

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el
sistema FRCM**

Trabajo de graduación presentado por Kenneth José Berduo Alvarez
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2020

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCCM

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el
sistema FRCM**

Trabajo de graduación presentado por Kenneth José Berduo Alvarez
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

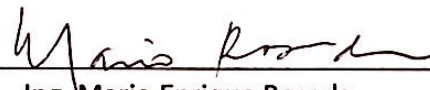
Guatemala,


2020

Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Mario Enrique Rosada

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Mario Enrique Rosada

(f) 
Ing. Roberto Godo Levensen

(f) 
Ing. Estuardo Palencia

Fecha de aprobación: Guatemala, 10 de diciembre de 2020.

Agradezco a Dios principalmente por darme la vida, por haber guiado mis pasos hasta el día de hoy y por haberme dado la fuerza de poder salir adelante en el trayecto de mi vida estudiantil. Quiero agradecer a mis pilares de vida, mi padre, Víctor Berduo y mi madre, Mayra Álvarez, a quienes les estaré eternamente agradecido por haberme dado la oportunidad de formarme como profesional y ser quien hoy en día soy. Agradezco a mi hermana Kelly Berduo, por su apoyo incondicional que de una u otra manera han sido de gran gratitud. Agradecer a mis abuelas Elvira y Margarita quienes fueron parte esencial en mi formación personal y a mis tías Elvira, Aura y Carolina.

Agradezco a mi asesor de tesis, el ingeniero Mario Enrique Rosada, por su valioso apoyo, tiempo y seguimiento en cuanto al trabajo de graduación ejecutado. Agradezco a mi coordinador de tesis Ing. Otoniel Echeverría y demás catedráticos quienes de una u otra forma fueron piezas claves para mi formación profesional. Por último, agradezco al director de carrera Ing. Roberto Godo quien de principio a fin estuvo al tanto de mi formación profesional, motivándome durante toda la carrera.

También expresar mi más sincero agradecimiento a mi mejor amigo Manuel Juárez, quien día con día me fue motivando y dándome consejos que serán importantes a lo largo de mi vida, de igual manera una mención a mis amigos Rudy y Cesar por su motivación.

Por último, darle las gracias a Iván Argueta por haberme brindado el material para el reforzamiento de las vigas, y a la empresa Proquality por haberme apoyado con los ensayos realizados.

Listado de simbología

Símbolo	Definición	Referencia
a	altura del bloque de compresión	ACI 318-14
A_f	área de la malla FRCM por unidad de ancho	ACI 549.4R-13
A_s	área del acero en tensión	ACI 318-14
A'_s	área del acero en compresión	ACI 318-14
b	ancho de la viga	ACI 318-14
c	profundidad del eje neutro	ACI 318-14
d	peralte de la viga	ACI 318-14
d'	recubrimiento	-
E_c	módulo de elasticidad del concreto	ACI 318-14
E_f	módulo de elasticidad a tensión del FRCM	ACI 549.4R-13
E_s	módulo de elasticidad del acero	ACI 318-14
f'_c	resistencia del concreto	ACI 318-14
f_y	resistencia a la fluencia del acero	ACI 318-14
f_s	esfuerzo del acero a tensión	ACI 318-14
f'_s	esfuerzo del acero a compresión	ACI 318-14
f_{fe}	esfuerzo efectivo en el sistema FRCM	ACI 549.4R-13
F_c	fuerza resultante del concreto	ACI 318-14
F_s	fuerza resultante del acero a tensión	ACI 318-14
F_{fe}	fuerza resultante del sistema FRCM	ACI 549.4R-13
h	altura de la viga	ACI 318-14
L	largo de la viga	ACI 318-14
L_e	longitud entre apoyos de la viga	-
M_f	momento nominal a flexión del sistema FRCM	ACI 549.4R-13
M_s	momento nominal a flexión del acero	ACI 318-14
M_n	momento nominal a flexión del elemento	ACI 318-14
N	numero de capas de malla	-
V_s	corte tomado por el acero	ACI 318-14
V_u	corte máximo de la viga	ACI 318-14
W_f	ancho de la tira FRCM	ACI 549.4R-13
ε_{bi}	deformación inicial antes de colocar el sistema FRCM	ACI 549.4R-13
ε_{fd}	deformación por tensión del material compuesto	ACI 549.4R-13

Símbolo	Definición	Referencia
ε_{fe}	deformación unitaria en el sistema FRCM	ACI 549.4R-13
ε_c	deformación unitaria en el concreto	ACI 318-14
ε_s	deformación del acero	ACI 318-14
ε_y	deformación unitaria de un miembro sujeto a flexión	ACI 318-14
β_1	coeficiente Bloque de Whitney	ACI 318-14
ϕ_m	factor de reducción	ACI 318-14
α_1	valor que equivale a una sección rectangular	ACI 318-14
ρ_s	cuantía del acero	ACI 318-14
ρ_f	cuantía del sistema FRCM	ACI 549.4R-13

Prefacio	v
Lista de siglas y acrónimos	VIII
Lista de figuras	XII
Lista de cuadros	XIII
Resumen	XV
Abstract	XVII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	5
4. Objetivos	7
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos	7
5. Marco teórico	9
5.1. Reforzamiento estructural	9
5.2. ¿Por qué reforzar estructuras?	9
5.3. En qué consiste el sistema FRCM	10
5.4. Norma ACI 549.4R-13	11
5.5. Caracterización de los materiales constituyentes del sistema FRCM	11
5.5.1. Contracción por secado y contenido vacío	11
5.5.2. Unión y resistencia al corte interlaminar	12
5.5.3. Durabilidad	12
5.5.4. Mortero cementicio	13
5.5.5. Fibras de la malla estructural	13
5.5.6. Malla estructural	14

5.6. Propiedades del sistema	16
5.7. Ventajas del sistema FRCM	17
5.8. Procedimiento de instalación	18
5.9. Comparación sistema FRCM respecto al FRP	20
5.10. Mantenimiento y reparación del sistema FRCM	20
6. Metodología	21
7. Diseño de viga de acuerdo al código ACI 318-14 y diseño de viga reforzada a flexión de acuerdo al código ACI 549.4R-13 y ACI 562	22
7.1. Consideraciones generales para el diseño del refuerzo FRCM a flexión	22
7.1.1. Verificación de la capacidad del elemento en condiciones de servicio	23
7.1.2. Hipótesis de diseño	23
7.1.3. Modos de falla	24
7.1.4. Consideraciones de diseño para viga reforzada con sistema FRCM	24
7.1.5. Limitaciones del diseño	29
7.2. Diseño de viga de acuerdo al código ACI 318-14.	30
7.2.1. Características de la viga diseñada	30
7.3. Diseño de viga reforzada a flexión de acuerdo al código ACI 549.4R-13.	31
7.3.1. Características de las vigas reforzadas a flexión	31
8. Elaboración de vigas e instalación del sistema FRCM en las vigas	33
8.1. Descripción del proceso de la fabricación de las vigas	33
8.2. Instalación del reforzamiento FRCM en las 4 vigas	36
9. Ensayo a compresión de los especímenes de concreto	40
9.1. Fabricación de los especímenes de concreto	41
9.2. Resultados de los ensