visualiza como un desplazamiento que sufre el elemento producto de las mismas deformaciones.

Tal como como lo mencionan González, y Robles (2013) en su libro de aspectos fundamentales de concreto reforzado, es importante conocer las deflexiones ya que permiten estimar las rigideces de los elementos, además, funcionan como parámetro de aceptación, ya que permiten establecer un límite en el comportamiento de un elemento. Los mismos autores indican que las principales variables de las cuales dependen las deflexiones son las siguientes.

- La resistencia a la tensión del concreto. Cuanto mayor sea dicha resistencia, menores serán las deflexiones del elemento, debido a que la zona que no tiene grietas y es mayor la contribución al momento resistente del concreto a tensión.
- El módulo de elasticidad del concreto. Cuanto mayor sea este módulo, menores serán las deflexiones, ya que disminuyen las deformaciones unitarias.
- Porcentaje de refuerzo a tensión. Conforme disminuye el porcentaje de

refuerzo de acero en la zona de tensión, aumenta la deflexión, esto se debe a que aumentan las deformaciones unitarias tanto en el acero como en el concreto.

- Agrietamiento del elemento. Cuanto mayor sea el agrietamiento, mayores serán las deflexiones. Las principales razones por las que ocurre un agrietamiento se detalla más adelante.

En el caso de una viga de CR con acero sometida a un momento flector hasta llegar a su falla, la rigidez no se mantiene constante, si no que varían en cada etapa del proceso, tal como se muestra en la siguiente imagen.

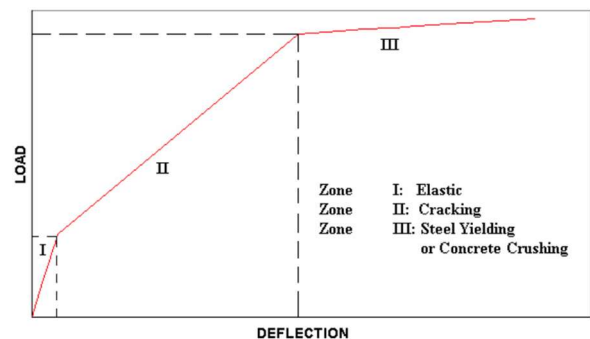


Figura 10. Diagrama típico de deflexión en función de la carga de una viga de concreto reforzado.

Fuente: Taqieddin (2008)

Agrietamiento

El agrietamiento de una estructura de concreto puede deberse a diferentes causas como lo son los errores de diseño, un curado incorrecto del elemento, carencia de juntas de expansión, prácticas de construcción incorrectas, entre otras. Sin embargo, para esta investigación las grietas que se van a analizar corresponden a grietas provocadas por esfuerzos sobre el elemento de concreto reforzado.

Cuando un elemento de concreto es sometido a esfuerzos de flexión, se dice que su comportamiento inicial es elástico y toda su sección aporta en la resistencia del momento exterior, cuando la fuerza de tensión supera la resistencia en tensión del concreto aparecen las primeras grietas, y en cuanto se aumentan las

cargas estas grietas aumentan en cantidad, longitud y espesor. (González et. al, 2013).

Después de que las primeras grietas hacen su primera aparición, el elemento ya no tiene un comportamiento elástico, por lo tanto, las deflexiones no se comportan de manera proporcional a las cargas. Como ya el concreto se separó, este no tiene capacidad a tensión, por lo que la resistencia en esta zona la aporta el acero, esto hasta que este entra en su etapa de fluencia, en esta etapa las deflexiones de la viga aumentan considerablemente mientras la magnitud de la carga se mantiene constante. Se puede identificar cuando el acero se encuentra en fluencia, ya que la longitud y el espesor de las grietas aumenta considerablemente, además se observa una horizontalidad notable en la gráfica de carga deflexión. (Gonzales y Roble, 2005).

Conforme aumenta el agrietamiento, se aumenta la zona en tensión del elemento y se reduce su zona en compresión, hasta el punto en que esta zona se reduce tanto que es incapaz de resistir los esfuerzos a tensión, por lo que el elemento se aplasta, y posteriormente llega el colapso.

En la figura 11, se puede observar una gráfica de carga-deflexión donde se observa su comportamiento en un ensayo a flexión con los puntos anteriormente explicados señalados.

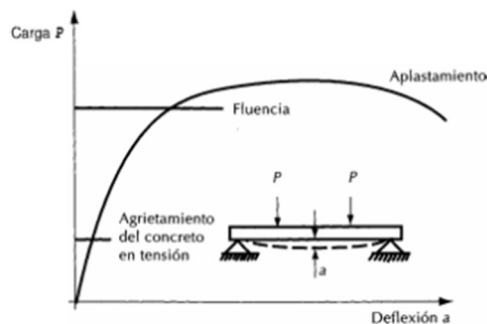


Figura 11. Curva carga-deflexión de una viga de CR.

Fuente: Gonzales y Robles (2005)

Condiciones de refuerzo en vigas de concreto.

La cantidad de refuerzo longitudinal o cuantía que posee una viga de concreto afecta de manera directa si el acero fluye o no antes de llegar a su carga máxima. Cuando el acero fluye antes de llegar a su carga máxima, tal como se explicó

anteriormente y se muestra en la figura 11, se dice que el comportamiento del elemento es dúctil, por lo tanto este produce deflexiones importantes antes de llegar a su colapso, a este tipo de vigas se les llama subreforzadas. Cuando la cantidad de acero longitudinal es mayor, el elemento nunca presenta fluencia, en este caso el elemento es sobrerreforzado y en el caso en el que el elemento entre en la etapa de fluencia cuando el concreto alcance su deformación límite, se le llama balanceado. (González et. al, 2013).

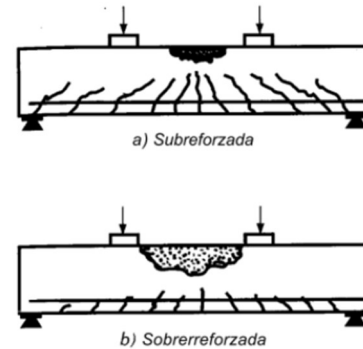


Figura 12. Representación de falla en vigas subreforzadas y sobrerreforzadas.

Fuente: González et. al, 2013

Estadística

Tal como lo explica Villanueva (2021), la estadística corresponde a una ciencia que consiste en recopilar, organizar, presentar, analizar e interpretar datos numéricos con el objetivo de tomar decisiones efectivas. En otras palabras, la estadística permite dar un significado a los datos para poder interpretar su comportamiento actual o futuro.

De manera general, podemos dividir la estadística en dos ramas principales, la estadística descriptiva y la diferencial. La estadística descriptiva consiste en el ordenamiento y presentación de datos de manera inteligible, con el fin de que sea sencilla su interpretación. Por otra parte, la estadística inferencial o inductiva, es una rama basada en la teoría de probabilidades y tiene como objetivo inferir el comportamiento de una población a partir de resultados obtenidos por medio de observaciones. (Fernández, 2002).

En el presente documento, se van a mencionar algunas medidas de tendencia central y medidas

de dispersión o variabilidad de los datos obtenidos, es por esto por lo que se definen algunos términos de manera general a continuación.

Media aritmética (promedio)

Corresponde a la suma de las magnitudes de todos los datos dividido entre la cantidad de datos, y como su nombre lo indica, hace referencia al término medio entre el conjunto de datos analizados. Se representa con el símbolo \bar{x} (x barra) y su expresión matemática es la siguiente.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Rango

El rango corresponde a un parámetro que permite apreciar la mayor dispersión existente entre los datos analizados, ya que se determina como la diferencia entre el valor máximo y el mínimo del conjunto de datos.

Varianza

Corresponde a un parámetro de variabilidad de los datos en función de la media de estos mismo, denota como s^2 . Para calcularlo, se realiza la sumatoria de los cuadrados de las desviaciones alrededor de la media de todos los datos y se divide entre la cantidad de datos menos uno, su expresión matemática es la siguiente.

$$s^2 = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}$$

Desviación estándar

Corresponde a un parámetro que permite conocer la dispersión que existe entre los datos y la media, por lo que entre mayor sea el valor de la desviación estándar, mayor será la dispersión entre los datos. Se denota con la letra griega sigma (σ) y se calcula como la raíz cuadrada de la varianza.

$$S = \sqrt{s^2}$$

Coefficiente de variación

Tal como su nombre lo indica, el coeficiente de variación (CV) corresponde a un índice que permite comparar conjuntos de datos de diferentes lotes en términos de la variación, ya que es un índice que se encuentra en función de su mismo promedio.

$$CV = \frac{\sigma_x}{|\bar{x}|}$$

Distribución normal

Según lo indican Juan, Sedano y Vila (2006), la Normal corresponde a la distribución de probabilidad más importante, debido a que una gran cantidad de variables aleatorias se acoplan a esta distribución. La distribución normal se encuentra definida por la media y la desviación estándar.

A continuación, se muestra la forma de la distribución normal con una campana simétrica.

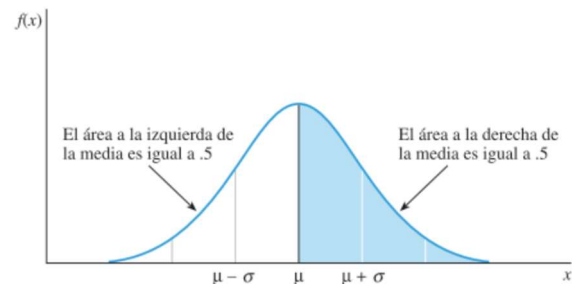


Figura 13. Distribución normal simétrica (Menhenhall et al., 2010)

Para verificar si un conjunto de datos tiene un comportamiento normal, se puede realizar diferentes pruebas de hipótesis que acepten o rechacen su normalidad. En el presente estudio se realiza la prueba de normalidad llamada Ryan-Joiner (RJ), el cual proporciona un coeficiente de correlación que, en caso de que este valor se aproxime a 1, es probable que el conjunto de datos se comporte de manera normal, además, genera un estadístico RJ que evalúa la fuerza de la correlación de datos. (Minitab, 2019).

Datos atípicos

Los datos atípicos corresponden a aquellos valores que se encuentran dentro de un conjunto de datos que se desvían considerablemente en

comparación con los datos del mismo conjunto. Para el presente estudio, se realiza la prueba de Grubbs, la cual permite determinar los valores atípicos dentro de los conjuntos de datos. Según Urvoy y Autrusseau (2014) esta es una prueba robusta, confiable y computacionalmente barata.

Antecedentes

En la actualidad, el desarrollo de comparativas entre materiales da pie a futuras investigaciones en busca de avanzar por la ruta de la evolución de los nuevos materiales y la sustitución de algunos otros que se vuelven de más difícil acceso. Aunado a lo anterior, la utilización de materiales compuestos presenta un constante crecimiento y evolución en diferentes sectores, siendo las obras civiles y edificaciones uno de los rubros donde más se ha destacado (Muraya, 2020).

Según lo expresan Tavares, Giongo y Paultre (2018), la utilización de barras de polímeros reforzados de fibras (FRP), es una de las más recientes alternativas para prevenir los inconvenientes que tienen relación con el refuerzo de acero en elementos de concreto armado, ya que las barras poliméricas no presentan expansión en el concreto debido a la corrosión, tal como sucede con las barras de acero, lo que aumenta la esperanza de vida del elemento reforzado (Rovira, Almerich y Martín, 2011). Además, el uso de perfiles estructurales de PRFV (Polímeros Reforzados con Fibra de Vidrio) en el sector de la construcción está creciendo debido a sus atractivas propiedades, como alta resistencia mecánica y durabilidad en ambientes agresivos (Souza, 2020).

Las barras de polímero para refuerzo son creadas a partir de la técnica pultrusion, dicha técnica consiste en crear un termorrígido a partir de fibras, las cuales se bañan en una resina y posteriormente son tiradas a través de un molde calefaccionado, dicho molde tiene una temperatura que, primeramente, genera una reacción química en la resina que la convierte de un estado líquido a un gel y seguidamente se le induce una alta temperatura que permite el curado del compuesto (Santiago, Lombera, Urquiza, y Moschiar, 2003; Fairuz, Sapuan, Zainudin y Jaafar 2014). Se ha encontrado que esta técnica muestra una mejora en las características de los materiales compuestos debido a que las fibras están tensadas cuando está en la etapa de curado, además que se reporta una mejoría en la rigidez debido a que la técnica permite hasta un 70% más en el contenido de fibra con respecto a otras técnicas (Fairuz et al. 2014).

El polímero fue inicialmente utilizado en la industria de la aeronáutica, la cual reconoció su alta resistencia y su bajo peso. La primera utilización del material en ingeniería civil fue en las carreteras de Estados Unidos, las cuales aplicaron el polímero para poder usar sal para el mantenimiento durante el invierno. Con la aparición de los equipos médicos que requerían que los materiales de las instalaciones fueran no conductivos, por lo que el uso de barras de poliméricas fue en aumento. En Japón para la década de los 90's se empezaron a realizar avances en las recomendaciones del uso de las barras poliméricas, lo cual ha ido evolucionando a partir de entonces. Actualmente, China es el mayor consumidor de barras poliméricas, las cuales son utilizadas en construcción de puentes viales y en construcción subterráneas. (ACI-440.1R-15. 2015)

Al conocerse las capacidades de los polímeros, diferentes investigadores aseguraron que, con el fin de aprovechar las capacidades de los PRFV, estos se podían integrar a elementos de concreto hidráulico y traería consigo varias ventajas, asociadas a la rigidez y la resistencia global de los elementos estructurales (Correia, 2007), por lo tanto, algunos investigadores empezaron a implementarlos en los elementos estructurales de concreto, como es el caso de Saadatmanesh y Ehsani (1991), quienes realizaron ensayos en los cuales cubrieron con placas adhesivas de PRFV la zona de tensión de vigas de concreto hidráulico reforzada con acero y lograron identificar que la resistencia a flexión de las vigas de concreto hidráulico aumentó significativamente.

Debido al uso de PRF que inició a crecer alrededor del mundo, el ACI creó un guía de diseño basada en el conocimiento obtenido de la investigación experimental mundial, el trabajo analítico y las aplicaciones de campo del refuerzo de PRF hasta el año 2015 (ACI-440.1R-15. 2015). En esta guía se regulan los usos y se hace énfasis en que no existen investigaciones suficientes para desarrollar diseños de muchos elementos, es por esto que su uso es restringido y castigado en el diseño.

Se han realizado limitadas investigaciones sobre el tema, como es la realizada por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Niterói, Brasil, el estudio a cargo de Azevedo et al. (2019) sobre el comportamiento a flexión de las barras PRFV en el concreto, reveló que la

utilización de este material como refuerzo estructural es una alternativa aplicable a la construcción y técnicamente factible.

De igual manera, en el estudio para la revista IBRACON, Souza et al. (2020), determinó que las estructuras mixtas en las cuales se implementan barras de PRFV como refuerzo transversal pueden constituir soluciones futuras para construcciones de elementos expuestos a condiciones ambientales severas con el fin de aumentar su durabilidad y también para contribuir al diseño de dichos elementos estructurales con menores tasas de refuerzo.

Metodología

El presente proyecto fue realizado mediante resultados de ensayos elaborados en las instalaciones del Centro de Experimentación de Construcción (CECO), perteneciente a el Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO). La mayoría de los ensayos fueron realizados en conformidad con las normativas de INTECO y ASTM, aquellos otros procedimientos que fueron llevados a cabo sin normativa se debieron a que no existía una normativa para el procedimiento, o no se contaba con el equipo necesario especificado en la norma.

Dentro de los procedimientos que se realizaron de acuerdo con las normativas de los entes anteriormente mencionados se encuentran los siguientes.

- Caracterización de los agregados finos y gruesos.
- Elaboración, curado y determinación de resistencia a tensión y compresión del concreto hidráulico.
- Determinación de esfuerzos máximos de fluencia de varillas de acero.

A continuación, se describen a detalle los procedimientos mediante los cuales se obtuvieron los resultados del presente proyecto.

Diseño de las vigas de concreto reforzado.

Antes de iniciar cualquier procedimiento, fue necesario realizar el diseño de las vigas de concreto reforzado, el objetivo principal de realizar este diseño fue el de obtener parámetros necesarios como:

- Geometría de la sección de concreto y sus dimensiones.

- Cuantía y distribución del acero de refuerzo tanto longitudinal como transversal.
- Longitud total de las vigas de concreto.
- Resistencia del concreto y del acero.

El proceso de diseño de las vigas de concreto reforzado se menciona a continuación.

Dado que lo buscado era poder comparar el comportamiento mecánico de las vigas reforzadas con acero y de las vigas reforzadas de manera híbrida con acero-PRFV, fue necesario realizar el diseño de manera que ambas vigas obtuvieran una capacidad similar, sin embargo, debido a que las resistencias atracción del acero y del PRFV, son muy diferentes, fue necesario variar la distribución y cantidad de acero para cada una de las vigas.

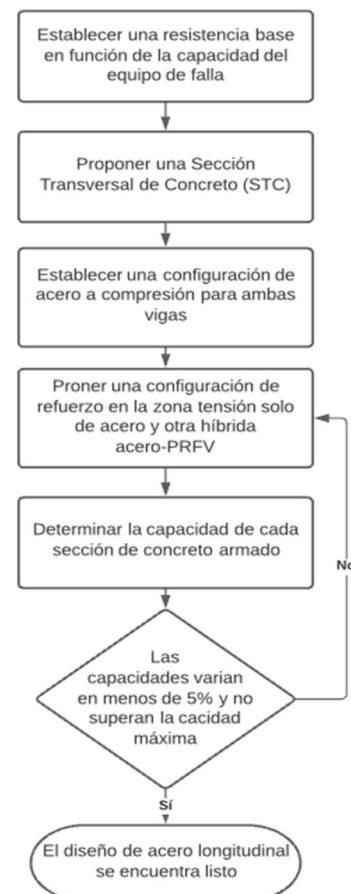


Figura 14. Diagrama de flujo de resumen de diseño de acero longitudinal.

Una vez terminado el paso anterior, para este caso la distribución obtenida para ambas vigas se muestra en la siguiente figura. La memoria de cálculo para la determinación de las capacidades de las secciones transversales propuestas se muestra en el apéndice 7

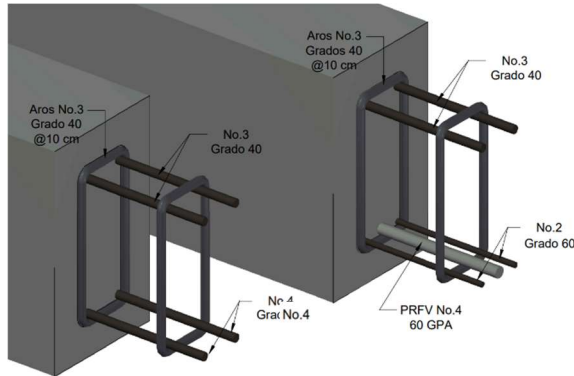


Figura 15. Esquema 3D de la armadura de las vigas construidas.

AutoCAD 3D v.2021

Cómo se puede observar, se lograron balancear las capacidades de las vigas utilizando 2 varillas No.4 de acero en una viga, y 1 barra No.4 PRFV con 2 varillas No.2 de acero en la otra viga. Es importante mencionar que las varillas de acero No.2 no son permitidas para su uso en refuerzos longitudinales de vigas de concreto reforzado, esto según lo estipulado por el CSCR 2010/14. Sin embargo, en este caso, se van a utilizar dado que el objetivo del proyecto es realizar una comparación entre dos tipos de refuerzo con el fin de analizar su comportamiento a flexión, no se pretende evaluar la afectación del uso de esta varilla en elementos sismoresistentes.

Una vez realizado el diseño de refuerzo longitudinal, se procede a determinar las características del acero que se encuentra de manera transversal en forma de aros, así como las separaciones que estos deben de tener para resistir los esfuerzos cortantes y evitar fallas indeseadas. En el apéndice 7 se muestra la memoria de cálculo del diseño por cortante de las vigas.

Caracterización de los agregados.

Obtención de la muestra en sitios de almacenaje.

Tanto el agregado grueso como el fino fueron extraídos de los silos de almacenamiento de materiales del CIVCO, a los cuales no se les monitorea factores como la humedad o la temperatura.

El procedimiento para extraer la muestra fue el normado mediante el documento ASTM D75-19.

- Inicialmente se identificó el lugar de almacenamiento del agregado y se verificó que no se encontrara contaminado por materiales ajenos a los del agregado pétreo.
- Seguidamente, se realizaron 3 tomas del material, la primera en el tercio superior, la segunda en el punto medio y la tercera en el tercio inferior de la elevación de la reserva. Para realizar las tomas se utilizó una tabla, la cual se incrustó en el material almacenado, de manera vertical, y se extrajo la muestra en la cara frontal de la tabla, esto con el fin de que no se produjera una segregación que alterara la muestra, y se repitió el proceso hasta obtener la cantidad requerida para los ensayos de caracterización.



Figura 16. Silos de almacenamiento de los agregados.

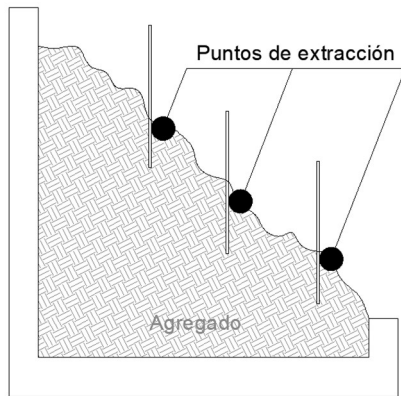


Figura 17. Diagrama de ubicaciones de puntos de extracción de muestras en el silo.

Reducción de las muestras obtenidas.

Para reducir la muestra previamente obtenida a tamaños de ensayo, se utilizó el procedimiento A (cuarteador mecánico) de la norma ASTM C702-18, sin embargo, previo a la reducción de muestras se realizaron los siguientes pasos.

- Se tamizó el material fino y desechó todo el material que posea un tamaño máximo nominal mayor a 4,75 mm.
- Se tamizó el material grueso con el objetivo de desechar todas las partículas que tuvieran tamaños mayores a 19,00 mm, esto debido a que los elementos de concreto a fabricar poseen espaciamientos relativamente pequeños, por lo que no se pueden utilizar agregados muy gruesos para elaborar las mezclas de concreto.

Una vez preparado el material, se procedió a realizar el cuarteo mecánico mediante los siguientes pasos.

- Inicialmente se homogenizaron ambos materiales antes de iniciar el cuarteo.
- Seguidamente se redujo la muestra principal, tanto de finos como de gruesos por medio del cuarteador mecánico, dado que este mecanismo divide la muestra aproximadamente en la mitad de la masa, es necesario realizar la división hasta

obtener los pesos de material deseados para elaborar cada ensayo.



Figura 18. Proceso de cuarteo del agregado fino.

A partir de este punto, los ensayos, o algunas características de los ensayos varían para los agregados gruesos y los agregados finos, es por esto por lo que, para cada ensayo, se va a explicar el proceso de caracterización por separado de cada agregado.

Lavado del material que pasa por el tamiz 75 μm

Previo a realizar el ensayo de granulometría, se realizó un ensayo para la determinación de los materiales solubles, como los limos y las arcillas. Para esto, fue necesario realizar el procedimiento descrito en la norma ASTM C117-20, el procedimiento realizado se describe a continuación.

- Inicialmente, se realizó una reducción de la muestra madre de una cantidad que, después de secarse, superara los 300 g.
- Se introdujo la muestra al horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante.
- Sobre una pila con cierta pendiente, se colocó el tamiz de $75 \mu\text{m}$, sin embargo, dado que este es un tamiz que posee una malla muy susceptible a ser dañada, se

colocó por encima un tamiz de 1,18 mm, esto con el fin de retener todos los agregados más gruesos y que no tuvieran contacto con el tamiz de 75 μ m.

- Una vez que el material fino se encontró en condición seca, se determinó su masa inicial, con el objetivo de determinar posteriormente la cantidad de masa que logra pasar el tamiz de 75 μ m.
- Posteriormente se insertó la muestra en un recipiente y se adicionó agua, el recipiente poseía una amplia capacidad para que se pudiera manipular la muestra sin que exista pérdida del material.
- Una vez adicionada el agua, se realizó un mezclado de la muestra dentro del agua, dicho mezclado fue realizado con la mano, teniendo el cuidado necesario de que no se perdiera muestra. Este mezclado tiene la finalidad de ayudar a la particular disolverse.
- Con mucho cuidado, se vertió el agua del recipiente sobre los tamices ubicados en la pila con una pequeña pendiente. Cuando las partículas más gruesas del agregado tiendan a salirse durante el proceso, se debe detener el proceso, adicionar más agua y repetir el proceso de mezclado y vertido.
- Cuando se observó que el agua posterior al mezclado no poseía partículas (el agua estaba clara), se realizó el proceso una vez más, esta vez depositando todo el material en los tamices.
- Una vez escurrido todo el material, se recuperó todo el que retuvo el tamiz de 1.18mm y 75 μ m y se depositó en un recipiente, siempre con el cuidado de que no se perdiera material.
- Se introdujo el material al horno a una temperatura de 110°C \pm 5°C hasta obtener una masa constante.

Una vez que se secura el material retenido en el tamiz de 75 μ m, se determinó su masa y se calculó el porcentaje de la muestra original que pasó el

tamiz de 75 μ m, dicha determinación se realizó con la siguiente formula.

$$A = [(B - C)/B] \cdot 100$$

Donde,

A= Porcentaje de material más fino que el tamiz de 75 μ m. por lavado.

B= Masa original seca de la muestra de ensayo [g].

C= Masa seca de muestra de ensayo lavado [g].

Granulometría de los agregados

Para realizar el ensayo en el agregado fino, fue necesario una muestra de 300 g después de haberse secado, mientras que, para realizar el ensayo en el agregado grueso, la muestra fue de al menos 2000 g.

Para determinar la granulometría de ambos agregados, se llevó a cabo el procedimiento dictado en la norma C136-19, dicho procedimiento fue ejecutado mediante los siguientes pasos.

Agregado grueso

- Se realizó el secado de la muestra mediante un horno a una temperatura de 110°C \pm 5°C hasta obtener masa constante.
- Se acomodaron los tamices en función del tamaño máximo nominal del agregado, este orden es establecido por la norma ASTM C33 (2018), la cual establece las especificaciones mínimas que deben cumplir los agregados para concreto. El orden de los tamices en orden descendente (de arriba hacia abajo) fue 12,5 mm, 9,5 mm, 4,75 mm y 2,36 mm, no se utilizaron tamices superiores ya que, como se mencionó anteriormente, el material fue tamizado para que no tuviera partículas mayores a 19,00 mm, mientras que el tamiz mínimo es determinado bajo la norma ASTM C33-18, tal como se muestra en la siguiente figura.

Size Number	Nominal Size (Sieves with Square Openings)	Amounts Finer than Each Laboratory Sieve (Square-Openings), Mass Percent			
		12.5 mm (½ in.)	9.5 mm (¾ in.)	4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)
467	37.5 to 4.75 mm (1½ in. to No. 4)	...	10 to 30	0 to 5	...
5	25.0 to 12.5 mm (1 to ½ in.)	0 to 10	0 to 5
56	25.0 to 9.5 mm (1 to ¾ in.)	10 to 40	0 to 15	0 to 5	...
57	25.0 to 4.75 mm (1 in. to No. 4)	25 to 60	...	0 to 10	0 to 5
6	19.0 to 9.5 mm (¾ to ¾ in.)	20 to 55	0 to 15	0 to 5	...
67	19.0 to 4.75 mm (¾ in. to No. 4)	...	20 to 55	0 to 10	0 to 5
7	12.5 to 4.75 mm (½ in. to No. 4)	90 to 100	40 to 70	0 to 15	0 to 5

Figura 19. Cantidades pasando del proceso de tamizado para agregados con 12,5 de T.M.N.

Fuente: Adaptado de ASTM C33 (2018)

- Se agregó en cantidades reducidas el material sobre el tamiz superior, de manera que el material que pasa, caiga sobre el tamiz inferior y de esta manera sucesivamente hasta que todo el material sea tamizado. Para ayudar a que el material se distribuyera, se ayudó con agitación y golpes ligeros con la mano, cuando se estimó que el tamizado era suficiente, se realizó un tamizado específico en un tiempo determinado (en conformidad con ASTM C33), el procedimiento fue realizado varias veces, hasta que el material retenido del tamizado previo y el del tamizado nuevo tuviera una diferencia máxima de 1%.
- Una vez terminado el tamizado, se estimó la pérdida de masa en términos de porcentaje, en caso de que esta fuera mayor al 0.3%, se repetía el proceso descrito anteriormente hasta cumplir con dicha condición.
- Con los datos obtenidos de los porcentajes de material pasando, se dibujó la curva granulométrica y se comparó con la norma de referencia ASTM C33-18 para conocer su clasificación.

Agregado fino

En términos generales, el procedimiento para la determinación de la granulometría del agregado fino es idéntico al descrito anteriormente para el agregado grueso, la única diferencia es el tamaño de los tamices. Los tamices utilizados para el proceso en orden descendente de arriba hacia abajo fueron 9,75 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 600 µm, 300 µm, 150 µm y 75 µm. Los anteriores valores fueron los especificados por la norma ASTM C33-18, tal como se muestra en la siguiente figura.

Sieve (Specification E11)	Percent Passing
9.5-mm (¾-in.)	100
4.75-mm (No. 4)	95 to 100
2.36-mm (No. 8)	80 to 100
1.18-mm (No. 16)	50 to 85
600-µm (No. 30)	25 to 60
300-µm (No. 50)	5 to 30
150-µm (No. 100)	0 to 10
75-µm (No. 200)	0 to 3.0 ^{A,B}

Figura 20. Especificación porcentajes de cantidades pasando para los agregados finos a utilizar en mezcla de concreto.

Fuente: ASTM C33 (2018)



Figura 21. Cantidades retenidas de los diferentes tamices para el agregado fino



Figura 22. Pila de tamices utilizada para realizar la granulometría de finos

Resistencia a la abrasión

Este ensayo fue ejecutado en conformidad con la norma ASTM C131-2020, y para obtener los resultados de la resistencia a la abrasión del agregado grueso se realizaron los siguientes pasos.

- Se lavó la muestra de ensayo y se secó a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta que se obtuvo una masa constante.
- Se separó y se graduó la muestra en conformidad con la sección 8.1 de la norma ASTM C131-2020 y en función de las propiedades granulométricas del agregado.
- Se insertó la muestra de agregado grueso en la máquina de Los Ángeles, se introdujeron las esferas de acero y se hizo girar el tambor a 30 rpm hasta que se alcanzaron las 500 revoluciones.
- Se descargó el material de la máquina de Los Ángeles y realizó una separación en el tamiz de 1,70 mm, Se lavó el material más grueso al tamiz 1,70 mm y se secó al horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta que se obtuvo masa constante y se pesa la muestra.
- Una vez terminado el ensayo se calculó la diferencia entre la masa original y la masa

final de la muestra, a lo que se le llama perdida. Esta perdida se calculó en términos de porcentaje.



Figura 23. Inserción de la muestra en la máquina de los Ángeles.

Materia orgánica en los agregados finos.

Como bien lo indica el nombre, este proceso es realizado únicamente en los agregado finos y se realizó en conformidad con el procedimiento descrito en la norma ASTM C40-20, los pasos realizados se describen a continuación.

- Se realizó una reducción de la muestra hasta obtener una masa aproximada a los 900g.
- Se lleno una botella con agregado hasta alcanzar la marca de 130 mL.
- Se agregó una solución compuesta de hidróxido de sodio (NaOH) hasta que la muestra más la solución en una condición agitada tuviera un volumen de 200mL aproximadamente.
- Se tapó la botella, se agitó vigorosamente con el fin de saturar la muestra con la solución. Seguidamente se dejó reposar el recipiente por 24 horas.

- Una vez cumplidas las 24 horas, se comparó el color de la muestra con los vidrios de colores de la escala Gardner, ya que estos se encuentran relacionados con la presencia de materia orgánica en el agregado.



Figura 24. Comparación de la muestra ensayada con los vidrios de la escala Gardner

Determinación de la gravedad específica y la absorción.

El proceso para la determinación de la gravedad específica y la absorción del agregado fino y del agregado grueso son completamente diferentes, por lo tanto, a continuación, se muestran los pasos realizados por separado.

Agregado fino

El procedimiento se realizó en conformidad con la norma ASTM C128

- Primeramente, se realizó la reducción de la muestra madre por medio del separador mecánico hasta obtener una masa que superara 1 kilogramo.
- Se depositó la muestra de agregado fino en un recipiente permeable y se saturó con agua durante 24 horas con el fin de que sus poros permeables se llenarán de agua.
- Pasadas las 24 horas, se retiró con mucho cuidado el agua del recipiente, teniendo el

cuidado de no extraer parte de los finos del material.

- Una vez extraída la mayor cantidad de agua posible, se procedió a eliminar el agua libre del material con ayuda de una secadora de aire. Este proceso se realizó con mucho cuidado para evitar que el material se secase más de lo que se requería, ya que se necesitaba llegar a la condición de saturada superficie seca.
- Una vez que se creía que el material se encontraba en la condición de humedad saturada superficie seca, se realizaba una prueba para confirmarlo, dicha prueba consistía en agregar parte del material fino en un cono metálico y apisonarlo 25 veces muy levemente con un apisonador metálico con una masa de aproximadamente 340 g.
- Una vez que el material dentro del cono se encontraba apisonado, se debía retirar dicho cono y en función de cómo se comportara, esa sería la condición de humedad que poseía el material. Si al retirar el cono el material se desplomaba inmediatamente, el material había sobrepasado la condición de saturada superficie seca, por lo que se debía repetir el ensayo adicionando agua al material. Si al retirar el cono el material se mantenía estable, manteniendo su forma cónica, se da a entender que el material puede estar en condición saturada superficie seca o saturada superficie húmeda, por lo tanto, se debe de dar un ligero golpe con la mano en la base del cono, si el material se desploma inmediatamente después del golpe, el material se encuentra en la condición requerida, mientras que si el material no se desploma, es necesario continuar secándolo.
- Una vez que se determinó que el material se encontraba en condición saturada superficie seca, se introdujeron 500 g de este material en picnómetro previamente pesado.

- A continuación, se agregó agua a picnómetro con la muestra, de manera que sobrepasara el nivel del agregado.
- Se agitó enérgicamente el picnómetro, con el fin de que el agua cubriera completamente el agregado.
- Seguidamente se procedió a eliminar el aire que se encontraba dentro de las partículas del agregado fino, para esto fue necesario agitar el recipiente constantemente mientras se bombeaba el aire con una bomba de vacío durante 25 minutos.
- Cuando el agregado ya no desprendía más burbujas de aire, se agregó agua dentro del recipiente hasta la línea de aforo y se determinó su masa.
- Una vez que se pesó el picnómetro, se traslado el agregado fino a un recipiente metálico con el fin de insertarlo en el horno, este traslado se realizó con mucho cuidado ya que es importante que no exista pérdida de material.
- Se introdujo la muestra en el horno a una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta que se obtuvo masa constante.
- Una vez que el agregado se encontró en condición seca, se determinó su masa y la masa del picnómetro con agua hasta la línea de aforo.

Una vez realizado el procedimiento y obtenidos todos los datos, se determinaron las propiedades físicas del material mediante las siguientes ecuaciones.

$$G_{bs} = \frac{A}{B + S - C}$$

$$G_{sss} = \frac{S}{B + S - C}$$

$$G_s = \frac{A}{B + A - C}$$

$$\%_{abs} = \frac{S - A}{A}$$

Donde:

G_{bs} = Gravedad específica

G_{sss} = Gravedad específica en condición saturada superficie seca.

G_s = Densidad aparente

$\%_{Abs}$ = Porcentaje de absorción del agregado

A = Masa de la muestra de ensayo seca al horno [kg].

B = Masa del picnómetro lleno con agua hasta la línea de calibración [kg].

C = Masa del picnómetro lleno con la muestra de ensayo y agua hasta la línea de Calibración [kg]

S = Masa de la muestra de ensayo en condición saturada de superficie seca [kg]



Figura 25. Prueba para comprobar la condición de humedad y del agregado fino

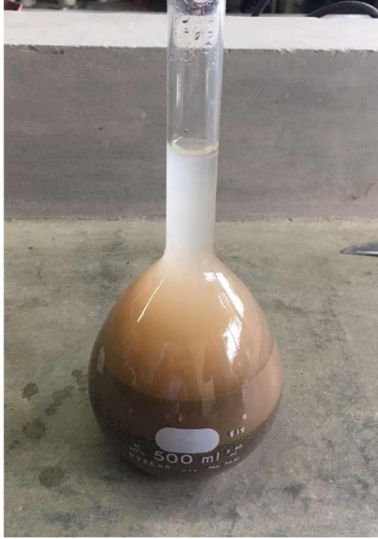


Figura 26. Pícnometro con muestra de agregado fino y con agua hasta su marca de aforo.

Agregado grueso

Para el agregado grueso se siguió el procedimiento dictado por la norma ASTM C127-15, dicho procedimiento se describe por medio de los siguientes pasos.

- Inicialmente se realizó una reducción de la muestra por medio del cuarteador mecánico hasta obtener una masa de al menos 2 kg.
- Una vez se tuvo la cantidad específica por la norma, se introdujo la muestra al horno a una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ hasta que se obtuvo masa constante.
- Una vez que el material se encontraba seco, se sumergió en agua durante 24 horas, en este caso se hizo mediante un recipiente metálico.
- Una vez pasadas las 24 horas, se procedió a extraer el material del agua y extenderlo sobre una tela absorbente grande, con la misma tela se rodó el material hasta que desapareciera el brillo del agua que corresponde a su humedad superficial.

- Una vez que el material se encontrase opaco, se determinó su masa, este valor corresponde a la masa del agregado en condición saturado superficie seca.
- Una vez que se determinó la masa en condición sss, se procedió a determinar la masa aparente del material, esto se hizo sumergiendo la mezcla en un recipiente con agua mientras colgaba de una balanza que medía su masa. Antes de registrar la medición, se agitó el contenedor mientras se encontraba sumergido para remover el aire atrapado en las partículas de agregado grueso.
- Por último, se secó la muestra de ensayo con ayuda del horno a una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ hasta que se obtuvo masa constante, se dejó enfriar hasta que alcanzar una temperatura aproximada a los 50°C y se determinó su masa.

Una vez realizado el procedimiento y obtenidos todos los datos, se determinaron las propiedades físicas del material mediante las siguientes ecuaciones.

$$G_{bs} = \frac{A}{B - C}$$

$$G_{sss} = \frac{B}{B - C}$$

$$G_s = \frac{A}{A - C}$$

$$\%_{abs} = \frac{B - A}{A} \cdot 100$$

Donde:

G_{bs} = Gravedad específica

G_{sss} = Gravedad específica en condición saturada superficie seca.

G_s = Densidad aparente

$\%_{abs}$ = Porcentaje de absorción del agregado

A = Masa de la muestra de ensayo seca al horno [kg].

B = Masa de la muestra de ensayo en condición saturada superficie seca [kg].

C = Masa aparente de la muestra ensayada [kg]



Figura 27. Determinación de la masa aparente del agregado grueso

Determinación del peso unitario y porcentaje de vacíos

El procedimiento para determinar el peso unitario o también conocido como densidad aparente, es bastante similar para el agregado grueso y el agregado fino, cómo bien se mencionó en el marco teórico, se debe determinar el peso unitario compactado y el suelto, ambos procedimientos se realizaron en conformidad con la norma ASTM C29-17, a continuación, se muestran los pasos seguidos para ambos agregados.

- Inicialmente se redujo la muestra principal en una cantidad aproximada a el 200% del volumen del recipiente utilizado para realizar el ensayo, la normativa indica que se debe poseer una cantidad que va desde el 125 al 200% de dicho volumen.

- Seguidamente se introdujo la muestra en el horno a una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta que se obtuvo masa constante.
- Una vez que el material se encontró en condición seca, se procedió a seleccionar un recipiente con capacidades especificadas por la norma y que están en función del TMN del agregado.

CUADRO 5. Capacidades del recipiente	
Tamaño máximo nominal de los agregados (mm)	Capacidad del recipiente (m^3)
12,5	0,0028
25,0	0,0093
37,5	0,0140
75,0	0,0280
100,0	0,0700
125,0	0,1000

Fuente: ASTM C29 (2017)

- Una vez seleccionado en el recipiente, se determinó su masa y su volumen.

Con este mismo recipiente mencionado anteriormente, se realizan los ensayos tanto para el agregado grueso como para los finos y tanto para el peso unitario compactado como para el suelto.

Peso unitario suelto

El procedimiento para determinar el peso unitario suelto del agregado fino y del agregado grueso es idéntico, por lo que a continuación se muestran los pasos para determinar ambos pesos sueltos.

- Se colocó el recipiente metálico en una superficie lisa y con la menor pendiente posible, seguidamente, con una cuchara pulpera, se agregó el agregado de manera constante. La adición de material en el recipiente se hizo a una altura de aproximadamente 50 mm sobre el borde superior del recipiente.
- Una vez que el recipiente se encontrara completamente lleno, se enrazó lentamente y se limpió todo el exterior delicadamente para que no existieran

partículas de agregado, siempre con el cuidado de no mover bruscamente el molde.

- Seguidamente se determinó la masa del recipiente más el agregado.
- Este procedimiento se repitió hasta que la diferencia de los últimos dos pesos unitarios no superara los 40 kg/m³. El cálculo para la determinación del peso unitario se muestra más adelante.

Peso unitario compactado.

Para la determinación del peso unitario compactado se realizaron diferentes procedimientos para el agregado fino como para el agregado grueso, el material fino fue compactado mediante un método denominado sacudido, mientras que el material grueso se compacto mediante el método llamado varillado. A continuación, se describen los pasos realizados.

Varillado (agregado grueso)

- Se colocó el recipiente metálico en una superficie lisa libre de pendientes.
- Se llenó el recipiente a un tercio con el agregado grueso con ayuda de una cuchara pulpera.
- Con una varilla de apisonado se realizaron 25 golpes, distribuyéndolos de manera uniforme en toda la superficie.
- Seguidamente se llenó a dos tercios el recipiente y se repitió el proceso de apisonado con la varilla con la misma cantidad de golpes.
- A continuación, se llenó el recipiente hasta rebosar y se apisonó nuevamente tal y como se hizo las dos veces anteriores.
- Una vez terminado con el apersonamiento, se niveló la superficie con los dedos y con ayuda de una regla enrasadora.

- Por último, se determinó la masa y se repitió el procedimiento hasta que la diferencia de los últimos dos pesos unitarios no superara los 40 kg/m³.

Sacudido (agregado fino)

El procedimiento es bastante similar al de varillado, la única diferencia es que, en lugar de utilizar una varilla apisonadora para compactar el material, el procedimiento de compactado consiste en levantar un costado del recipiente y dejarlo caer a una altura aproximada de 50 mm, este procedimiento se realiza de manera alternada con el lado opuesto que anteriormente se dejó caer. En total deben de realizarse 50 golpes, o sea, 25 golpes de cada costado.

Es importante mencionar que el procedimiento de llenado del molde es igualmente en tres tercios y que el criterio para dejar de repetir el ensayo es igual, no puede existir una diferencia de más de 40 kg/m³ entre las dos últimas determinaciones de peso unitario.

Para realizar el cálculo de el peso unitario y del contenido de vacíos se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$M = \frac{G - T}{V}$$

$$\%_{\text{vacios}} = \frac{(S \cdot W) - M}{S \cdot W} \cdot 100$$

En donde:

M = Peso unitario de los agregados [kg/m³].

G = masa de los agregados más el recipiente [kg].

T = Masa del recipiente [kg].

V = Volumen del recipiente [m³].

S = Gravedad específica en condición seca.

W = Densidad del agua [kg/m³].



Figura 28. Procesos de varillado del agregado grueso



Figura 29. Determinación de la masa del agregado fino más el recipiente.

Caracterización de las varillas de acero y las barras poliméricas.

Con el objetivo de conocer algunas características de los materiales con los cuales se refuerzan las vigas de concreto, se realizaron algunas caracterizaciones físico-mecánicas de dichos

materiales. Esta caracterización ayuda a la obtención de datos más aproximados a las características verdaderas de los materiales, ya que los que se observan en las fichas de especificaciones técnicas suelen diferir.

Ensayo a tracción para la determinación del esfuerzo de fluencia en el acero.

El procedimiento para la determinación del esfuerzo máximo de fluencia en las varillas de acero se realizó en conformidad con la normativa ASTM A370-20 Y los pasos realizados se detallan a continuación:

- Inicialmente se realizó el muestreo de las varillas de acero, este se hizo de manera aleatoria para las varillas No.3, ya que se poseía una gran cantidad de estas, sin embargo, para las varillas No.2 y No.4, no se realizó un muestreo aleatorio debido a que únicamente se contaba con una varilla para este ensayo.
- Una vez muestreadas las varillas, se cortaron tres elementos con una longitud de 30 cm para cada uno de los tipos de varilla a utilizar como refuerzo (No.2, No.4 y No.5).
- Una vez cortadas todas las varillas, se marcaron a 5 cm de sus extremos, de manera que quedasen 20 cm de longitud libre. Estos 5 cm corresponden a la longitud mínima que se inserta en la mordaza de la máquina universal.
- Seguidamente se determinaron los diámetros de las varillas, este valor fue el promedio de cuatro mediciones tomadas a lo largo de toda la longitud de estas.
- Se colocaron las varillas en la máquina universal ubicada en el piso fuerte del CIVCO, de manera que la varilla se encontrara insertada 5 cm en la mordaza superior y otro 5 cm en la mordaza inferior, dejando una longitud libre de 20 cm como se mencionó anteriormente.

- Finalmente se aplica la fuerza de tracción hasta que la varilla llegue a su punto de rotura.



Figura 30. Muestreo de las varillas de acero de diferentes diámetros.



Figura 31. Varilla durante ensayo a tracción en máquina universal.

Ensayo a tracción para la determinación del esfuerzo máximo de tracción de las barras de PRFV.

El proceso para la determinación de la capacidad máxima a tensión de las barras de PRFV, se debe efectuar bajo el procedimiento descrito en la norma técnica ASTM D7205, sin embargo, para el presente proyecto fue imposible seguir los pasos descritos en esta, debido a la falta de instrumentos.

La norma describe un procedimiento muy similar al mencionado anteriormente para las varillas de acero, con la diferencia de que las barras de polímero deben encontrarse encamisadas con un equipo de aluminio, equipo que no se logró conseguir por medio de ningún proveedor y resultó ser muy caro elaborarlo mediante un torno, debido al material, además, debido a la poca investigación que se ha realizado en la escuela sobre este tipo de material, no resultaba rentable su compra, ya hay que hay que elaborar un encamisado para cada tamaño de varilla..

Con el fin de aproximar su valor de rotura y obtener al menos el comportamiento de elongación de las barras, se diseñó un ensayo alternativo, el cual se detalla a continuación.

Dado que el encamisado de aluminio lo que genera es un confinamiento de la barra y una protección al fallo por aplastamiento, se decidió realizar el ensayo a tracción de la varilla, con el fin de conocer la fuerza aproximada en la que ésta falla por aplastamiento, una vez conocido el valor de falla, se realizó en otros especímenes una reducción en la sección transversal de la varilla de manera que se asegurara la falla en el punto de reducción antes de que la barra fallara por aplastamiento en los bordes.

Diseño de mezcla

Para la elaboración del diseño de mezcla de concreto, se siguió el procedimiento descrito en el capítulo seis de la práctica estándar elaborada por el comité 211 del ACI en el año 1991 con reprobación en 2002, este documento describe métodos para la elección de proporciones para concreto de cemento hidráulico hecho con o sin

otros materiales cementosos e ingredientes químicos (ACI 211.1, 2002).

Inicialmente se determinaron todos aquellos parámetros de ingreso en los cálculos de diseño, algunos de los parámetros requeridos fueron determinados por medio de las caracterizaciones previamente mencionadas, de fichas de especificaciones técnicas estos parámetros se resumen a continuación.

- Análisis granulométrico de los agregados finos y gruesos con el fin de conocer el módulo de finura y el tamaño máximo nominal respectivamente.
- Pesos unitarios de los agregados.
- Gravedad específica y absorción de los agregados finos y gruesos.
- Gravedad específica del cemento hidráulico a utilizar.

A continuación, se describen los pasos generales que se realizaron para la determinación de las dosificaciones de los agregados del concreto a realizar, en el apéndice 8 se muestra la memoria de cálculo con el diseño de mezcla detallado.

- Inicialmente se determinó el asentamiento que se requería en el concreto en función del tipo de elementos a construir.
- Se seleccionó el tamaño máximo nominal del agregado grueso.
- Se seleccionó el módulo de finura del agregado fino.
- Se calculó la cantidad de agua que se agregaría a la mezcla, así como su contenido de aire.
- Se seleccionó una relación agua/cemento (A/C) en función de la resistencia a la compresión a los 28 días que se requerían del concreto.
- Se estimó la cantidad de cemento

- Se calculó la cantidad de agregado grueso y agregado fino.
- Se determinó la humedad en sitio de los materiales para realizar un ajuste por humedad de los agregados.

Para este proyecto se determinó que la resistencia del concreto con el cual se elaborarán las vigas será de 210 kg/cm², esto debido a que es la resistencia mínima del concreto en compresión según el código sísmico de Costa Rica (2010/2014).

Elaboración de vigas reforzadas.

Para este punto ya es necesario tener el diseño de las armaduras, en este caso se utilizaron dos métodos de diseño de vigas de concreto reforzado, uno de los métodos corresponde al establecido por el comité 318S-19 del ACI (Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural), el cual permitió diseñar la viga que se encuentra reforzada únicamente con acero. Por otra parte, la viga reforzada de manera híbrida acero-PRFV, fue diseñada mediante el método de diseño híbrido “Desing Proposition for Hybrid FRP-Steel Reinforced Concrete Beam” elaborado por Pang, Qu, Zhu y Xu (2016) y respaldado con el método elaborado por el comité 440.1R del ACI en su documento Guía de diseño y construcción de concreto reforzado con barras de fibras poliméricas reforzadas (FPR).

Elaboración de la armadura de refuerzo

El procedimiento adoptado para realizar las armaduras de refuerzo de las vigas se describe a continuación.

Aros de cortante

Para la fabricación de estos elementos no se contaba con una herramienta para doblar las varillas de acero y poder fabricar los aros, por lo que fue necesario elaborar una dobladora manual.

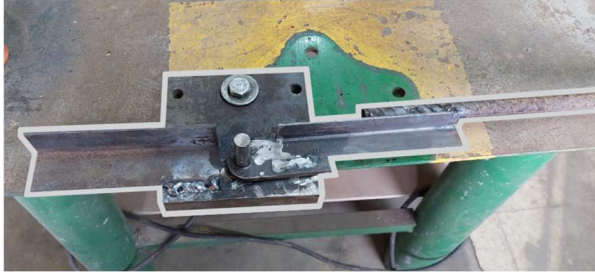


Figura 32. Dobladora manual de varilla de acero

- Inicialmente, se cortaron las varillas de acero No.3 en tamaños de 50 cm con ayuda de una esmeriladora.
- En la dobladora manual se realizaron marcas de guía para doblar los aros.
- Se colocaron las varillas en la dobladora y se doblaron realizando los aros con ángulos de 90° y 135°
- Adicionalmente se aplicó pintura anticorrosiva en los cortes y puntos de doblado para evitar corrosión.
- Este proceso se realizó 70 veces, ya que fue la cantidad de aros requeridos.



Figura 33. Aro de acero doblado de manera manual.



Figura 34. Doblado de los aros

Acero y polímero longitudinal.

Para la preparación del acero longitudinal, únicamente se realizó el corte de la varilla en el caso del las de acero, ya que las barras poliméricas traen longitudes de 1.90 m de fábrica.

Una vez que se encontraba el acero transversal (aros) y el acero longitudinal (varillas superiores e inferiores), se armaron formando la armadura, el procedimiento resumido se muestra a continuación.

- Inicialmente se colocaron las varillas superiores de la armadura en un caballete de madera y se amarraron de manera que se respetara su espaciamiento.
- Se marcó la posición de todos los aros a lo largo de las varillas longitudinales.
- Se colocaron los aros en las varillas y se amarraron con alambre negro.
- Una vez se encontraron todos los Aros sujetados a las varillas longitudinales superiores, se procedió a insertar dentro de los aros las varillas longitudinales inferiores y se amarraron con la misma técnica.

Este procedimiento que se describió anteriormente fue realizado cuatro veces, dos veces para elaborar las armaduras de las vigas reforzadas con acero y otras dos veces para elaborar la armadura de las vigas reforzadas de manera híbrida.



Figura 35. Construcción de las armaduras de vigas.

Una vez terminada la elaboración de las armaduras, se revisó las distancias de separación entre los aros y que estos se encontraran bien amarrados a las varillas longitudinales.

Diseño y montaje de la formaleta.

Tal como lo indican Barahona y Collado (2012), las formaletas para colado de concreto deben ser diseñadas de manera cuidadosa ya que sobre estas recae el peso del concreto y se aumentan los efectos laterales provocados por la presión del concreto cuando este es vibrado.

Cómo se planteó que el concreto de las vigas a elaborar sería vibrado, se optó por utilizar una formaleta resistente a vibraciones, que no generará desperdicios y que fuera fácil de armar y desarmar, por lo que se optó por alquilar formaleta modular. El proceso realizado fue el siguiente.

- Primeramente, se realizó el diseño de la formaleta y en base a este se determinaron las dimensiones y los elementos necesarios.
- Una vez que se tenían establecidas las dimensiones finales de la viga, se

procedió a realizar una búsqueda de empresas dedicadas a su alquiler y que tuvieran paneles con las dimensiones requeridas.

- Entre la serie de empresas encontradas, se seleccionó la que tuviera mayor disponibilidad y menor costo de alquiler.
- Una vez se encontraba la formaleta en el sitio, se procedió a armar y verificar las medidas.

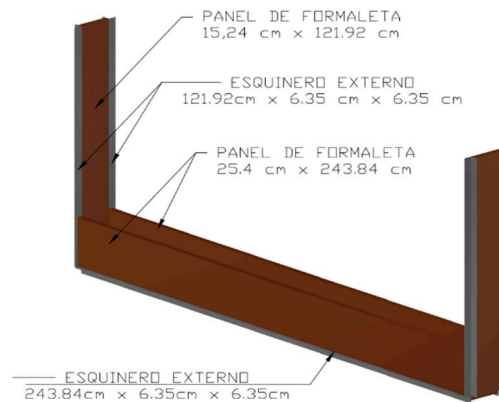


Figura 36. Modelo de la estructura de la formaleta.

AutoCAD 3D v.2021



Figura 37. Formaleta armada y lista para ser utilizada.

Una vez que se tuvieron listas las armaduras y las formaletas, se introdujeron las armaduras completas dentro de el encofrado, y se utilizaron dados de concreto previamente construidos para respetar los recubrimientos, el resultado final se muestra a continuación.



Figura 38. Armadura de acero posicionada en el encofrado.

Una vez que se tuvieron listas las armaduras dentro de las formaletas, se procedió a elaborar las mezclas de concreto y colar los elementos, el proceso detallado se describe a continuación.

Elaboración y colados de las mezclas de concreto.

La elaboración y el colado de las mezclas de concreto se hizo en conformidad con la norma ASTM C192-20, y el procedimiento realizado se detalla a continuación.

- Inicialmente se prepararon las proporciones de agregados según lo calculado en el diseño de mezcla.
- Una vez que todos los materiales y el equipo se encontraran preparados, se agregó el agregado grueso en la batidora junto con una parte de agua del mezclado, aproximadamente un tercio.
- Seguidamente se prendió la batidora y se dejó girar unas pocas revoluciones, aproximadamente 25 segundos y se detuvo.
- Mientras la batidora de concreto se encontraba detenida, se agregó el agregado fino, el cemento y el agua dentro del tambor de la batidora.
- Cuando se encontraban todos los componentes de la mezcla dentro de la batidora, se mezcló el concreto durante tres minutos, terminado este tiempo se

dejó en reposo durante tres minutos y finalmente se volvió a mezclar por dos minutos. Durante el tiempo en que la batidora estuvo en reposo, se cubrió la boca del tambor con un plástico para que no perdiera humedad.

- Una vez que la mezcla se encontró lista, se depositó en un carrito previamente humedecido y se procedió a determinar el asentamiento de la mezcla y su temperatura, estos dos ensayos se realizaron en conformidad con las normas se ASTM 143-20 y ASTM C 1064-17 respectivamente.
- Una vez realizados los ensayos anteriores y determinado que los valores se encontraran dentro de un rango esperado, se procedió a ejecutar el llenado de las vigas reforzadas, los cilindros y las vigas no reforzadas.



Figura 39. Elaboración de la mezcla de concreto.

A continuación, se muestra una tabla con la matriz de elementos de concretos colados en cada tanda de mezcla.

CUADRO 5. Cantidades y dimensiones de los elementos colados por tanda.		
Elemento	Cantidad	Dimensiones (cm)
Viga reforzada	1	25 x15x190
Vigas no reforzadas	3	15x15x60
Cilindros	9	15x30

A continuación, se muestra los elementos a colar de manera que se aprecie de una mejor manera sus dimensiones.

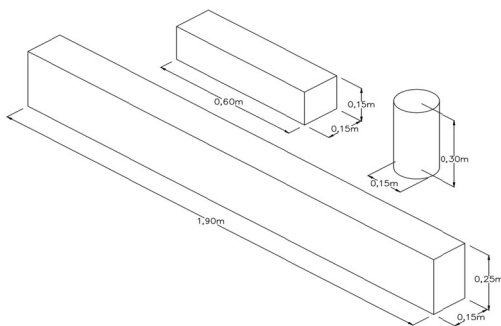


Figura 40. Esquema de elementos de concretos colados.

AutoCAD 2021

Para mantener un mejor orden de la explicación, se divide el proceso de colado de los tres elementos en el mismo orden en el que originalmente se realizó la colada.

Colado de vigas reforzadas.

- Previo a distribuir el concreto dentro del encofrado, se aplicó desmoldante de concreto en las caras interiores de la formaleta, con el cuidado de que este no contaminara la armadura, debido a que podría afectar la adherencia entre el concreto y el refuerzo.
- Seguidamente, se procedió a verter el concreto dentro del encofrado hasta que esta la mitad de su altura,
- Una vez que se contaba con el concreto de media viga, se insertó el vibrador de concreto a cada 15 cm de distancia a lo

largo de toda la viga (de 12 a 13 inserciones en total), el tiempo de vibración en cada penetración fue aproximadamente de cinco segundos, o hasta que dejaron de aparecer burbujas de aire grandes y la superficie del concreto se tornaba relativamente lisa. Es importante no sobrepasar el tiempo de vibrado ya que esto puede generar un asentamiento de los agregados del concreto. En cada inserción realizada, se tuvo el cuidado de qué no se tocara el acero o a la superficie de la formaleta.

- Después de realizar la primera vibración, se realizaron 10 golpes fuertes en cada superficie externa lateral de la formaleta con un mazo de hule, de manera que al final se golpeó 20 veces en total.
- Una vez terminado el proceso de vibrado y golpeado, se continuó llenando la viga con concreto hasta llegar a aproximadamente 1 cm del borde.
- Se volvió a repetir el proceso de vibrado y colado en los mismos tiempos y cantidades, sin embargo, para este paso, fue necesario asegurarse de que la punta del vibrador penetrara al menos 2.5 cm la capa inferior de concreto antes colocada.
- Por último, se agregó el concreto necesario para rellenar el faltante, además, se enrazó la superficie del concreto con ayuda de una cuchara de albañil, este proceso se realizó con el fin de qué la superficie del concreto tuviera un acabado plano y liso y que se encontrara nivelada con el borde de la formaleta. Este proceso se realizó con la mínima manipulación posible.

Este proceso fue realizado dos veces debido a que esa fue la cantidad de vigas realizadas en la primera tanda, el proceso de colado de cada una de las vigas tomó aproximadamente 14 minutos.



Figura 41. Vibrado de la segunda capa del concreto de la viga reforzada.

Colado de cilindros

- Inicialmente se aplicó desmoldante de concretos a los nueve moldes cilindros realizados.
- Una vez preparados los cilindros y lista la mezcla de concreto, se vertió concreto dentro de los cilindros hasta la mitad de su altura.
- Seguidamente se procedió a vibrar la mezcla que se encontraba dentro de los cilindros, el tiempo de vibrado fue de 5 segundos y la inserción se realizó exactamente en el centro de el cilindro, se tuvo el cuidado de qué el vibrador no tocara el fondo del molde
- Terminado el proceso de vibración, se realizaron, con un mazo de hule, 12 golpes en los cilindros repartidos en toda la circunferencia.
- Una vez que la primera capa se encontrara vibrada y golpeada, se procedió a rellenar la segunda capa de concreto, dejando 1 cm libre antes de llegar a la superficie del molde, esto con el fin de qué cuando se insertará el vibrador, no se rebalsara el concreto.

- Una vez colocada la segunda capa de concreto, se repitió el proceso de vibrado y golpeado respetando los mismos tiempos y cantidades de la primera capa, para el vibrado, se aseguró de que aproximadamente 2.5 cm de la punta del vibrador lograra penetrar la primera capa colada.
- Terminado el proceso de colocación del concreto, se agregó la cantidad del centímetro restante de concreto y se enrasó delicadamente con una cuchara de albañil.

Colado de vigas no reforzadas

El proceso de colado y vibrado de las vigas de concreto se realizó inmediatamente después de haber colado los cilindros, y al igual que los cilindros, este procedimiento se realizó en conformidad con la norma ASTM C192-20, dicho procedimiento se detalla a continuación.

- Inicialmente, se aplicó desmoldante de concreto en las caras interiores del molde plástico de las vigas con ayuda de una brocha.
- Seguidamente, con ayuda de una cuchara pulpera grande, se depositó concreto dentro de los moldes de vigas hasta llenar la mitad de su altura.
- Una vez que se contaba con el concreto de media viga, se insertó el vibrador de concreto a cada 15 cm de distancia a lo largo de toda la viga (4 inserciones en total), el tiempo de vibración en cada penetración fue aproximadamente de cinco segundos, ya que, en este tiempo, dejaron de aparecer burbujas de aire grandes y la superficie del concreto se tornaba relativamente lisa
- Una vez que el concreto se encontró vibrado, con ayuda de un mazo de hule, se realizaron 12 golpes en las caras exteriores de los moldes, 6 golpes en cada lado largo.

- Cuando la primera capa de concreto se encontraba vibrada y golpeada, se rellenó la segunda capa de concreto, dejando 1 cm libre antes de llegar a la superficie del molde, esto con el fin de que cuando se insertará el vibrador, no se rebalsara el concreto.
- A continuación, se repite todo el proceso de colado y golpeado de la misma manera en que se realizó con la primera capa, siempre asegurándose de que aproximadamente 2.5 cm de la punta del vibrador lograra penetrar la primera capa colada.
- Terminado el proceso de colocación del concreto, se agregó la cantidad del centímetro restante de concreto y se enrasó delicadamente con una cuchara de albañil.

Dado que cada colada de concreto fue de aproximadamente 0,27 m² de concreto, el tiempo de colado fue muy limitado, por lo que los procesos se realizaron lo más rápido posible.



Figura 42. Elementos colados por tanda realizada.

Desmolde y curado de los elementos.

El proceso de desmolde las vigas no reforzadas y los cilindros fue bastante simple, ya que los moldes utilizados están diseñados para facilitar su desmolde; En el caso de los cilindros, únicamente se desenroscaron las tuercas tipo paloma que tienen los moldes y el elemento se desencofra casi inmediatamente. Para desmoldar las vigas, estas

se colocaron de manera invertida y se insertó aire con ayuda de un compresor por unos orificios que el molde posee para que las vigas se separen del molde. Una vez que los elementos se encontraron desmoldados, estos se etiquetaron y se insertaron dentro de un cuarto húmedo hasta el día en que fueron ensayados.

Para el caso del desmolde de las vigas reforzadas, el proceso fue diferente, por lo que se describe a continuación en diferentes pasos.

- Pasadas las 24 horas de la colada, se retiraron únicamente los paneles laterales, dejando el panel inferior con la viga. Se decidió no movilizar el elemento debido que cada viga tenía un peso aproximado de 170 kg, y algún movimiento podría momentos indeseados.
- Una vez retiradas las formaletas laterales, se humedecieron las vigas y se envolvieron plástico negro, con el fin de que se mantuvieran húmedas. A partir de este momento, los elementos de concreto se humedecieron todos los días en la mañana y en la tarde (excepto los fines de semana), siempre cubriéndolos con plástico negro.
- Pasadas las 72 horas de coladas (48 de haber retirado los paneles laterales), se tuvieron que movilizar las vigas, esto debido a que la formaleta se tuvo que utilizar para la siguiente colada. Se colocaron sobre bases de madera distribuida cada 40 cm, tal como se muestra en la siguiente imagen.

Las vigas no se movilizaron hasta el día en que fueron instrumentadas.



Figura 43. Situado de las vigas.

Ensayos a los elementos de concreto.

La matriz de fallas de los elementos fallados se muestra en el siguiente cuadro, donde se pueden observar la cantidad de elementos que se ensayaron y edad que estos días de haber sido elaborados.

CUADRO 6. Matriz de falla de los elementos de concreto por tanda		
Elemento	Cantidad	Eda de falla (días)
Vigas reforzadas	2	31
Cilindros	3	7
	3	14
	3	31
Vigas no reforzadas	3	31

A continuación, se detallan los procedimientos de ensayo para obtener resultados mediante las fallas de los elementos de concreto.

Esfuerzo a la compresión (falla de cilindros y esclerómetro)

Falla de cilindros

Las fallas de los cilindros de concreto se realizaron en conformidad con la norma ASTM C39-21 y se realizó mediante los siguientes pasos.

- Se extrajeron los cilindros de la cámara húmeda y se determinó su diámetro mediante 2 mediciones promediadas.
- Se colocaron sobre almohadillas de neopreno y se insertaron en la máquina de fallas a compresión.
- Se realizó el ensayo a una velocidad de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s y se registró la carga máxima que cada elemento soportó.
- Una vez registrados los datos, se determinó el coeficiente de variación de cada conjunto de resistencias y se evaluó su calidad con ayuda de la norma ASTM C39.

Esfuerzo a la tensión (Falla de vigas no reforzadas)

El proceso de fallas de las vigas no reforzadas se realizó en conformidad con la norma ASTM C78-21 y se realizó mediante los siguientes pasos.

- Se extrajeron las vigas de la cámara húmeda y se determinaron sus dimensiones (peralta, ancho y largo).
- Se marcaron las ubicaciones de los apoyos y las cargas.
- Se colocaron en la máquina en la cual se fallaron las vigas, se fallaron a una

velocidad de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s, y se registró la carga máxima de resistencia.



Figura 44. Proceso de ensayo de resistencia a la compresión.



Figura 45. Proceso de ensayo de determinación del módulo de rotura.

Ensayo de flexión (Falla de las vigas reforzadas)

Este ensayo fue realizado en la zona denominada piso fuerte ubicada en las instalaciones del CIVCO, mediante un marco de carga que fue preparado para dicho ensayo, ya que se armó en función de la resistencia de las vigas falladas. El procedimiento para ejecutado se describe a continuación.

- Primeramente, se colocaron los instrumentos necesarios para la colocación de las galgas extensiométricas (medidores de deformaciones unitarias) y el crackmeter (medidor de

desplazamiento.) una semana antes de la falla.

- Se marcaron las ubicaciones de los apoyos y ubicación de las cargas. Este paso también se realizó una semana antes para evitar atrasos el día de la falla.
- Finalmente, el día de la falla, se posicionó la viga en el marco de carga, se realizó el ensayo y se registraron los valores máximos de carga, deflexión y deformaciones unitarias en la zona de tensión y compresión.
- Antes de retirar la carga de la viga, se midieron las grietas del elemento.

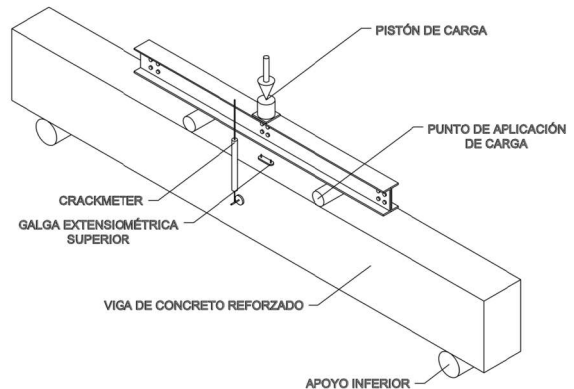


Figura 46. Diagrama de carga e instrumentación de las vigas reforzadas



Figura 47. Ensayo a flexión de viga de concreto reforzado.

Todo el proceso de ensayo fue documentado por medio de video para ser

analizado posteriormente, este análisis se realiza con ayuda de los datos generados durante la falla, de manera general, lo que se realizó, fue sobreponer el video obtenido sobre los datos registrados de la falla, de manera que se pudiese observar el video mientras se conocía la magnitud de la carga que se le estaba aplicando a la viga, de esta manera fue posible determinar con mayor exactitud la carga y tiempo en las cuales se generaron las primeras grietas.

Además, previo al ensayo se realizaron las mediciones necesarias para obtener las dimensiones reales de las vigas, estos valores se presentan en el apéndice 6.

Ensayos complementarios

Durante el desarrollo del proyecto, surgieron diferentes ensayos que no se encontraban dentro de lo planteado en la etapa de anteproyecto, sin embargo, se realizaron para respaldar los datos, aumentar el control de calidad de la construcción de los elementos y obtener resultados que enriquecieron la investigación. Estos ensayos se mencionan y se aplican de manera general a continuación.

Esclerómetro para la determinación de la resistencia a la compresión de manera no destructiva.

Este ensayo consistió en la determinación de la resistencia a la compresión de las vigas de concreto reforzado mediante un esclerómetro y se realizó en conformidad con la norma ASTM C805, el procedimiento realizado se menciona a continuación. El ensayo fue realizado cuando el concreto tenía 31 días de edad, el mismo día de la falla de las vigas.

- Se marcó un cuadro de 150x150mm en el costado de las vigas en las zonas en la que no se encontrara acero embebido.
- Con el martillo Smith, se realizaron 10 impactos de rebotes distribuidos

uniformemente en el área previamente marcada y a distancias mayores a 25mm uno de otro.

- Una vez registradas las lecturas, se convirtieron de cantidad de rebotes a esfuerzos de compresión con ayuda de un nomograma aportado por el equipo de ensayo.
- Se verificó que el rango de las 10 lecturas no fuera mayor a 12, de ser así, repetir el ensayo.



Figura 48. Ensayo con el esclerómetro

Radar de penetración terrestre para concreto (GPR) como control de calidad en vigas

Este ensayo fue realizado con el equipo de GPR y con la ayuda de un técnico de laboratorio con los conocimientos del manejo del equipo necesario. Una vez que las vigas se encontraban en el proceso de curado, se marcó cada viga de manera longitudinal a media altura del peralte, indicando el recorrido que realizaría el carro del GPR. Se configuró el equipo en términos de escala y otros parámetros y se rodó a lo largo de toda la viga, de manera que mostrara la distribución de los aros de la viga.

A continuación, se muestra una imagen del proceso de escaneo de las vigas.



Figura 49. Proceso de escaneo de la viga de concreto.

Ensayo de extracción de barras en cilindros de concreto.

Con el fin de comparar si la adherencia de las barras de PRFV es similar a la de las varillas de acero, se diseñó un ensayo basado en la norma ASTM C900, la cual consiste en un ensayo denominado pull-out, la modificación se debe a que el ensayo normado requiere modificar la sección transversal de la varilla de acero, y con los recursos que se cuenta no se podría igualar el proceso en las barras de PRFV, el proceso del ensayo se describe a continuación.

- Inicialmente se cortaron 4 barras PRFV y 4 varillas de acero con una longitud de 15 cm.
- De la misma manera al paso anterior, se cortaron 4 barras PRFV y 4 varillas de acero con longitudes de 20 cm.
- Una vez con las varillas cortadas, se realizó una mezcla de concreto bajo el mismo diseño de mezcla de los elementos de concreto previamente realizados, se siguió el mismo procedimiento de colado, con excepción de que se utilizaron cilindros de 10 × 20 cm, y en lugar de vibrarlos, se apisonaron con varilla.
- Una vez que el concreto se encontraba colado en los cilindros, previo a enrasar se insertaron las barras y varillas en los cilindros, de manera que el producto final fuera:

- 4 cilindros con barra PRFV embebida 5cm
- 4 cilindros con varilla de acero embebida 5cm
- 4 cilindros con 4 cilindros con barra PRFV embebida 10cm
- 4 cilindros con varilla de acero embebida 10cm

- Una vez que se cumplió con la matriz anterior, se dejaron en reposo durante 24 horas y seguidamente se desmoldaron, siempre teniendo el cuidado de no levantar las probetas desde el anclaje.
- Seguido del desmolde, se curaron en recipiente de agua, de manera que la parte de concreto del espécimen se encontrará completamente inundado, sin que el acero/PRFV tocara el agua.
- Pasados los 28 días, se realizó la extracción de las barras mediante la configuración mostrada en la siguiente imagen, y se registró el valor máximo de extracción.



Figura 50. Ensayo de extracción.



Figura 51. Curado de las probetas del ensayo de extracción.

Modelado de vigas mediante software de elemento finito.

Una vez que se contó con los datos de los materiales que componen las vigas, tales como la resistencia a la compresión del concreto y el esfuerzo de fluencia y rotura de las varillas de acero, se extrajeron las dimensiones reales de las vigas y de distribución de acero en su interior mediante cortes en su sección transversal, se procedió a completar los datos mediante modelos teóricos de comportamiento y fichas técnicas de los materiales.

Cuando se obtuvieron todos los datos necesarios, se procedió a realizar el modelado de las vigas de concreto en el software de elemento finito Abaqus, el procedimiento que se siguió para la elaboración de los modelos se detalla mediante pasos a continuación.

- Se crearon los materiales que componen las vigas de concreto en función de los valores obtenidos de manera experimental y teórica. Para este caso se creó:
 - Concreto, con los valores de resistencia obtenidos mediante cilindros, y su comportamiento en estado de agrietamiento, tensión y compresión se completó mediante el uso del modelo de comportamiento del concreto en tensión y en compresión, y el

modelo de daños para elementos de concreto armado sometidos a corte y flexión propuesto por Perdomo, Castro, Picón, Marante y Flores (2006)

- Acero, con los valores de esfuerzo de fluencia y de rotura obtenidos mediante ensayo experimental para las varillas No.2, No.3 y No.4. Para su comportamiento, se utilizó el modelo elastoplástico del acero, que supone las dos fases completamente lineales.
 - Polímero reforzado con fibra de vidrio, se creó como un material que se desarrolla en el rango elástico únicamente, y sus valores de esfuerzo de rotura se obtuvieron de la ficha técnica del proveedor que me muestra en el anexo 1.
- Una vez configurado los materiales, se procedió a modelar cada elemento por separado, estos elementos se crean base las dimensiones reales de las vigas, en este caso se modeló los siguiente.
 - 4 elementos para refuerzo
 - Aro para refuerzo
 - Viga
- Se crearon 4 dos elementos de refuerzo de refuerzo debido a que cada uno corresponde a un tipo de varilla/barra diferente.
- Teniendo los materiales y los elementos creados, se asignaron unos a otros, además, en este paso se les asignó el área de refuerzo, teniendo como productos los siguientes.
 - Varilla de acero No.2 grado 60
 - Varilla de acero No.3 grado 40
 - Varilla de acero No.4 grado 60
 - Barra PRFV No.4 grado 60
 - Aros de acero
 - Viga de concreto.

- Con los modelos de cada material, se modeló la viga apegándose a las dimensiones reales de construcción.
- Cuando se encontraba modelada la viga con su respectiva armadura, se estableció está como un elemento embebido en el concreto para que el análisis tome en cuenta la adherencia entre la armadura y el concreto.
- Seguidamente se establecieron las condiciones de apoyo y la posición, magnitud y dirección de las cargas sobre la viga.
- A continuación, se definió el mallado o "mesh" de cada elemento, para este caso se utilizó uno de 20 mm, debido a que los recursos del computador son limitados y cuando se disminuye el mallado, suelen haber problemas en el procesado los datos.
- Seguidamente se establecen los intervalos de tiempo de análisis, en relación a 1 unidad de tiempo.
- Habiendo realizado todos estos pasos, se procede a ejecutar el análisis, la duración de este proceso depende de los recursos computacionales con los que se poseen, en este caso, el procesado de cada una de las vigas tuvo una duración aproximada de 15 minutos.
- Terminado del procesado, es posible visualizar todos los resultados y extraer los datos en los puntos específicos, en

este caso se extrajeron los datos de carga en los puntos de aplicación de la misma y la deformación en el centro del claro.

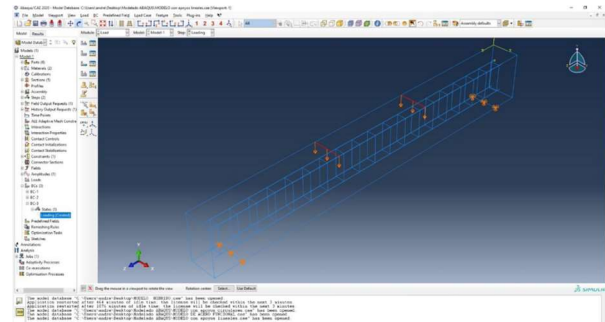


Figura 52. Modelado de estructura de concreto armado

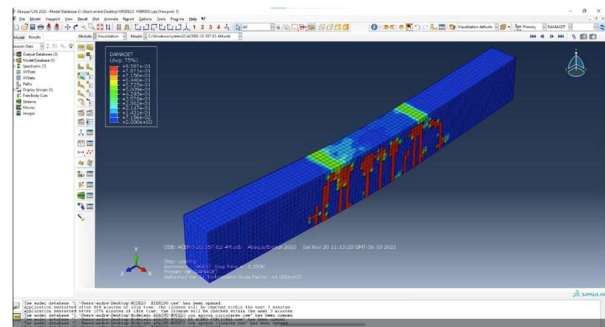


Figura 53. Post-procesado del modelo de la viga con refuerzo híbrido

Resultados

Caracterización de los agregados

Primeramente, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización de los agregados pétreos con los cuales se elaboró el concreto.

Cantidad pasando tamiz 75µm

El resultado en porcentaje de la cantidad de material del agregado fino que pasó el tamiz de 75µm se muestra a continuación.

CUADRO 7. MATERIAL FINO PASANDO EL TAMIZ DE 75 µm	
Material	Porcentaje de agregado pasando el tamiz de 75µm. (%)
Agregado fino	5.2%

Análisis granulométrico

Se muestran las gráficas granulométricas del agregado fino y del agregado grueso, así como los límites definidos por la norma ASTM C33-18.

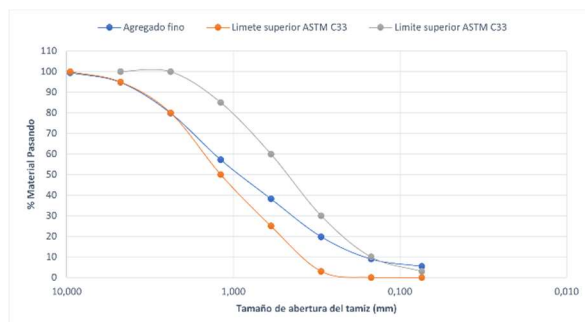


Figura 54. Curva granulométrica del agregado fino.

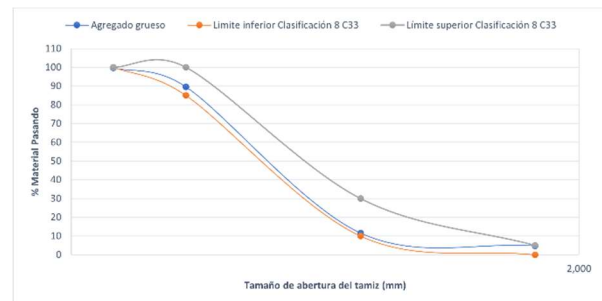


Figura 55. Curva granulométrica del agregado grueso.

De los mismos análisis granulométricos se obtienen valores importantes que se resumen en el siguiente cuadro.

CUADRO 8. PROPIEDAD DE LOS AGREGADOS PRODUCTO DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO		
Material	Parámetro	valor
Agregado fino	Módulo de finura	3,0
Agregado grueso	Tamaño máximo nominal	12,7 mm

Los datos numéricos detallados del análisis granulométrico se muestran en el apéndice 1 para el agregado fino y en el apéndice 2 para el agregado grueso.

Gravedad específica y absorción

Se muestran cuadros resumen de parámetros de gravedad específica tanto para el agregado fino como para el grueso en sus diferentes condiciones de húmeda, así como también su absorción.

CUADRO 9. GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO	
Parámetro	Valor
Gravedad específica seca (Gbs)	2,37

Gravedad específica saturada superficie seca (Gsss)	2,50
Gravedad específica aparente (Gs)	2,72
Absorción	5,4%

CUADRO 10. GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO	
Parámetro	Valor
Gravedad específica seca (Gbs)	2,62
Gravedad específica saturada superficie seca (Gsss)	2,67
Gravedad específica aparente (Gs)	2,76
Absorción	1,9%

Pesos unitarios y vacíos

A continuación, se muestran los pesos específicos compactados y sueltos, y porcentaje de vacíos para ambos agregados mediante cuadros resumen.

CUADRO 11. PESOS UNITARIOS Y PORCENTAJE DE VACIOS DEL AGREGADO FINO	
Parámetro	Valor
Peso unitario compactado	1719 kg/m ³
Peso unitario suelo	1565 kg/m ³
Vacíos	27,3%

CUADRO 12. PESOS UNITARIOS Y PORCENTAJE DE VACIOS DEL AGREGADO GRUESO	
Parámetro	Valor
Peso unitario compactado	1548 kg/m ³
Peso unitario suelo	1467 kg/m ³
Vacíos	49,9%

Corrección del diseño de mezcla.

Cuando se realizó el diseño de mezcla, se realizó una colada de prueba de 6 cilindros, las resistencias de esta colada se muestran a continuación.

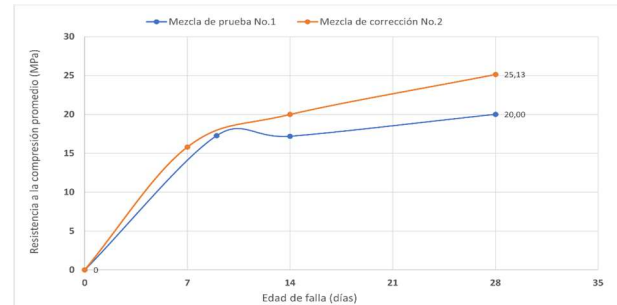


Figura 56. Resistencias a la compresión de la evaluación del diseño de mezcla.

CUADRO 13. ASENTAMIENTOS DE MEZCLAS DE CORRECCIÓN	
Mezcla	Asentamiento (mm)
Corrección No.1	70.0
Corrección No.2	96.10

Caracterización de los elementos de refuerzo.

Una vez realizados los ensayos de tracción de las varillas de acero y las barras poliméricas, se tabularon y se promediaron los valores obtenidos. En caso de que se requiera observar estos valores con mayor detalle, se pueden observar en el apéndice 5.

CUADRO 14. CARACTERIZACIÓN DE VARILLAS DEFORMADAS DE ACERO			
Varilla	Esfuerzo fluencia promedio (kg/cm ²)	Esfuerzo rotura promedio (kg/cm ²)	Elongación promedio (%)
No. 2	4869	5182	5,23%
No. 3	2973	4440	30,77%
No. 4	4607	5929	23,96%

CUADRO 15. CARACTERIZACIÓN DE LAS BARRAS PRFV		
Varilla	Esfuerzo rotura promedio (kg/cm ²)	Elongación promedio (%)
No. 4	8120	8,32

Además, se realizó la siguiente grafica que muestra la elongación elástica de las varillas de acero y PRFV utilizadas en la zona de tensión de las vigas.

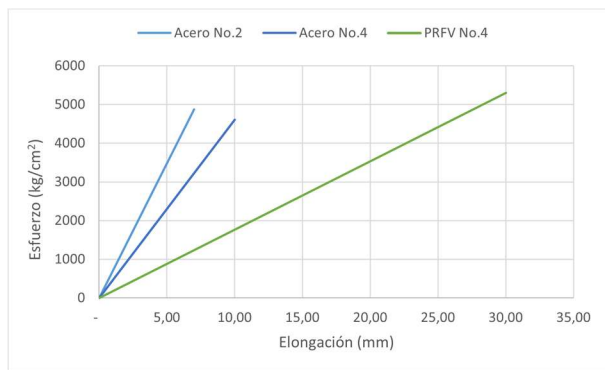


Figura 57. Elongación elástica de las varillas de acero y PRFV.

Control de calidad

Resistencia a la compresión del concreto

Cilindros

Los valores obtenidos mediante los ensayos realizados para la conocer la resistencia a la compresión para las diferentes edades se muestran a en esta sección. Valores más detallados como las resistencias y dimensiones por cada cilindro pueden ser consultados en el apéndice 3.

Inicialmente, por medio de un gráfico, se muestran los valores promedio de resistencia para las dos mezclas de concreto realizadas, donde “Mezcla V.A” corresponde a la mezcla con la cual se colaron las vigas reforzadas únicamente con acero, y “Mezcla V.H” es la denominación dada a la mezcla de concreto con la cual se colaron las vigas reforzadas de manera híbrida. Además, se muestran sus datos de estadísticos descriptivos.

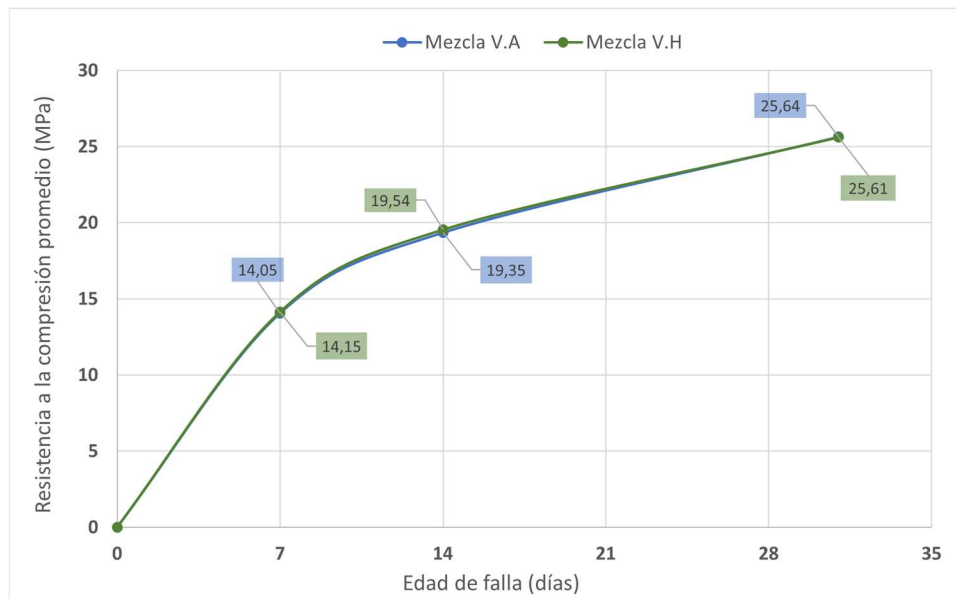


Figura 58. Resistencia a la compresión promedio de ambas mezclas a diferentes edades.

CUADRO 16. Estadística descriptiva de los datos de resistencia a la compresión								
Mezcla	Edad (días)	Media (Mpa)	Desviación estándar (Mpa)	Coefficiente de Variación	Mediana	Rango	RJ	P-Value
Mezcla V.A	7	14,05	0,70	5,00%	14,22	1,376	0,979	>0,100
	14	19,35	1,13	5,82%	18,936	2,137	0,949	>0,100
	31	25,64	0,66	2,56%	25,461	1,275	0,972	>0,101
Mezcla V.H	7	14,15	0,15	1,03%	14,15	0,29	1,000	>0,102
	14	19,54	0,82	4,22%	20,003	1,442	0,875	0,039
	31	25,61	0,79	3,07%	25,16	1,364	0,867	<0,010

Esclerometría.

Los ensayos de determinación de la resistencia a la compresión mediante el esclerómetro para cada una de las vigas se muestran a continuación, los ensayos fueron realizados a los 30 días de edad de cada viga.

CUADRO 17. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MEDIANTE ENSAYO DE ESCLERÓMETRO.		
Tipo de viga	Nombre	Resistencia a la compresión (MPa)
Vigas con refuerzo de acero	VA_01	21,80
	VA_02	22,61
Vigas con refuerzo híbrido	VH_01	20,80
	VH_02	21,60

Resistencia a la tensión del concreto.

Como ya fue explicado anteriormente, para la determinación del módulo de rotura del concreto, se ensayaron a flexión vigas no reforzadas, los resultados de estos ensayos se muestran gráficamente. Los datos específicos de estos ensayos se muestran en el apéndice 4.

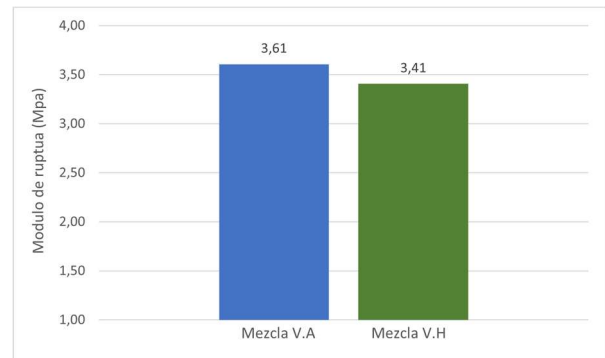


Figura 59. Módulo de rotura (MR) del concreto según mezcla

Análisis GPR para comprobar la distribución del acero

Para verificar que la distribución de los aros fuera la planificada, se realizó un análisis longitudinal a las vigas mediante el radar de penetración terrestre para concreto (GPR), las imágenes del escáner se muestran a continuación para cada una de las vigas, estos escáneres fueron realizado a media altura de las vigas.

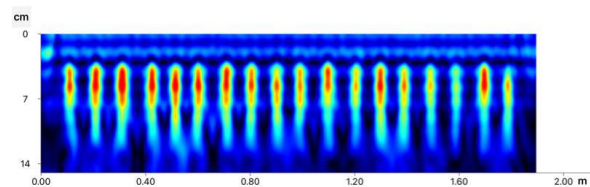


Figura 60. Escáner GPR longitudinal de la viga VA.01

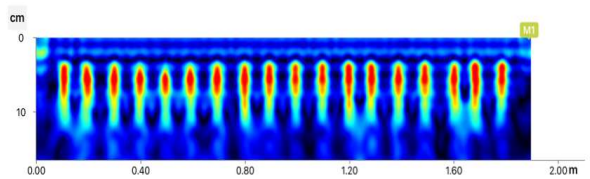


Figura 61. Escáner GPR longitudinal de la viga VA.02

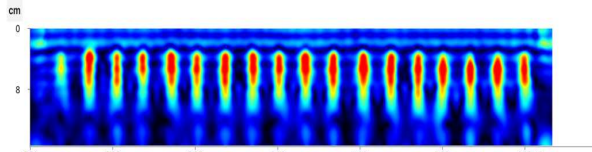


Figura 62. Escáner GPR longitudinal de la viga VH.01

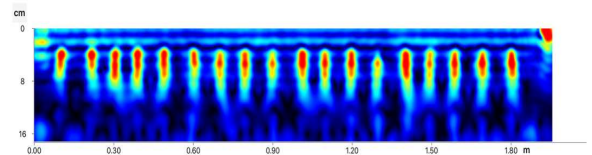


Figura 63. Escáner GPR longitudinal de la viga VH.02

Ensayo a flexión de las vigas de concreto reforzado.

Una vez que se realizaron los ensayos de flexión a las vigas de concreto reforzado, se extrajeron los datos de deformaciones unitarias en la parte superior e inferior de la viga en el centro del claro, y junto con el momento en este mismo punto se elaboró el diagrama de momento curvatura que se muestra continuación, además, con ayuda del software ETABS, se elaboró el diagrama de momento curvatura teóricos de la viga patrón, para tener un margen de referencia.

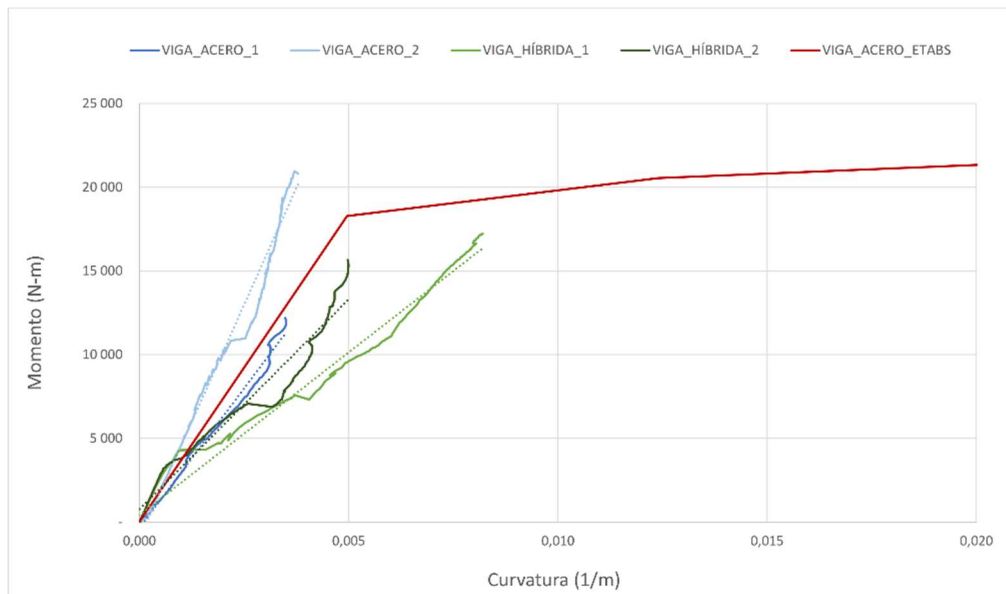


Figura 64. Gráfico de momento curvatura para todas las vigas

Durante el ensayo, se determinó la carga en la que se detectó el primer agrietamiento, de cada viga, estos datos se muestran en el cuadro 18.

CUADRO 18. CARGA DE LA PRIMER GRIETA NO PERMISIBLE SEGÚN ACI 224	
Viga	Momento (N-m)
ACERO_01	8145
ACERO_02	8057
HÍBRIDA_01	3454
HÍBRIDA_02	3017

Igualmente, seguido del ensayo de flexión, se construyeron los gráficos de carga-deflexión para cada una de las vigas falladas, los cuales se muestran en la figura 65, además, con el afán de tener un margen de comparación, se obtuvieron los gráficos de carga-deflexión mediante el software de elemento finito Abaqus para las dos configuraciones de vigas, estos se muestran en la misma figura

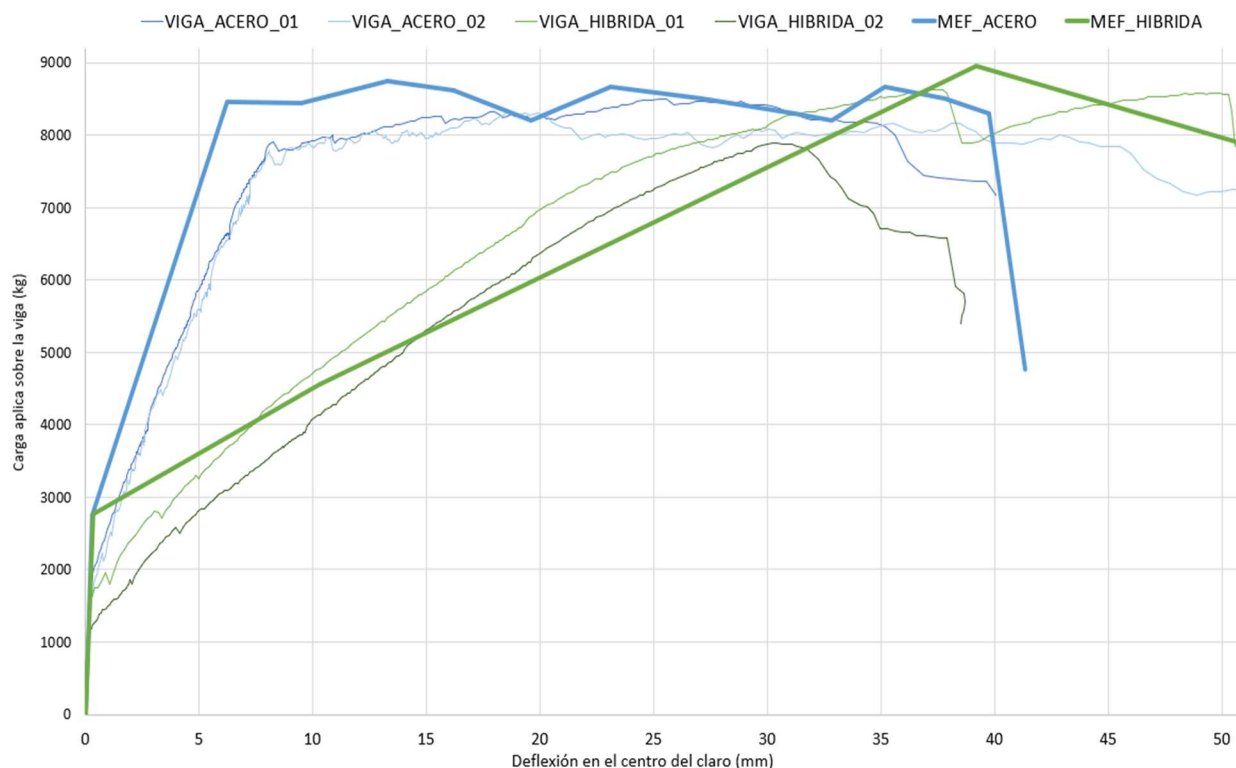


Figura 65. Gráfico de carga vs deflexión de las vigas reforzadas

De la información obtenida anteriormente, se extraen los valores de carga máxima alcanzada por cada viga. Es importante recordar que la viga híbrida 2 sufrió una falla por esfuerzo cortante, todas las demás por flexión. Además, se muestran las cargas máximas determinadas por medio del modelado de elemento finito y las calculadas en base a una metodología de diseño. *MEF* hace referencia a Modelado en Elemento Finito y *CAL* a los valores obtenidos en base a metodologías de análisis.

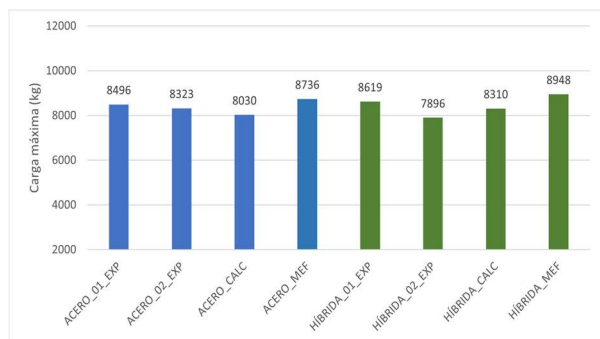


Figura 66. Cargas máximas de las vigas reforzadas.

A continuación, se muestra también el tipo de falla por la que se vio controlada cada una de las vigas.

CUADRO 19. TIPO DE FALLA PARA CADA VIGA

Viga	Tipo de falla
Viga acero 1	Sub-reforzada
Viga acero 2	Sub-reforzada
Viga híbrida 1	Sobrerreforzada
Viga híbrida 2	Falla por cortante

Después del fallo de cada elemento, aun cuando estos se encontraban cargados, se realizaron mediciones de la ubicación de cada una de las grietas formadas en las vigas, mediante estos datos se elaboró el diagrama que se muestran en las figuras 67 y 68, el cual representa la cantidad y la forma de las grietas formadas por cada viga de concreto.

También se muestran los patrones de agrietamiento determinados mediante el software de elemento finito Abaqus, los análisis se realizaron con un mayado 20 mm.

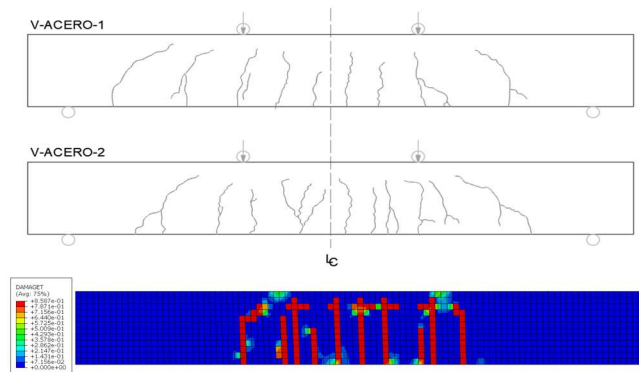


Figura 67. Agrietamiento de la viga reforzada únicamente con acero obtenido mediante modelación en ABAQUS

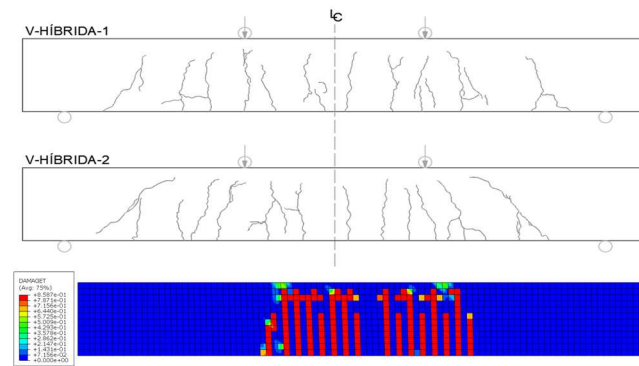


Figura 68. Agrietamiento de la viga reforzada de manera híbrida acero-PRFV obtenidos mediante modelación en ABAQUS.

Del ensayo de extracción de las barras de los cilindros de concreto se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 69.

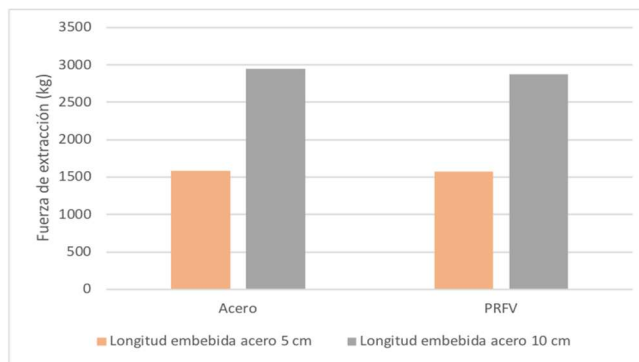


Figura 69. Fuerza de extracción de las barras en el concreto a diferentes profundidades.

Análisis de los resultados

Caracterización de los componentes de las vigas reforzadas.

Caracterización de los agregados

Con el objetivo principal de determinar si los agregados a utilizar en las mezclas de concreto eran aptos en función de la calidad, y de obtener parámetros para diseñar el concreto se realizó una caracterización del agregado fino y del agregado grueso, los cuales fueron extraídos de los silos de almacenamiento del CIVCO.

Previo a la realización del análisis granulométrico del agregado fino, se realizó el ensayo para la determinación del porcentaje de material que pasaba el tamiz de 75 μm , el cual, como se observa en el cuadro 7, corresponde a un 5.2% del material fino. López (2003) expresa que los materiales que tienen diámetros menores a 75 μm usualmente corresponden a limos y arcillas, los cuales son perjudiciales para las mezclas de concreto, debido a que estos recubren los agregados más gruesos e impiden una buena adherencia entre estos y la pasta de cemento, además, algunos tipos de arcillas generan expansión y encogimiento, lo cual genera presiones internas que puede generar fisuras en concreto.

Con el fin de determinar si el material fino es perjudicial para el concreto, se realizó un ensayo de colorimetría, donde el resultado (solución de hidróxido de sodio) estuvo por encima del color 1 en la escala Gardner, como se muestra en la Figura 24, por lo que se tomó la decisión de continuar con la caracterización de este mismo material.

Con respecto al análisis granulométrico, en la Figura 54 se muestra la curva granulométrica del agregado fino y los límites de calidad normado por ASTM C33-18 donde se puede observar que

en la mayoría de los tamices la muestra se encuentra dentro de los establecido, con excepción del porcentaje pasando el tamiz de 75 μm , este último porcentaje corresponde a un 5%, estando por encima 2% del límite superior normado. Sin embargo, la norma C33-18 indica que en aquellos casos en los cuales el concreto no se va a encontrar expuesto a abrasión, el límite de material pasando el tamiz 75 μm puede ser hasta 5%, es por esto que, para este experimento se permite el uso del material, ya que los elementos de concreto no estarían expuestos a abrasión.

Mediante el análisis granulométrico se determinó el módulo de finura, el cual corresponde a un resultado cuantitativo del grosor de la arena, en este caso, se obtuvo un valor de 3,0 como se observa en el cuadro 8, este valor, según Simeon (2007) permite clasificar el material como una arena gruesa, ya que se encuentra dentro del rango de 2,5 a 3,5 de módulo de finura.

Con respecto al agregado grueso, en la Figura 55 se presenta su curva granulométrica, como se puede observar de manera gráfica, el agregado se encuentra dentro de los límites de clasificación "8" según la norma ASTM C33, además, según la norma ya derogada, MEIC-No.10853, el agregado tendría una clasificación de piedra quintilla, a pesar de que el decreto del MEIC ya no es válido, se puede utilizar como una referencia para otra tener otra clasificación.

Del análisis granulométrico del agregado grueso, se obtiene el tamaño máximo nominal de 12,5 mm, como se observa en el cuadro 8, lo cual es aceptable para los alcances de la investigación, dado que cumple las condiciones para ser utilizado en concreto reforzado, condiciones como las mencionadas por el ACI 318, el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) o la Norma Técnica Peruana de Edificación (2009). Las cuales mencionan que el TMN del agregado no debe ser mayor que $\frac{3}{4}$ del espacio libre entre las barras de refuerzo, entre otras condiciones, sin embargo, para este caso, esta es la condición más crítica.

Con respecto a las gravedades específicas, se pueden observar los valores obtenidos para el agregado grueso y el fino en los cuadros 9 y 10 respectivamente, como era de esperarse, los valores de gravedad específica seca (Gbs), gravedad específica saturada superficie seca (Gsss) y gravedad específica aparente (Gs) tienen sus valores en orden ascendente. Esto se debe a que en el Gbs y el Gss contemplan el mismo volumen, sin embargo, el para el Gss se contempla el agua absorbida por el material, lo que aumenta su peso. En el caso de la Gs, corresponde a la mayor gravedad debido a que el volumen que se considera para su determinación es únicamente el de la sección impermeable del material.

En el documento del ACI de agregados para concreto (1999), se especifica que comúnmente los agregados poseen gravedades específicas que van desde 2,3 hasta 2,9, por lo que se puede interpretar que los datos obtenidos, tanto para el agregado grueso como para el fino corresponden a valores acertados para esta propiedad.

En relación a los resultados de los pesos unitarios, tabulados en los cuadros 11 y 12 para los agregados finos y gruesos respectivamente, se pueden observar cómo los valores tienen comportamientos esperados, ya que el peso unitario compactado debe ser menor al suelto debido a que contiene una mayor cantidad de masa en un mismo volumen. Millones (2008) expresa que el valor del peso unitario para agregados comunes, varía entre 1 500 y 1 700 kg/m³, teniendo esos límites como una referencia, se puede asegurar que los parámetros obtenidos en los pesos unitarios de ambos agregados son comunes, ya que los valores se encuentran dentro del rango o muy cerca de este.

Caracterización de los elementos de refuerzo.

En el cuadro 2 del apartado de resultados, se muestra en la caracterización de varillas de acero deformada, la primera mostrada corresponde a la varilla grafilada No.2, esta varilla posee ficha de especificaciones técnicas, sin embargo, este documento no posee datos del esfuerzo de fluencia o esfuerzo de rotura es por esto que no se encuentra un margen de comparación. Dado su esfuerzo de fluencia

promedio de 4869 kg/cm² y su esfuerzo de rotura promedio de 5182 kg/cm² es catalogada como varilla grado 40. Además, esta varilla posee un porcentaje de elongación de aproximadamente un 5%, lo que significa que su etapa de fluencia es muy corta con respecto a la carga de tensión.

Continuando con el análisis de las varillas del cuadro 12, la varilla No.3 posee un esfuerzo de fluencia de 2973 kg/cm² y un esfuerzo de rotura de 4430 kg/cm² lo que la cataloga como una varilla de grado 40, con respecto a su elongación promedio de 30.8%, se encuentra dentro del rango especificado en la ficha técnica de proveedor. Por último, con respecto a la varilla No.4, esta posee un esfuerzo de fluencia de 4607 kg/cm² y un esfuerzo de rotura de 5929 kg/cm², con estos datos es posible catalogar la varilla como grado 60. Al igual que la varilla número tres, la varilla No.4, se encuentra por encima de la elongación mínima específica según la ficha técnica.

Con respecto a los valores del esfuerzo de rotura de la barra PRFV, se puede observar como se obtuvo un valor de 8120 kg/cm² sin embargo, este valor se encuentra aún muy por debajo de lo especificado por la ficha técnica, y esto se debe a que el ensayo realizado no es el adecuado para determinar esta resistencia, por lo tanto, para los procesos de modelación y cálculos de las vigas, se utilizó el esfuerzo de rotura mínimo suministrado por la ficha de especificaciones técnicas mostrada en el anexo 1.

En la figura 55, se puede observar por medio de una gráfica comparativa la elongación en el rango elástico de las varillas de acero y la barra de PRFV, donde se puede observar notablemente como la pendiente de la barra polimérica es menor, lo que significa que, en comparación con una barra de acero, esta requiere menos carga para el alargarse más.

Éstos valores de propiedades mecánicas, nos permiten obtener resultados teóricos y modelos más aproximados a los reales, tal como se explica más adelante.

Corrección del diseño de mezcla

Una vez que se caracterizó al agregado fino y el agregado grueso, se procedió a realizar el diseño de mezcla de las proporciones de los

agregados de concreto, una vez que este diseño se consideró listo, se realizó una mezcla de prueba inicial para corroborar los parámetros de asentamiento y resistencia a la compresión, en la figura 56, se puede observar la resistencia a la compresión de dicha mezcla (línea azul). A pesar de que a los siete días este concreto tuvo una resistencia a la compresión aceptable, a los 14 días presentó una baja de resistencia, lo que se interpretó como un error en el diseño de mezcla o un problema de calidad en el cemento. Ya que la proyección que se realizó en ese momento a los 28 días no alcanzaba la resistencia propuesta para las vigas, se realizó una revisión en el diseño de mezcla donde se encontró un parámetro de absorción incorrecto, además se propuso realizar otra colada de revisión de diseño de mezcla con el uso de un cemento más reciente, ya que para la primera mezcla el cemento utilizado tenía cuatro meses de haber sido embalado.

Una vez realizada la segunda mezcla, a los 14 días ya se alcanzó la resistencia mínima aceptada para la investigación como se puede observar en la figura 56, para los 28 días, la resistencia a la compresión fue de 25,13 MPa, lo cual se consideró como aceptable para el desarrollo del proyecto, esto debido a que, a pesar de que en la etapa de anteproyecto se propuso realizar las vigas con concretos de resistencias de 20,6 MPa debido a que es la resistencia mínima aceptada en Costa Rica según el CSCR-2010/14, se previó que la resistencia final de las vigas fuera menor que la determinada debido a que el proceso de curado no sería en cámara a humedad.

Con respecto a los asentamientos de las mezclas de corrección que se muestran en el cuadro 13, se puede observar cómo mejoró el asentamiento en función del diseño de mezcla propuesto (100,0 mm), esta mejora tiene sentido, ya que lo que diferencia cada uno de los diseños de mezcla aparte de la edad del cemento, es la absorción del agregado grueso, la mezcla inicial tenía un porcentaje de absorción menor que la segunda mezcla, por lo que al realizar la corrección por humedad, se requería una menor cantidad de agua en la mezcla inicial, lo que afectó el asentamiento de la mezcla.

Conforme a el valor obtenido de asentamiento, se decidió mantenerlo para la mezcla de las vigas principales, debido a que según el ACI 211 (2002) en el capítulo 6, el asentamiento recomendado para la construcción vigas de concreto reforzado es de 25 a 100 mm.

Control de calidad de las vigas

Resistencia a la compresión.

En la figura 58, donde se observan el promedio de los datos de resistencia a la compresión en función de la edad de las fallas, se puede observar a simple vista como la mezcla de las vigas de acero y la mezcla de las vigas híbridas tienen un comportamiento muy similar, a tal punto que se superponen una sobre otra, en las tres edades en las que se probó su resistencia.

Para los fines de esta investigación, el valor importante es aquel que se recolectó a los 31 días, mismo día que se realizó la falla de las vigas de concreto reforzado, para la mezcla de las vigas de acero, se obtuvo una resistencia de 25,64 MPa, mientras que para la mezcla de vigas híbridas se obtuvo una resistencia de 25,61 MPa, lo que significa una diferencia de 0.03 MPa entre el f'_c de cada mezcla, una desviación estándar de 0.02 MPa y un coeficiente de variación de 0.08%. Por lo tanto, para los fines de esta investigación se adopta el promedio de estos datos como el valor para realizar los cálculos y las modelaciones de los elementos de concreto.

Para poder comparar dos tandas de concreto diferentes, se puede hacer referencia a la norma del comité 214 del ACI (2011), sin embargo, este documento indica que para utilizar los parámetros estadísticos de comparación como la desviación estándar o el coeficiente de variación, es necesario que la toma de datos sea de al menos 30 muestras, por lo que en este estudio no se compararan con los parámetros especificado, más si con los valores de calidad brindados por la norma ASTM C39 con respecto a las desviaciones máximas de los conjuntos de datos, como se muestra en la siguiente figura.

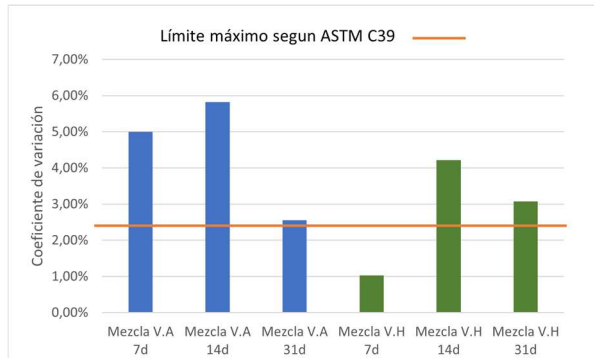


Figura 70. Coeficientes de variación de los valores de resistencia a la compresión del concreto para cada edad de falla.

En la figura 72 se presenta de manera gráfica el coeficiente de variación de los datos de cada una de las mezclas en comparación con el límite máximo establecido por la normativa ASTM C39, donde claramente se observa que sólo una de las mezclas respeta este límite con un porcentaje que se aproxima al 1%.

A pesar de que son pocos datos, lo ideal es buscar la confiabilidad de los mismos, es por esto que se identifican los datos que más se alejan de la media y se descartan para aumentar dicha confiabilidad, sin embargo, no se debe eliminar más de un dato debido a que la norma ASTM C 39 especifica los rangos de coeficiente de variación para dos o tres datos, por lo que, si se descartan más de 2 datos, únicamente se contaría con un dato.

Una vez realizado el procedimiento anterior, se observa una variación importante en los datos, en términos del coeficiente de variación, tal como se muestra en la siguiente figura.

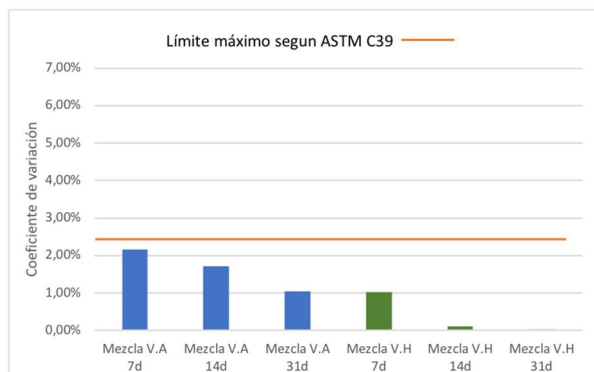


Figura 71. Figura 72. Coeficientes de variación de los valores de resistencia a la compresión del concreto modificados para cada edad de falla.

Como se observa en la figura anterior, los datos de coeficiente de variación se encuentran dentro de lo que establece la norma ASTM C39 como un buen control de calidad, este cambio no perjudica el promedio aceptado de resistencia final de las vigas, debido a que la modificación es muy leve. Los datos de resistencias modificadas se muestran en el apéndice 3

Por otra parte, es necesario dejar claro, que el rango de aceptabilidad de calidad propuesto por la C39 es aplicable en valores de resistencia que van de 17 a 32 MPa, sin embargo, en este caso se va a adoptar el criterio de permisibilidad para todos los conjuntos de datos, ya que, los que se salen del conjunto tienen un comportamiento normal, como se analiza a continuación.

En el cuadro 16, dónde se muestra parte de la estadística descriptiva de los datos de resistencia a la compresión, se puede observar el parámetro estadístico RJ, el cual, como se mencionó anteriormente en el apartado de marco teórico, corresponde a un valor utilizado para determinar una posible normalidad en los datos. Como se puede observar, la mayoría de los datos tienen un comportamiento normal, ya que su parámetro estadístico RJ se aproxima a uno y poseen un p-value mayor a 0.05, que representa el 95% de confiabilidad con el cual se realizó el estudio de normalidad. Para los dos valores a los cuales se obtuvieron valores RJ más alejados de la unidad y un p-value menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa de que los datos no poseen una distribución normal. Sin embargo, es importante mencionar que estas pruebas están diseñadas para conjuntos de datos mayores, tal como lo indica Flores y Flores (2021) pruebas como la de Ryan Joyner para la determinación de normalidad en los datos son adecuadas para muestras superiores a 30 observaciones, dónde es posible notar verdaderos comportamientos normales. Para este caso, al contar con únicamente con tres datos, pequeñas variaciones en alguno de sus datos pueden determinar si la muestra tiene o no un comportamiento normal, por lo que es preferible realizar este tipo de análisis en conjuntos de datos mayores.

Continuando, en el cuadro 17, se muestra la resistencia a la compresión mediante el ensayo de esclerómetro, dicho ensayo fue realizado con el objetivo de respaldar los datos obtenidos mediante la falla de cilindros. Los resultados tabulados,

varían en un rango de 12% a un 19% conforme los determinados por medio de los cilindros.

A pesar de que funcionan para corroborar resistencias, Deliberes (s.f) menciona que el porcentaje de error de la estimación de resistencia con un esclerómetro en comparación con la determinación de resistencia un ensayo destructivo por medio de probetas cilíndricas se aproxima al 12%, con una significación del 90%., es por esto que, los datos obtenidos mediante este ensayo no se toman en cuenta para estimar la resistencia real del concreto. Es importante dar a conocer que cuando se realizó el ensayo con el esclerómetro, las vigas se encontraban apoyadas sobre elementos de madera, lo que ocasionaba que, en alguno de los puntos en los que se realizó el rebote del martillo, la viga se tendía a mover o a desplazar un poco, este movimiento, vibración o desplazamiento corresponde a energía del impacto liberada, por lo que las lecturas del equipo pueden verse afectadas. Es importante mencionar que la norma ASTM C805, especifica el ensayo debe de realizarse sobre un elemento de concreto fijo.

No hay que dejar de lado que no necesariamente la resistencia de los cilindros representa la resistencia real de las vigas, esto debido a que el proceso de curado fue diferente para estos elementos, Solís y Moreno (2005) realizaron un estudio donde pretendían determinar la influencia del curado húmedo en comparación a al curado al aire, en el cual no encontraron diferencias significativas entre los resultados a compresión de elementos curados en diferentes condiciones de humedad. Sin embargo, Lizarazo, Sala y Escoba (2016) en un estudio sobre los efectos del curado de mezclas de concreto, determinaron que la condición de humedad del curado de los elementos del concreto afecta su resistencia. Orozco, Avila, Restrepo y Parody (2018) mencionan que algunos de los factores que afectan la calidad del concreto en términos del curado pueden ser el método, los materiales la mano de obra y el medio ambiente. Sin embargo, para determinar si la resistencia a compresión determinada por medio del esclerómetro se aproxima a la resistencia real de las vigas de concreto reforzado, es necesario realizar más ensayos.

Resistencia a la tensión (MR).

En la figura 59 se muestra el módulo de rotura del concreto para las dos mezclas realizadas, en donde se puede apreciar que la diferencia entre ambas mezclas es de 0.2 MPa, además, en comparación con su resistencia a la compresión, los módulos de rotura obtenidos son de 14.1% y 13.3% del f_c del concreto. Rivera (2019) expresa que ha realizado correlaciones entre el módulo de rotura y la resistencia a la compresión, y ha concluido que el módulo de rotura presenta valores que van desde el 10% hasta el 20% de la resistencia a la compresión del mismo concreto. Lo que respalda los datos obtenidos, ya que ambos son superiores al 10% y se encuentran en el rango determinado por Rivera.

Silva, Pavón, Hernández, Cárdenas y Padilla (2013), en un estudio sobre la relación de la resistencia a la compresión el módulo de rotura del concreto hidráulico mencionan que la consistencia de la mezcla es un factor que puede alterar el módulo de rotura, ya que esta está ligada a la cantidad de agua. Esto último puede justificar la diferencia existente entre ambos módulos de rotura, debido a que el asentamiento de ambas mezclas fue ligeramente diferente y esto se debió a que las mezclas se realizaron a diferentes fechas, con diferentes temperaturas ambientales y correcciones de humedad diferentes, por lo que la cantidad de agua agregada a cada una varió.

Análisis con el equipo GPR

En las figuras 60, 61, 62 y 63 se presentan los escáneres realizados de manera longitudinal a todas las vigas de concreto reforzado, el objetivo principal de este análisis fue corroborar que la distancia de los aros fuera igual a la estimada en el diseño de acero por cortante.

En las cuatro figuras se puede apreciar con claridad la separación existente entre los aros, y en todos los casos ningún aro se separa de otro en más de 10.6 cm, lo cual está por encima de lo planificado, sin embargo, aun así, se encuentra por debajo de lo determinado en el diseño, ya que este solicitaba aros a cada 10,75 cm como máximo.

A pesar de que a simple vista todas las distribuciones parecen correctas, en el escáner longitudinal de la viga híbrida 02, que se muestra en la figura 63, se puede observar como las separaciones tienden a variar constantemente y la magnitud de la detección del acero también varía, lo que significa que las profundidades del acero no

son constantes a lo largo de la estructura. Esto se puede deber a que esta fue la primera armadura elaborada y no se tenía práctica alguna en realizar aros y amarres, a tal punto que la construcción de esta armadura, duró el doble de lo que duró la última armadura y cuando se compararon los aros realizados al inicio a los elaborados el final de todo el proceso, la diferencia de calidad de los dobleces, apego a las dimensiones establecidas y rectitud de los aros era evidente.

Cómo se va a mencionar más adelante, la falla de esta viga fue provocada por cortante y no por flexión como se tenía previsto, esta es la justificación de mayor peso que permite dar a conocer que los aros no se encontraban bien elaborados y posicionados.

Posterior a la falla, se volvió a realizar un análisis GPR en el sitio específico donde se generó la grieta por cortante, esta vez el análisis fue de área, para poder visualizar de una mejor manera el interior de la viga, a continuación, se muestra el escáner.

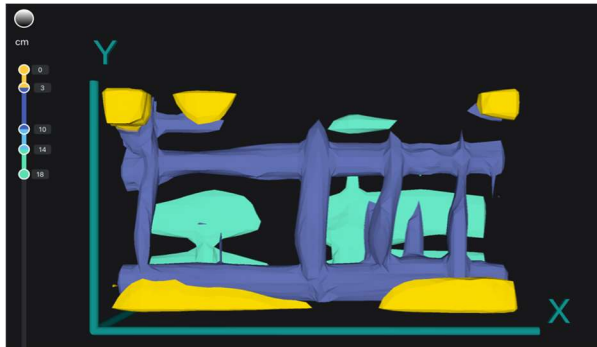


Figura 72. Análisis de área GPR en la zona de falla por cortante viga de concreto.

En la imagen se puede apreciar la existencia de aros con cierta inclinación, lo que produce que la separación en la parte superior y la inferior no sean iguales, esto no se puede notar en análisis lineales en un solo punto, ya que los que se muestran en las figuras 60, 61, 62 y 63 fueron realizados a lo largo de la viga, pero únicamente en el centro del peralte, por lo que no se podía verificar si la separación superior y la separación inferior diferían. Para determinar esto, se debe realizar los análisis lineales tanto en los laterales de la viga como en la superficie inferior y superior.

Ensayos a flexión de las vigas de concreto reforzado

Una vez que se contó con los datos de carga, desplazamiento en el centro del claro, deformaciones unitarias en la parte superior e inferior de las vigas y registro en video del avance de las grietas, productos del ensayo a flexión de las vigas de concreto reforzado, fue posible elaborar gráficos y diagramas para comparar el comportamiento de ambas vigas.

En la figura 64 se muestra el gráfico de momento curvatura experimental elaborado con los datos de deformaciones unitarias en la parte superior e inferior del centro del claro, además, se muestra el gráfico de momento curvatura teórico de la viga patrón, elaborado a partir del software ETABS (2019).

Primeramente, se puede apreciar como el diagrama de la viga patrón se encuentra en medio de los diagramas de las dos vigas patrón experimentales, lo que puede dar una idea de qué los resultados experimentales se aproximan a los teóricos. Además, en comparación con las vigas patrón y las vigas híbridas, se puede notar como estas últimas tienen una pendiente menor a las vigas reforzadas únicamente con acero. Lo que significa que, con un menor momento, estas vigas tendieron a curvarse más.

Es rescatable mencionar que, en algunos puntos de la gráfica experimental, se ve que la pendiente es interrumpida por una pequeña horizontalidad, lo que según McCormac (2011), puede significar el inicio del agrietamiento en la zona de tensión.

Sin embargo, no se pueden obtener mayores conclusiones de este gráfico debido a que los datos obtenidos por medio de las galgas fueron muy limitados, de hecho, en algunos casos, no se registraron valores de deformaciones unitarias ni siquiera en el rango elástico o se reportaron valores que no tenían congruencia con la deformación que debía medir.

En los casos en los que existían vacíos de datos de deformaciones unitarias y se identificaba que aún correspondían al rango elástico, se realizaba una simetría con la medición contraria, sin embargo, en algunos casos existían vacíos de datos tanto en las deformaciones unitarias de la zona de tensión como en la de compresión.

Continuando con el análisis de los resultados del ensayo a flexión de las vigas, se muestra en la figura 65, el gráfico de carga versus deflexión de las vigas reforzadas. Es importante mencionar que la viga híbrida 2, presenta un comportamiento diferente a su compañera a partir

de los 30 mm de deflexión, esto se debe a que la viga sufrió una falla por cortante antes de llegar a su capacidad máxima por flexión.

A simple vista se puede observar como las vigas patrón y las vigas híbridas tienen un comportamiento notablemente diferente, inicialmente, las cuatro vigas tienen una misma pendiente hasta alcanzar unos 1600 kg, esto se debe a que en esta etapa de carga, tanto el concreto como el acero están resistiendo los esfuerzos a tensión, y justamente cuando los esfuerzos de tracción superan el módulo de rotura del concreto, la resistencia en este punto empieza a depender del acero en el caso de la viga patrón y del acero-PRFV en el caso de las vigas híbridas, Según lo menciona McCormac (2011), Es en este momento que se inicia el agrietamiento de la viga, debido a que la resistencia a la tensión del concreto fue sobrepasada.

A partir de este punto, las pendientes varían considerablemente, la de las vigas de acero es evidentemente mayor que la de las vigas híbrida, (González et al.,2013) menciona que después de la aparición de las grietas, el comportamiento de la viga deja de ser elástico y las deflexiones dejan de ser proporcionales a las cargas, además, comenta que este punto se desarrolla hasta que el acero alcanza su valor de fluencia. En el caso de las vigas reforzadas únicamente con acero se puede observar el comportamiento esperado, tal como el mostrado en la figura 10 y lo mencionado previamente por Gonzales et al., donde después de la zona elástica, se desarrolla una zona de agrietamiento y seguidamente entra en la zona de fluencia del acero y a partir de este punto, disminuye gradualmente producto del aplastamiento del concreto.

En el caso de las vigas híbridas, el comportamiento tiende a ser similar, sin embargo se omite por completo la zona de fluencia, se puede observar como después de la zona elástica se desarrolla la zona de agrietamiento hasta llegar al punto del aplastamiento del concreto, sin embargo, la disminución de la resistencia no es gradual, como se observa en la gráfica de la viga híbrida 1, justo al terminar la zona de agrietamiento, la curva presenta una caída, luego recupera su resistencia y vuelve a caer abruptamente.

Cada una de estas caídas de resistencia mencionadas, corresponde al final del estado de fluencia de las barras de acero que componen la

viga híbrida, o sea, su rotura, sin embargo, a pesar de que la barra de PRFV no llegó a su rotura, el elemento no sigue aportando resistencia ya que se encuentra en la etapa de aplastamiento por concreto, por lo que, al continuar con el ensayo, la viga presentó una caída de resistencia de la que no se recupera.

El hecho de que se llegara a la rotura de las barras de acero y no a la de PRFV, se debe a las dimensiones de las varillas y a la propiedad mecánica del material, ya que la elongación elástica del polímero es mayor inclusive a la elongación plástica del acero, lo que produce que mientras se desarrolla la etapa elástica del polímero, el acero desarrolla por completo su etapa elástica y plástica. Se debe mencionar que, en este caso en específico sucede debido a que las varillas de acero del refuerzo híbrido son varillas No.2, mientras que la barra de PRFV es No.4, y si observamos la gráfica comparativa del esfuerzo deformación del acero y el PRFV mostrado en la figura 7, se puede observar que en porcentaje de deformación unitaria para probetas iguales, el polímero alcanza en su punto de rotura un 2%, mientras que el acero a pesar de resistir un menor esfuerzo, supera el 3% de deformación en su punto de rotura.

También se puede observar que la viga híbrida 2, a pesar de tener un comportamiento similar a su compañera al menos antes de la falla, se encuentra desplazada hacia abajo, lo que puede significar que el concreto en tensión no desarrolló la misma resistencia que su pareja, es por esto que el cambio de pendiente se presenta aproximadamente a los 1200 kg y no a los 1600 kg como lo hacen las otras tres vigas, además, puede notarse en el cuadro 16, en el cual se tabularon los valores de momento en el cual se observó el primer agrietamiento, y presenta el mismo comportamiento descrito anteriormente.

Esta deficiencia en el módulo de rotura del concreto puede deberse al proceso de curado, que, a pesar de ser iguales de sus compañeras, esta viga presentó algunas fisuras por contracción plástica que fueron apreciadas aproximadamente a las 18 horas de haber sido colada, sin embargo, estas fisuras se observaron en la parte superior de la viga y no se detectaron en la parte inferior, por lo que no se puede asegurar que tenga relación.

Con respecto a la carga máxima alcanzada por las vigas, se puede observar la figura 67, la cual recolecta el valor máximo obtenido de las gráficas anteriormente

mencionadas, además se le adjuntan las cargas máximas calculadas por medio de metodologías de análisis de vigas y la carga máxima obtenida por medio del software de elemento finito Abaqus.

Tanto en el caso de la configuración de acero, como en la configuración híbrida, el valor máximo resulta ser para la carga obtenida mediante la modelación de elementos finitos. Con respecto al valor mínimo, en el caso de la configuración de acero lo tienen las vigas obtenidas de manera experimental mediante el ensayo de flexión, y en el caso de la configuración híbrida, se obtiene el menor valor mediante el cálculo basado en una metodología. Tomando como referencia de comparación el valor de resistencia máxima determinado mediante el cálculo de diseño y análisis, se muestran las diferencias porcentuales en comparación con los máximos obtenidos mediante el modelado de elemento finito y el obtenido de manera experimental.

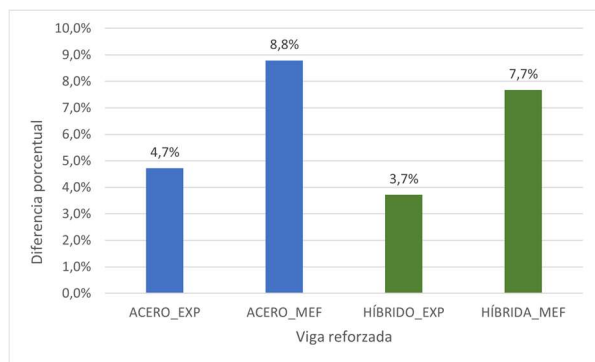


Figura 73. Diferencias porcentuales entre máximos simulados y ensayos en referencia a magnitudes máximas calculadas.

Como se puede notar, para las vigas de acero, las diferencias de los cálculos de carga máxima varían entre un 4.7% a un 8.8%, mientras que el rango de variación entre los valores de carga para las vigas híbridas varía desde un 3,7% a un 7.7%. De estos valores se puede apreciar que los métodos de estimación se aproximan lo suficiente para ser confiables, sin embargo, esto es no representativo ya que la matriz de evaluación de métodos es muy pequeña.

Con respecto al tema de la deflexión, las vigas de acero obtuvieron una deflexión en su carga máxima de 25,54 mm y de 18,54 mm y para las vigas 1 y 2 respectivamente, mientras que, para las vigas híbridas, la deflexión en su carga máxima fue de 37,57 mm y de 30,22 mm para las vigas 1 y 2 respectivamente. En el caso de las

vigas de elementos finitos, la viga con armadura de acero tuvo una deflexión en su carga máxima de 13,29 mm, mientras que la viga híbrida obtuvo un valor de 39,20mm.

Evidentemente la viga con el refuerzo híbrido obtiene los valores de deflexión más altos cuando se compara con una viga con refuerzo de acero tradicional.

En la figura 68, se muestra el diagrama de agrietamiento para cada una de las vigas, se puede observar como para las dos vigas híbridas el agrietamiento es mayor que para las vigas con configuración únicamente de acero, además, esto los respalda los diagramas de daño obtenidos por medio de la modelación de elementos finitos, que como se puede ver evidentemente, se repite el mismo comportamiento, es importante mencionar que los diagramas se extrajeron justo en el momento en el que la vida llegó a su carga máxima. Además, con respecto a los diagramas obtenidos mediante modelación, se observan que las grietas suelen ser completamente verticales en la mayoría de los casos, sin embargo, esto se debe a el tamaño del mallado para realizar el análisis, conforme se aumente el mallado, o sea, se disminuya las dimensiones de cada cubo de análisis, se pueden obtener resultados más precisos, y visualmente más representativos. Dado que esta condición depende de los recursos computacionales con los que se cuente, no se pudieron realizar las modulaciones con dimensiones menores de la malla.

Aparte de las grietas laterales que se pueden observar, las vigas híbridas presentaron grietas completamente longitudinales en las caras inferiores de las vigas, condición que no sucedió en las vigas con configuración de únicamente acero. Este comportamiento se muestra en la siguiente figura.



Figura 74. Agrietamiento longitudinal presentado en la cara inferior de las vigas híbridas

Este agrietamiento se presenta debido al tipo de adherencia que se genera entre la barra de PRFV y el concreto, esto fue posible comprobarlo debido al experimento alternativo al pull-out realizado tanto con el acero como con el polímero, donde, cómo se puede observar en la figura 71 los esfuerzos necesarios para extraer las barras del concreto son similares tanto en las varillas de acero con las barras de polímero, aun variando las longitudes embebidas, sin embargo, como se puede observar en la siguiente figura, la extracción del polímero daña prácticamente en su totalidad el concreto que la envuelve, mientras que el acero no genera ningún daño en el concreto visible.



Figura 75. Daño del concreto en el ensayo comparativo de adherencia

El Comité 224 (2001, reprobado en 2008) del ACI, especifica mediante una tabla, anchos permisibles de grietas según la condición en la cual se encuentren los miembros de concreto, la condición en la que permite espesores de grietas más grandes, es en los elementos de concreto que se encuentran al aire seco con un ancho permisible máximo de 0,41 mm. Éste último valor se utilizó como referencia para determinar la carga en la que aparecieran grietas con este grosor, en el caso de la viga con refuerzo únicamente de acero, la grieta hizo su aparición cuando la viga tenía carga aproximadamente de 8000 kg, mientras que en el caso de la viga con refuerzo híbrido, la grieta de 0,41 mm hizo su aparición aproximadamente a los 3700 kg. Por lo tanto, la viga de concreto con refuerzo híbrido dejó de ser permisible en términos de grietas aproximadamente al 45% de su carga total, mientras que la viga con refuerzo de acero dejó de ser permisible en término de grietas una vez que había sobrepasado el 90% de su carga total.

Conclusiones

- No fue posible obtener las características de esfuerzo máximo de tensión de las barras poliméricas de fibra de vidrio debido a la falta de equipo para su ensayo. No obstante, se obtuvieron valores que permitieron estimar la elongación en el rango plástico y ser comparado con el de las varillas de acero.
- Se determinaron los esfuerzos de fluencia y máximos de tracción de las barras No.2, No.3 y No.4 de acero, los cuales catalogan las varillas como grado 40, grado 60 y grado 40 respectivamente. Con estos datos se realizaron las modelaciones y los cálculos teóricos de las capacidades de las vigas de concreto reforzado.
- Se determinó la resistencia a la compresión por medio de falla de cilindros, obteniendo valores con una diferencia del 9,7% con el propuesto según el diseño de mezcla del ACI 211.
- Se obtuvo una resistencia a tensión del concreto (módulo de rotura) con valores de 14,1% y 13,3% de la resistencia a la compresión para las mezclas de vigas reforzadas con acero y vigas reforzadas de manera híbrida respectivamente.
- Mediante un análisis de GPR se visualizó la distribución de los aros en las vigas de concreto reforzado, donde se lograron observar anomalías en una de las vigas de refuerzo híbrido.
- Mediante un gráfico de momento curvatura se determinó que las vigas con reforzamiento híbrido tienden a ser más dúctiles que las vigas con reforzamiento de acero. Sin embargo, no se lograron obtener datos completos ni siquiera en el rango elástico debido a fallos que surgieron en las galgas extensiométricas.
- A partir de los gráficos de carga contra deflexión, se encontró que las vigas de acero tienen una menor deflexión cuando se alcanza su carga máxima en comparación con las vigas con reforzamiento híbrido, aproximadamente deflexiones de un 75% menos en el punto de carga máxima.
- Mediante la modelación de las vigas de concreto reforzado en el software de elementos finitos Abaqus, se obtuvieron cargas máximas de resistencia de las vigas reforzadas con diferencias porcentuales de 3,9 con respecto a la carga máxima obtenida de manera experimental para la media de ambas vigas.
- Se determinó de manera experimental que las vigas de reforzamiento híbrido tienen un agrietamiento final mayor que las vigas de concreto reforzado con acero.
- El agrietamiento en las vigas híbridas se dio mucho más temprano que el de las vigas de acero, obteniendo grietas no permisibles según el criterio del ACI después del 50% de su capacidad máxima, mientras que las grietas no permisibles en las vigas con reforzamiento de acero aparecieron después del 90% de su capacidad máxima.
- Las vigas con reforzamiento híbrido sufrieron agrietamientos longitudinales en la cara inferior del elemento, mientras que las vigas con refuerzo de acero no.
- Mediante la modelación de las vigas en el software de elementos finitos, se respaldó que las vigas con reforzamiento híbrido sufren de un agrietamiento mayor, además de más temprano.

Recomendaciones.

- Aumentar la matriz de evaluación de elementos, mediante la adición de vigas de concreto reforzadas únicamente con PRFV.
- Adquirir el equipo de confinamiento de las barras de PRFV utilizado durante la falla a tracción, para obtener el valor experimental de esfuerzo máximo de tensión.
- Adquirir el equipo necesario para la determinación del módulo experimental de elasticidad tanto para las varillas de acero como para las barras poliméricas, ya que este valor es importante para la determinación de resistencias teórica y modelado.
- Analizar mediante microscopía la barra de PRFV después de la falla para observar el daño con detalle.
- Utilizar equipos de medición de deformaciones unitarias adecuados, ya que los utilizados únicamente funcionan para la medición en el rango elástico, y en algunos casos, no se logró obtener mediciones ni este rango.
- Fabricar los aros mediante un equipo para este fin, ya que en esta ocasión fueron doblados mediante una maquina manual elaborada de manera artesanal, por lo que no se respetaron las dimensiones exactas para todos los aros.
- Tomar en cuenta la cantidad de operadores necesarios para realizar las coladas de concreto, ya que para uno solo resulta ser un trabajo difícil y los últimos elementos se colaron sobre el tiempo límite.
- Evaluar la afectación del desarrollo de resistencia de los elementos de concretos colados mediante humedecimiento y pasticos en comparación con los colados en cuarto húmedo.
- Si se desea utilizar el mismo método de curado, tener constancia con el humedecimiento y la cobertura de las vigas para evitar fusilamientos por contracción.
- Aumentar la matriz de especímenes para el control de la calidad del concreto, con el fin de obtener valores más representativos, y además, poder utilizar métodos normados para comparar diferentes mezclas de concreto.
- Realizar análisis GPR con análisis de mayor cobertura, que permitan observar la totalidad o la mayoría de las varillas y no solo un punto en específico.
- Determinar la uniformidad de la resistencia a la compresión a lo largo de las vigas reforzadas con ayuda del esclerómetro.

Apéndices

Apéndice 1: Caracterización del agregado fino

Granulometría

Masas de referencia			
Masa seca (g):	369,27	Masa seca lavada (g):	349,9

Tamiz N°	Abertura (mm)	Masa retenida 1 (g)	Masa retenida 2 (g)	Diferencia (%)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasando	Limite 1	Limite 2
Tamiz N°	Abertura (mm)	M retenida (g)	M ret. suficien (g)	Diferencia (%)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasando	% Pasando	% Pasando
3/8"	9,52	1,92	1,92	0,00	0,52	0,52	99,48	100,00	-
4	4,76	17,48	17,33	0,86	4,69	5,21	94,79	95,00	100,00
8	2,38	55,22	55,10	0,22	14,92	20,13	79,87	80,00	100,00
16	1,19	84,19	83,75	0,52	22,68	42,81	57,19	50,00	85,00
30	0,59	70,70	70,02	0,96	18,96	61,78	38,22	25,00	60,00
50	0,29	68,38	68,07	0,45	18,43	80,21	19,79	3,00	30,00
100	0,14	40,10	40,02	0,20	10,84	91,05	8,95	0,00	10,00
200	0,07	13,16	13,03	0,99	3,53	94,58	5,42	0,00	3,00
CH	CH	1,60	1,60	0,00	0,43	95,01			
TOTAL		352,75	350,84			295,98			

Modulo de finura: 3,0
 % del error de ensayo 0,27%

Gravedad específica y absorción.

Simbología	
A =	Masa de la muestra de ensayo seca al horno, g.
B =	Masa del picnómetro lleno con agua hasta la marca de calibración, g.
C =	Masa del picnómetro lleno con la muestra de ensayo y agua hasta la marca de calibración, g.
S =	Masa de la muestra de ensayo, saturada de superficie seca, g.

A =	471,08	g
B =	676,60	g
C =	974,30	g
S =	496,55	g

$$\text{Densidad relativa (s)} = A / (B + S - C)$$

$$\text{Densidad relativa (s)} = 2,37$$

$$\text{Densidad relativa (sss)} = S / (B + S - C)$$

$$\text{Densidad relativa (sss)} = 2,50$$

$$\text{Densidad relat. aparente} = A / (B + A - C)$$

$$\text{Densidad relat. aparente} = 2,72$$

$$\text{Absorción} = 5,4\%$$

Peso unitario

Volumen de recipiente (cm ³)		2791	
Volumen de recipiente (m ³)		0,002791	
Masa suelta (g)	PU.suelto (kg/m³)	Masa compactada (g)	PU.comp (kg/m³)
6963,5	1560	7393,9	1714
6987,7	1569	7422,2	1724
PROMEDIO	1565	PROMEDIO	1719

Apéndice 2: Caracterización del agregado grueso.

Granulometría

Masas de referencia			
Masa seca (g):	2099,1	Masa seca lavada (g):	2099,1

Tamiz N°	Abertura (mm)	Masa retenida 1 (g)	Masa retenida 2 (g)	Diferencia (%)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasando	Limites sup	Limites inf
Tamiz N°	Abertura (mm)	M retenida (g)	M ret. suficien (g)	Diferencia (%)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasando	% Pasando	% Pasando
1/2"	12,700	6,30	6,30	0,00	0,30	0,30	99,70	100,00	100,00
3/8"	9,525	212,20	212,20	0,00	10,11	10,41	89,59	85,00	100,00
4	4,760	1644,30	1637,90	0,39	78,03	88,44	11,56	10,00	30,00
8	2,380	145,40	144,20	0,83	6,87	95,31	4,69	0,00	5,00
CH	CH	105,30	105,30	0,00	5,02	100,32	0,32		
TOTAL		2113,50	2105,90			294,78			

CLASIFICACIÓN	Quintilla
% del error de ensayo	0,3%

Gravedad específica y absorción.

Simbología	
A =	Masa de la muestra de ensayo, seca al horno (s), en el aire, g.
B =	Masa de la muestra de ensayo, saturada de superficie seca (sss) en el aire, g.
C =	Masa aparente de la muestra de ensayo saturada en el agua, g.

A =	1922,7	g
B =	1959,50	g
C =	1226,7	g

Densidad relativa (s) = $A / (B - C)$

Densidad relativa (s) = 2,62

Densidad relativa (sss) = $B / (B - C)$

Densidad relativa (sss) = 2,67

Densidad relat. aparente = $A / (A - C)$

Densidad relat. aparente = 2,76

Absorción = 1,9%

Peso unitario

Volumen de recipiente (cm ³)		2791	
Volumen de recipiente (m ³)		0,002791	
Masa suelta (g)	PU.suelto (kg/m³)	Masa compactada (g)	PU.comp (kg/m³)
6690,1	1462	6926,7	1547
6719,3	1472	6933	1548
PROMEDIO	1467	PROMEDIO	1548

Apéndice 3: Resistencia a la compresión de los especímenes de concreto

Diseño de mezcla 1.

Temperatura (C)	Asentamiento (mm)
24,2	70,0

Código D.M	Edad (días)	Diámetro (mm)	Area (mm ²)	Carga (kn)	Esfuerzo (MPa)
D-CC-210-01	9	100,80	7980,10	120,70	15,13
D-CC-210-02	9	100,60	7948,50	154,20	19,40
D-CC-210-03	14	100,10	7869,70	132,20	16,80
D-CC-210-04	14	100,10	7869,70	138,20	17,56
D-CC-210-05	28	100,42	7920,10	167,70	21,17
D-CC-210-06	28	100,23	7890,20	148,50	18,82

Diseño de mezcla 2.

Temperatura (C)	Asentamiento (mm)
25,6	95,6

Código D.M	Edad (días)	Diámetro (mm)	Area (mm ²)	Carga (kn)	Esfuerzo (MPa)
D-CC-210-02	7	100,38	7913,80	129,20	16,33
D-CC-210-02	7	100,42	7920,10	121,00	15,27
D-CC-210-02	14	100,17	7880,70	159,40	20,22
D-CC-210-02	14	100,39	7915,40	156,30	19,75
D-CC-210-02	28	100,44	7923,20	195,30	24,65
D-CC-210-02	28	100,41	7918,50	202,80	25,60

Mezcla de las vigas reforzadas con acero únicamente.

Temperatura (C)	Asentamiento (mm)
22,5	93,5

Código D.M	Edad (días)	Diámetro (mm)	Area (mm ²)	Carga (kn)	Esfuerzo (MPa)
M-RA-01	7	153,02	18390,20	269,60	14,66
M-RA-02	7	152,05	18157,80	241,20	13,28
M-RA-03	7	151,91	18124,40	257,70	14,22
M-RA-04	14	154,4	18723,40	386,10	20,62
M-RA-05	14	153,8	18578,20	351,80	18,94
M-RA-06	14	151,405	18004,10	332,80	18,48
M-RA-07	28	153,8	18578,20	489,80	26,36
M-RA-08	28	151,95	18133,90	461,70	25,46
M-RA-09	28	153,6	18529,90	464,90	25,09

Mezcla de las vigas reforzadas de manera híbrida acero-PRFV

Temperatura (C)	Asentamiento (mm)
25,9	86,8

Código D.M	Edad (días)	Diámetro (mm)	Area (mm ²)	Carga (kn)	Esfuerzo (MPa)
M-RH-01	7	152,25	18205,60	254,90	14,00
M-RH-02	7	151,95	18133,90	256,60	14,15
M-RH-03	7	152,05	18157,80	259,50	14,29
M-RH-04	14	153,4	18481,60	343,60	18,59
M-RH-05	14	151,85	18110,00	362,80	20,03
M-RH-06	14	153,9	18602,30	372,10	20,00
M-RH-07	28	151,95	18133,90	456,20	25,16
M-RH-08	28	153,55	18517,80	465,90	25,16
M-RH-09	28	151,85	18110,00	480,30	26,52

Resistencia de cilindros de concreto para ambas muestras con datos descartados para cumplimiento de calidad.

Código D.M	Edad (días)	Diametro (mm)	Area (mm ²)	Carga (kn)	Esfuerzo (MPa)
M-RA-01	7	153,02	18390,2	269,6	14,66
M-RA-03	7	151,91	18124,4	257,7	14,22
M-RA-05	14	153,8	18578,2	351,8	18,94
M-RA-06	14	151,405	18004,1	332,8	18,48
M-RA-08	28	151,95	18133,9	461,7	25,46
M-RA-09	28	153,6	18529,9	464,9	25,09
M-RH-01	7	152,25	18205,6	254,9	14,00
M-RH-02	7	151,95	18133,9	256,6	14,15
M-RH-03	7	152,05	18157,8	259,5	14,29
M-RH-05	14	151,85	18110,0	362,8	20,03
M-RH-06	14	153,9	18602,3	372,1	20,00
M-RH-07	28	151,95	18133,9	456,2	25,16
M-RH-08	28	153,55	18517,8	465,9	25,16

Apéndice 4. Resistencia a la tensión de los especímenes de concreto

Mezcla de las vigas reforzadas con acero únicamente.

Identificación	Peralte (mm)	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)	Fractura NR (mm)	Carga (kn)	Esfuerzo (MPa)
RA-V1	150,42	604,00	153,31	23060,90	18,50	28,30	3,67
RA-V2	152,24	605,80	151,97	23135,20	43,10	25,74	3,29
RA-V3	151,60	605,00	151,96	23036,40	31,50	29,98	3,86

Mezcla de las vigas reforzadas de manera híbrida acero-PRFV

Identificación	Peralte (mm)	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)	Fractura NR (mm)	Carga (kn)	Esfuerzo (MPa)
RH-V1	150,91	603,80	153,14	23109,60	17,30	27,27	3,52
RH-V2	151,24	606,00	152,315	23036,10	17,50	25,31	3,27
RH-V3	151,48	604,90	150,465	22792,40	28,70	26,29	3,43

Apéndice 5. Caracterización de las varillas de acero y de las barras de PRFV

Varilla No.2

Dimensiones Varilla corrugada No.2						
Muestra	Diámetro (mm)	Diámetro promedio (mm)	Longitud libre inicial (mm)	Longitud libre final (mm)	Elongación (mm)	Elongación (%)
N2-1	5,16	5,17	200,00	210,80	10,80	5,38%
	5,25					
	5,1					
N2-2	5,19	5,15	200,00	210,50	10,50	5,23%
	5,13					
	5,12					
N2-3	5,3	5,23	200,00	210,10	10,10	5,07%
	5,25					
	5,14					

Propiedades Varilla corrugada No.2							
Muestra	Área promedio (cm ²)	Fuerza de fluencia (kg)	Fuerza fluencia promedio (kg)	Esfuerzo fluencia promedio (kg/cm ²)	Fuerza rotura (kg)	Fuerza rotura promedio (kg)	Esfuerzo rotura promedio (kg/cm ²)
N2-1	0,210	1028	1027	4869	1079	1093	5182
N2-2	0,208	1019			1114		
N2-3	0,215	1034			1086		

Varilla No.3

Dimensiones Varilla corrugada No.3						
Muestra	Diámetro (mm)	Diámetro promedio (mm)	Longitud libre inicial (mm)	Longitud libre final (mm)	Elongación (mm)	Elongación (%)
N3-1	9,42	9,44	200,0	261,54	61,54	31%
	9,46					
	9,45					
N3-2	9,46	9,45	200,0	260,58	60,58	30%
	9,42					
	9,46					
N3-3	9,44	9,45	200,0	262,52	62,52	31%
	9,46					
	9,45					

Propiedades Varilla corrugada No.3							
Muestra	Área promedio (cm ²)	Fuerza de fluencia (kg)	Fuerza fluencia promedio (kg)	Esfuerzo fluencia promedio (kg/cm ²)	Fuerza rotura (kg)	Fuerza rotura promedio (kg)	Esfuerzo rotura promedio (kg/cm ²)
N2-1	0,70	2129	2084	2973	3177	3112	4440
N2-2	0,70	2046			3104		
N2-3	0,70	2077			3054		

Varilla No.4

Dimensiones Varilla corrugada No.4						
Muestra	Diámetro (mm)	Diámetro promedio (mm)	Longitud libre inicial (mm)	Longitud libre final (mm)	Elongación (mm)	Elongación (%)
N3-1	12,14	12,13	200,0	251,08	51,08	25,54%
	12,15					
	12,1					
N3-2	12,07	12,13	200,0	249,44	49,44	24,72%
	12,17					
	12,14					
N3-3	12,15	12,14	200,0	243,24	43,24	21,62%
	12,12					
	12,15					

Propiedades Varilla corrugada No.4							
Muestra	Área promedio (cm ²)	Fuerza de fluencia (kg)	Fuerza fluencia promedio (kg)	Esfuerzo fluencia promedio (kg/cm ²)	Fuerza rotura (kg)	Fuerza rotura promedio (kg)	Esfuerzo rotura promedio (kg/cm ²)
N2-1	1,16	5347	5326	4607	6807	6854	5929
N2-2	1,15	5314			6918		
N2-3	1,16	5318			6837		

No.4 PRFV.

Dimensiones Varilla PRFV No.4						
Muestra	Diámetro sección reducida (mm)	Diámetro promedio (mm)	Longitud libre inicial (mm)	Longitud libre final (mm)	Elongación (mm)	Elongación (%)
N4P-1	5,69	5,73	450,0	487,035	37,035	8,23%
	5,72					
	5,79					
N4P-2	5,67	5,68	450,0	485,55	35,55	7,90%
	5,71					
	5,69					

Propiedades Varilla corrugada No.4				
Muestra	Área promedio (cm ²)	Fuerza rotura (kg)	Fuerza rotura promedio (kg)	Esfuerzo rotura promedio (kg/cm ²)
N2-1	0,26	2094	2092	8179
N2-2	0,25	2090		

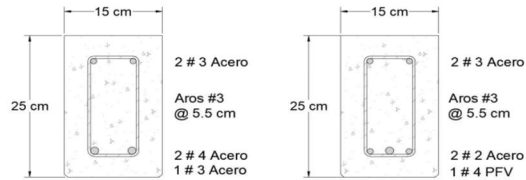
Apéndice 6. Dimensiones reales de las vigas de concreto reforzado.

Viga	Longitud (cm)	Peralte (mm)	Ancho (mm)	Peso (kg)
V_ACERO_1	190,5	255,4	168,4	177,0
V_ACERO_2	190,6	255,6	169,5	178,5
V_HIBRIDA_1	190,5	255,5	167,2	174,5
V_HIBRIDA_2	191,1	255,9	166,8	177,5

Apéndice 7. Memoria de cálculo de la capacidad de las vigas reforzadas y el diseño de acero trasversal.

Memoria de cálculo del análisis de capacidad de las secciones de la vigas de concreto reforzado con barras de acero y barras poliméricas

Las secciones que se analizan son las siguientes:



Sección 1. Todas las barras de acero

Sección 2. Barras #3-2 de acero y #4 de PRFV

-----Análisis de la sección 1 -----

Datos

$$\begin{aligned}
 b &:= 16,5 \text{ cm} & \text{Area\#2} &:= (0,237) \text{ cm}^2 & E_s &:= 2100000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} & f_y &:= 4594 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \\
 d' &:= 4 \text{ cm} & \text{Area\#3} &:= 0,71 \text{ cm}^2 & f'c &:= 256 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} & fy2 &:= 2971 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \\
 d &:= 21,5 \text{ cm} & \text{Area\#4} &:= 1,27 \text{ cm}^2 & & & &
 \end{aligned}$$

$$A_s := \text{Area\#4} \cdot 2 = 2,54 \text{ cm}^2$$

$$A'_s := \text{Area\#3} \cdot 2 = 1,42 \text{ cm}^2$$

$$B1 := 0,85$$

$$\rho_b := 0,85 \cdot \frac{f'c}{f_y} \cdot B1 \cdot \frac{E_s \cdot 0,003}{0,003 \cdot E_s + f_y} = 0,0233$$

$$\rho_{tension} := \frac{A_s}{d \cdot b} = 0,0072$$

$$\rho_b > \rho_{tension} = 1 \quad 1 = \text{verdadero}$$

Como $\rho_b > \rho_{tension}$ == Viga teoricamente SUB REFORZADA

$$a_1 := (A_s - A'_s) \cdot \frac{f_y}{0,85 \cdot f'c \cdot b} = 1,4331 \text{ cm}$$

$$\epsilon'_s := 0,003 \cdot \frac{B1 \cdot d' - a_1}{a_1} = 0,0041$$

$$\epsilon_s := 0,003 \cdot \frac{B1 \cdot d - a_1}{a_1} = 0,0353$$

1 / 6

$$\varepsilon_y := \frac{f_y}{E_s} = 0,0022$$

$$\varepsilon_s > \varepsilon_y = 1 \quad \varepsilon'_s > \varepsilon_y = 1$$

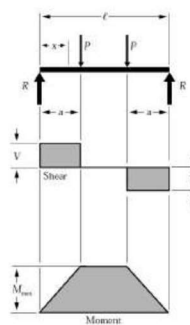
Suposición correcta: $\varepsilon_s > \varepsilon_y$ y $\varepsilon'_s > \varepsilon_y$

Cálculo del momento nominal

$$M_{nl} := 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a_l \cdot \left(d - \frac{a_l}{2} \right) + A'_s \cdot f_y \cdot (d - d') = 2211 \text{ kgf m}$$

$$M_{nl} = 2,2 \text{ m tonnef}$$

En base a la siguiente figura, se puede determinar la Fuerza P necesaria para alcanzar el Mn



$$\begin{aligned} R &= V \dots \dots \dots = P \\ M_{max} \text{ (between loads)} &\dots \dots \dots = Pa \\ M_x \text{ (when } x < a) &\dots \dots \dots = Px \\ \Delta_{max} \text{ (at center)} &\dots \dots \dots = \frac{Pa}{24EI} (3l^2 - 4a^2) \\ \Delta_x \text{ (when } x < a) &\dots \dots \dots = \frac{Px}{6EI} (3la - 3a^2 - x^2) \\ \Delta_x \text{ (when } x > a \text{ and } < (l-a)) &\dots \dots \dots = \frac{Pa}{6EI} (3lx - 3x^2 - a^2) \end{aligned}$$

Fuente. American Wood Council. 2005

$$M_{max} := P \cdot a$$

$$P := \frac{M_{max}}{a}$$

$$P_{nl} := \frac{M_{nl}}{0,55 \text{ m}} = 4 \text{ tonnef}$$

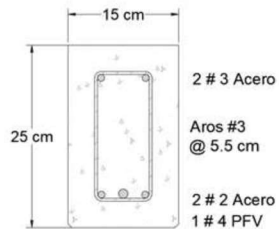
$$P_{nl} = 4 \text{ tonnef}$$

$$2 \cdot P_{nl} = 8,04 \text{ tonnef}$$

Por lo tanto, teóricamente, para llegar al momento máximo que soporta la viga, es necesario aplicar dos fuerza puntuales de 3.7 toneladas fuerza cada una, Aproximadamente 7.35 tonf totales necesarias para el fallo de la viga por flexión

-----Análisis de la sección 2 Mediante metodología del artículo Design Propositions for -----
 -----Hybrid FRP-Steel Reinforced Concrete Beams ASCE -----

Las características del acero y del concreto se mantienen igual a las de la sección 1



$$f'c = 256 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$b = 0,165 \text{ m}$$

$$f_{fu} := 1100 \text{ MPa}$$

$$d = 0,215 \text{ m}$$

$$E_f := 8700 \text{ ksi}$$

Cálculo de áreas de acero y polímero:

$$A_f := \text{Area}\#4 \cdot 1 = 1,27 \text{ cm}^2$$

$$A_f = 1,27 \text{ cm}^2$$

$$A_s := \text{Area}\#2 \cdot 2 = 0,474 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 0,474 \text{ cm}^2$$

$$\rho_f := \frac{A_f}{b \cdot d} = 0,0036$$

$$\rho_f = 0,0036$$

Dado que $f'c < 280$

$$B1 = 0,85$$

$$B1 = 0,85$$

$$\rho_{sf,s} := \frac{E_s \cdot A_s + E_f \cdot A_f}{E_s \cdot b \cdot d} = 0,0024$$

$$\rho_{sf,f} := \frac{f_y2 \cdot A_s + f_{fu} \cdot A_f}{f_{tu} \cdot b \cdot d} = 0,0039$$

$$\rho_{s,b} := 0,85 \cdot B1 \cdot \frac{f'c}{f_y2} \cdot \frac{E_s \cdot 0,003}{f_y2 + E_s \cdot 0,003} = 0,0423$$

$$\rho_{f,b} := 0,85 \cdot B1 \cdot \frac{f'c}{f_{fu}} \cdot \frac{E_f \cdot 0,003}{E_f \cdot 0,003 + f_{fu}} = 0,0023$$

$$\rho_s := \frac{A_s}{b \cdot d} = 0,0013$$

Table 1. Failure Modes of the Flexural Hybrid-RC Beams

Failure mode	Control material	Demanded reinforcement condition	Remarks
Concrete crushing, steel nonyielding, FRP nonrupturing	Concrete	$\rho_{sf,s} > \rho_{s,b}$	Inadmissible
Steel yielding, concrete crushing, FRP nonrupturing	Steel and concrete	$\rho_{sf,s} \leq \rho_{s,b}$ and $\rho_{sf,f} \geq \rho_{f,b}$	Permissible
Steel yielding, FRP rupturing, concrete noncrushing	FRP and steel bars	$\rho_{sf,f} < \rho_{f,b}$	Inadmissible

Fuente: Design Propositions for Hybrid FRP-Steel Reinforced Concrete Beams ASCE

$$1. \rho_{sf,s} > \rho_{s,b} = 0$$

$$2. \rho_{sf,s} \leq \rho_{s,b} = 1$$

$$\rho_{sf,f} \geq \rho_{f,b} = 1$$

Permissible

Fluencia del acero, aplastamiento del concreto y no ruptura FRP

$$3. \rho_{sf,f} < \rho_{f,b} = 0$$

Cálculo del estado límite último: Ecuación (5)

$$f_f := \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{A_s \cdot fy2}{A_f} + E_f \cdot 0,003 \right)^2 + \left(0,85 \cdot \frac{Bl \cdot f'c}{\rho_f} - \frac{A_s \cdot fy2}{A_f} \right) \cdot E_f \cdot 0,003} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{A_s \cdot fy2}{A_f} + E_f \cdot 0,003 \right) = 117,65 \text{ ksi}$$

$$f_f = 8272 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Determinación del momento maximo resistente: Ecuación (6)

$$M_{n2} := \left(\rho_f \cdot f_f + \rho_s \cdot fy2 \right) \cdot \left(1 - 0,59 \cdot \frac{\rho_f \cdot f_f + \rho_s \cdot fy2}{f'c} \right) \cdot b \cdot d^2 = 2,4 \text{ m tonnef}$$

$$M_{n2} = 2,4 \text{ m tonnef}$$

$$\rho_{sf,f} \geq 1,4 \cdot \rho_{f,b} = 1$$

$$M_{max} := P \cdot a$$

$$P := \frac{M_{max}}{a}$$

$$P_{n2} := \frac{M_{n2}}{0,55 \text{ m}} = 4,3 \text{ tonnef}$$

$$P_{n2} = 4,3 \text{ tonnef}$$

Por lo tanto, teóricamente, para llegar al momento máximo que soporta la viga, es necesario aplicar dos fuerza puntuales de 4.3 toneladas fuerza cada una, Aproximandose 8.6 toneladas fuerza totales necesarias para el fallo de la viga.

Memoria de calculo para la determinación de la distribución de aros en la armadura.

Dado que la resistencia teorica de la viga en terminos de carga total a aplicar distribuidas en 2 cargas puntuales es de 6.8 tonf, se realiza el diseño por cortante para soportar una carga total de 13 tonf, siendo esto un 90% más de la capacidad calculada.

Inicialmente se determina el valor de cortante de la viga, que es igual a la magnitud de cada fuerza aplicada

$$V_{u,maximo} := 4,3 \text{ tonnef}$$

Las condiciones del concreto y del acero se mantienen igual a los cálculos anteriores

$$f_{yv} := 4200 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad \lambda := \frac{1 \text{ kgf}}{\text{cm}^2}$$

Se determinan los valores límite de interes:

$$V_{s,máx} := 2,1 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d = 11,9 \text{ tonnef}$$

$$V_{s,1} := 1,1 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d = 6,2 \text{ tonnef}$$

$$V_{c,máx} := 1,33 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d = 7,5 \text{ tonnef}$$

Se diseña para la distancia "d", igual el valor maximo de V es constante.

$$V_{c,1} := (0,53 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'c}) \cdot b \cdot d = 3 \text{ tonnef}$$

$$V_{c,2} := \left(2,1 \cdot \rho_{tension} \frac{1}{3} \right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d = 2,3 \text{ tonnef}$$

Se selecciona el máximo de los calculados anteriormente:

$$\phi V_c := 0,75 \cdot \max \left(\begin{matrix} V_{c,1} \\ V_{c,2} \end{matrix} \right) = 2,3 \text{ tonnef}$$

$$V_{u,maximo} > \phi V_c = 1$$

1= Se deben colocar aros de refuerzo
0 = No son necesarios los aros de refuerzo

$$V_s := \frac{V_{u,maximo}}{0,75} - \max \left(\begin{matrix} V_{c,1} \\ V_{c,2} \end{matrix} \right) = 2,7 \text{ tonnef}$$

$$V_s < V_{s,máx} = 1$$

1= La sección es adecuada
0 = La sección no es adecuada, se debe modificar

$V_s > V_{s,r} = 0$ 1= Se deben reducir las separaciones máximas a la mitad
 0 = No se hacen cambios a las separaciones máximas

Propuesta de aros con varillas #3

$$S_{\text{varilla\#3}} := \frac{2 \cdot \text{Area\#3} \cdot f_{yv} \cdot d}{V_s} = 47 \text{ cm}$$

$$S_{\text{máxima}} := \min \left(\left[\begin{array}{c} \frac{d}{2} \\ 30 \text{ cm} \end{array} \right] \right) = 10,75 \text{ cm}$$

$$S_{\text{utilizar}} := \min \left(\left[\begin{array}{c} S_{\text{varilla\#3}} \\ S_{\text{máxima}} \end{array} \right] \right) = 10,75 \text{ cm}$$

$$S_{\text{máxima}} = 10,75 \text{ cm}$$

Por lo tanto, la separación máxima a utilizar es de 10,75 cm

Se utilizarán aros #3 @ 10 cm

Apéndice 8. Memoria de cálculo del diseño de mezcla de concreto.

1 - DATOS DE LABORATORIO-

$Modulo_finura_arena := 3,0$	$T_M_N := 12,5 \text{ mm}$
$Gsss_arena := 2,5$	$Gsss_grueso := 2,67$
$Gbs_arena := 2,37$	$Gbs_grueso := 2,62$
$Gs_arena := 2,72$	$Gs_grueso := 2,76$
$Peso_unit_suelto_arena := 1564 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$Peso_unit_suelto_grueso := 1467 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$Peso_unit_compact_arena := 1719 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$Peso_unit_compact_grueso := 1548 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$\%_absorcion_fino := 5,4 \%$	$\%_absorcion_grueso := 1,9 \%$
$Gbs_cemento := 3,01$	$\%W_fino := 2,99 \%$ $\%W_grueso := 0,6 \%$

2 - CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE MEZCLA-

$Asentamiento := 100 \text{ mm}$

$f'c := 210 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ $f'c = 20,594 \text{ MPa}$

Dado que $f'c$ es menor a 21 MPa, se utiliza un factor de seguridad para el $f'cr$ de 7.0 MPa

$f'cr := f'c + 7,0 \text{ MPa}$

$f'cr = 281 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ $f'cr = 27,594 \text{ MPa}$

3 - AGUA DE MEZCLA PARA UN METRO CÚBICO DE CONCRETO-

Según la tabla A1.5.3.3 (Requerimientos aproximados del agua de mezcla y el contenido de aire para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado) y considerando que el concreto no tiene aire incluido, se tiene que:

$Agua := 216 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ Para un asentamiento des 100mm y u T.M.N de 12.5mm $Vol_agua := 0,216 \text{ m}^3$

$Peso_agua := 216 \text{ kgf}$

4 - AIRE ATRAPADO EN MEZCLA PARA 1m³ DE CONCRETO -

$Aire := 2,5 \%$ $Vol_aire := 0,025 \text{ m}^3$

5 - DETERMINACION DE LA RELACION AGUA/CEMENTO A/C -

Según la tabla A1.5.3.4(a): Correspondencia entre la relación a/c y la resistencia a la compresión del concreto y considerando la resistencia a la compresión amplificada mediante el F.S y un concreto sin aire incluido se obtiene una relación a/c. Se debe interpolar entonces, para obtener una relación a/c que satisfaga las necesidades respecto a la resistencia a la compresión esperada.

Para este caso $Relacion_Agua_Cemento := 0,5837$

6 - DETERMINACION DEL CONTENIDO DE CEMENTO -

$$\text{Peso_Cemento} := \frac{\text{Peso_agua}}{\text{Relacion_Agua_Cemento}} = 370,1 \text{ kgf} \quad \text{Peso_Cemento} = 370,1 \text{ kgf}$$

$$\text{Vol_Cemento} := \frac{\text{Peso_Cemento}}{\text{Gbs_cemento} \cdot 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}} = 0,123 \text{ m}^3 \quad \text{Vol_Cemento} = 0,123 \text{ m}^3$$

7 - CANTIDAD DE AGREGADO GRUES PARA 1 m³ -

De acuerdo a la tabla A1.5.3.6: Volumen de agregado grueso seco y compactado por unidad de volumen de concreto pta diferentes módulos de finura de agregado fino, el volumen de agregado grueso seco y compactado por unidad de volumen de concreto es el siguiente:

$$\text{Modulo_finura_arena} = 3$$

$$T_M_N = 12,5 \text{ mm}$$

$$V_m := 0,53 \text{ m}^3 \quad \text{Para un metro cúbico de concreto.}$$

$$V_m = 0,53 \text{ m}^3$$

$$\gamma_B := \frac{\text{Peso_unit_compact_grueso}}{1 + 0} = 1548 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$P_s := \gamma_B \cdot V_m = 820,44 \text{ kg}$$

$$\text{Vol_grueso} := \frac{P_s}{\text{Gbs_grueso} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,31 \text{ m}^3 \quad \text{Para un metro cúbico de concreto.}$$

$$\text{Vol_grueso} = 0,3131 \text{ m}^3$$

8 - CANTIDAD DE AGREGADO FINO PARA 1 m³ -

Se obtiene de la diferencia entre 1 y la suma de todos los volúmenes como se muestra a continuación:

$$\text{Vol_fino} := 1 \text{ m}^3 - (\text{Vol_Cemento} + \text{Vol_aire} + \text{Vol_agua} + \text{Vol_grueso}) = 0,3229 \text{ m}^3$$

Resumen de los volúmenes de agregado.

$$\text{Vol_Cemento} = 0,1229 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol_aire} = 0,025 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol_agua} = 0,216 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol_grueso} = 0,3131 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol_fino} = 0,3229 \text{ m}^3$$

9 - PESOS ABSOLUTOS PARA 1 m³ -

$$Peso_fino := Gbs_arena \cdot Vol_fino \cdot 1000 \frac{kgf}{m^3}$$

$$Peso_grueso := Gbs_grueso \cdot Vol_grueso \cdot 1000 \frac{kgf}{m^3}$$

$$Peso_Cemento = 370,1 \text{ kgf}$$

$$Peso_agua = 216 \text{ kgf}$$

$$Peso_fino = 765,3 \text{ kgf}$$

$$Peso_grueso = 820,4 \text{ kgf}$$

10 - CORRECCION POR HUMEDAD -

Recordando que para el agregado fino: $\%W_{fino} = 2,99 \%$

Se determina el peso real:

$$Peso_{fino_real} := Peso_fino \cdot (1 + \%W_{fino})$$

$$Peso_{fino_real} = 788,1882 \text{ kgf}$$

$$Peso_{fino_real} = 788,1882 \text{ kgf}$$

Por lo que el aporte de agua será:

$$Aporte_de_agua_{fino} := Peso_{fino_real} \cdot (\%W_{fino} - \%_{absorcion_fino}) = -18,9953 \text{ kgf}$$

Seguidamente se repite el procedimiento para el agregado grueso:

Se determina el peso real:

$$Peso_{grueso_real} := Peso_grueso \cdot (1 + \%W_{grueso})$$

$$Peso_{grueso_real} = 825,3626 \text{ kgf}$$

Por lo que el aporte de agua será:

$$Aporte_de_agua_{grueso} := Peso_{grueso_real} \cdot (\%W_{grueso} - \%_{absorcion_grueso}) = -10,7297 \text{ kgf}$$

11 - DOSIFICACION FINAL -

$$\text{Peso_Cemento} = 370,0531 \text{ kgf}$$

$$\text{Peso_total_agua} := \text{Peso_agua} + |\text{Aporte_de_agua_fino}| + |\text{Aporte_de_agua_grueso}| = 245,7 \text{ kgf}$$

$$\text{Peso_total_fino} := \text{Peso_fino_real} = 788,1882 \text{ kgf}$$

$$\text{Peso_total_grueso} := \text{Peso_grueso_real} = 825,3626 \text{ kgf}$$

$$\text{Dosif_cemento} := \frac{\text{Peso_Cemento}}{\text{Peso_Cemento}} = 1$$

$$\text{Dosif_Arena} := \frac{\text{Peso_total_grueso}}{\text{Peso_Cemento}} = 2,23$$

$$\text{Dosif_piedra} := \frac{\text{Peso_total_fino}}{\text{Peso_Cemento}} = 2,13$$

$$\text{Dosif_agua} := \frac{\text{Peso_total_agua}}{\text{Peso_Cemento}} = 0,664$$

Anexos

Anexo 1. Ficha de especificaciones técnicas de las barras poliméricas de fibra de vidrio utilizadas



Product Data Sheet – V•ROD 60		#2 (6M)	#3 (10M)	#4 (12M)	#5 (15M)	#6 (20M)	#7 (22M)	#8 (25M)	#9 (30M)	#10 (32M)
Guaranteed tensile strength* (ASTM D7205)	MPa	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1000	1000
	ksi	159.5	159.5	159.5	159.5	159.5	159.5	159.5	145	145
Minimum tensile modulus (ASTM D7205)	GPa	60								
	ksi	8702.3								
Guaranteed transverse shear capacity (ASTM D7617)	MPa	180								
	ksi	26.1								
Resin		vinylester								
Weight	g/m	78	175	310	442	633	863	1127	1426	1761
	lb/ft	0.052	0.118	0.208	0.297	0.425	0.58	0.757	0.958	1.183
Effective cross-sectional area** (including sand coating) (CSA S806 Annex A)	mm ²	37.2	83.8	145	232.9	326.8	438.2	572.3	724.3	894.2
	in ²	0.058	0.130	0.225	0.361	0.507	0.679	0.887	1.123	1.386
Effective diameter	mm ²	6.9	10.33	13.59	17.22	20.39	23.6	26.99	30.4	33.7
	in ²	0.272	0.407	0.535	0.678	0.803	0.929	1.063	1.197	1.327
Nominal cross-sectional area (CSA S807 Table 1)	mm ²	32	71	129	199	284	387	510	645	819
	in ²	0.05	0.110	0.199	0.308	0.440	0.6	0.790	1	1.269

Available Anchor Heads

		#4 GFRP	#5 GFRP	#6 GFRP
Minimum pull-out strength	kN	80	100	100
	kips	18	22	22

Please refer to the V•ROD Grade III data sheet for the properties of the bars.
Product homologated for use in TLS barriers.

COMPLIES WITH THE FOLLOWING STANDARDS:

- GRADE III CSA S807-10
- GRADE III MTO ASTM D7957 D7957-17

* The nominal guaranteed tensile strength must not be used to calculate the strength of the bent portion of a bent bar. Instead use the minimum guaranteed tensile strength found in the technical data sheet of bent V•ROD bars.
** Please contact Pultrall for dowelling applications.
Development and splice length are available upon request but should be determined by the design engineer.
The guaranteed value presented in this document is the mean value minus 3 times the standard deviation.
It is the responsibility of the design engineers to contact the bar manufacturer to get the latest updates of this technical data sheet (also available at www.vrod.ca).
For any additional technical results or literature, please contact Pultrall.



700, 9^e Rue Nord, Thetford Mines (Quebec) CANADA G6G 6Z5
Phone: 418 335-3202 | Fax: 418 335-5117 | www.vrod.ca

Fuente: fiberglassrebar.com

Referencias

- ACI 211.1 Committee. (1991). ACI 211.1-91 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. Farmington Hills, MI, USA
- ACI Committee 318. (2014). "Building Code Requirements for Structural Concrete." ACI 318-14, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.
- ACI Committee 440. (2015). "Guide for the design and construction of concrete reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) bars." ACI 440.1R-15, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.
- ACI. (1999). Aggregates for concrete. American Concrete Institute, 1–26.
- American Society for Testing and Materials. 2015. ASTM C470: Standard Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically
- American Society for Testing and Materials. 2016. ASTM C192: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory
- American Society for Testing and Materials. 2016. ASTM D7205: Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars
- American Society for Testing and Materials. 2016. ASTM E4: Standard Practices for Force Verification of Testing Machines
- American Society for Testing and Materials. 2018. ASTM A370: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products
- American Society for Testing and Materials. 2018. ASTM C 39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- American Society for Testing and Materials. 2018. ASTM C78: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)
- ASTM. (2016). ASTM E178-16a Dealing With Outlying Observations. En ASTM International.
<https://doi.org/10.1520/E0178-16A.2>
- American Wood Council. (2005). Beam Formulas With Shear and Moment Diagrams. American Forest & Paper Association.
- Azevedo, A. C. L. de, Teixeira, A. M. A. J., & Carneiro, L. A. V. (2019). Flexural behavior of hybrid GFRP - concrete railway sleepers. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 12(4), 738-765. Epub September 23, 2019.
<https://doi.org/10.1590/s1983-41952019000400003>
- Barahona, M. & Collado, C. (2012). Diseño de cimbras de madera pino para elementos estructurales de un sistema constructivo vertical de concreto (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua). Recuperado de <https://repositorio.unan.edu.ni/4984/1/89641.pdf>

- Barreto Villanueva, A. (2012). El progreso de la Estadística y su utilidad en la evaluación del desarrollo. *Papeles de población*, (73), 241– 271. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=s1405-74252012000300010&script=sci_arttext
- Bitar, S. (2014). Las tendencias mundiales y el futuro de América Latina. México: CEPAL, Naciones Unidas.
- Carcaño, R. S., & Moreno, E. I. (2005). Influencia del curado húmedo en la resistencia a compresión del concreto en clima cálido subhúmedo. *Ingeniería*, 9(3), 5-17. Recuperado de <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen9/influencia.pdf>
- Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica. (s.f). "Código Sísmico de Costa Rica 2010. Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, Cartago, Costa Rica. Recuperado de https://www.codigosismico.or.cr/respuestas_com_2010.htm el 15 de mayo de 2021
- Correia, J. R., Branco, F. A., & Ferreira, J. G. (2007). Flexural behaviour of GFRP–concrete hybrid beams with interconnection slip. *Composite Structures*, 77(1), 66-78.
- CSCR. (2014). Código Sísmico de Costa Rica. Revisión 2014. Editorial Tecnológica de Costa Rica. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Deliberes, L., & Liners, D. (1982). Determinación de la resistencia del hormigón mediante ensayos no destructivos realizados con esclerómetro y ultrasonidos. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/275923991_Determinacion_de_la_resistencia_del_hormigon_mediante_ensayos_no_destructivos_realizados_con_esclerometro_y_ultrasonidos
- Fernández, S. F., Sánchez, J. M. C., Córdoba, A., & Largo, A. C. (2002). *Estadística descriptiva*. Esic Editorial.
- Flores Tapia, C. E., & Flores Cevallos, K. L. (2021). Pruebas para comprobar la normalidad de datos en procesos productivos: Anderson-Darling, Ryan-Joiner, Shapiro-Wilk y Kolmogórov-Smirnov. *Societas*, 23(2), 83-106. Recuperado de <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/341/3412237018/3412237018.pdf>
- González Cuevas, O. M., Robles Fernández Villegas, F., González Cuevas, O. M., & Fernández-Villegas, F. R. (2013). *ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL CONCRETO REFORZADO*. LIMUSA.
- Gutiérrez de López, L. (2003). El concreto y otros materiales para la construcción. Departamento de Ingeniería Civil. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9302>
- Juan, Á. A., Sedano, M., & Vila, A. (2006). La distribución normal. Universitat Oberta de Catalunya.
- Kadhim, M., Donchev, T., Al-Mishhdani, S., & Al-Shaarbaf, I. (2008). Comparison between design codes and procedures for concrete beams with internal FRP reinforcement in balanced case failure. In *Excellence in Concrete Construction through Innovation* (pp. 429-434). CRC Press.
- Lamus, F., & Andrade, S. (2015). *Concreto reforzado: fundamentos*. Ecoe Ediciones.
- Lizarazo, J. M., Salas, A., & Escobar, D. A. (2016). Efectos del Curado en las Propiedades de Mezclas de Concreto con Altos Contenidos de Escoria de Hierro. *Información tecnológica*, 27(6), 163-174. Recuperado de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642016000600017
- Menhenhall, W., Beaver, R., & Beaver, B. (2010). *Introducción a la probabilidad y*

- estadística. En Cengage Learning (Décimo ter). Recuperado de <https://www.fcfm.buap.mx/jzacarias/cursos/e stad2/libros/book5e2.pdf>
- McCormac, J. C., & Brown, R. (2011). Diseño de concreto reforzado. Alfaomega Grupo Editor.
- Millones Prado, A. A. (2008). Concreto de alta densidad con super plastificante. Recuperado de <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/urp/110>
- Ministerio de Economía, I. y C. (1973). Decreto N° 10854-MEIC Norma oficial de especificaciones para los agregados finos y gruesos para concreto. San José: Imprenta Nacional, 4, 1–8
- Orozco, M., Avila, Y., Restrepo, S., & Parody, A. (2018). Factores influyentes en la calidad del concreto: una encuesta a los actores relevantes de la industria del hormigón. *Revista ingeniería de construcción*, 33(2), 161-172. Recuperado de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-50732018000200161&script=sci_arttext&lng=p.
- Pang, L., Qu, W., Zhu, P., & Xu, J. (2016). Design propositions for hybrid FRP-steel reinforced concrete beams. *Journal of Composites for Construction*, 20(4), 04015086.
- Simeon, J. (2012). Análisis de tamaño de partículas por tamizado en agregado fino y grueso y determinación de material más fino que el tamiz No. 200 (75um) en agregado mineral por lavado. Recuperado de <https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/GRANULOMETRIA.pdf>
- Silva, A. M., Pavón, C. M., Hernández, L. S., Cárdenas, M. H., & Padilla, H. W. (2014). Relación de la resistencia a la compresión y módulo de rotura del concreto hidráulico. *Revista Ciencia y Tecnología Innovare-Unitec*, 77-85.
- Taqieddin, Z. N. (2008). Elasto-plastic and damage modeling of reinforced concrete. Recuperado de https://www.researchgate.net/figure/Typical-load-displacement-curve-of-RC-beams_fig1_261991350
- Urvoy, M., & Autrusseau, F. (2014). Application of Grubbs' test for outliers to the detection of watermarks. Recuperado de <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/2600918.2600931>
- Wight, J., & MacGregor, J. (2012). REINFORCED CONCRETE MECHANICS & DESIGN. In Pearson.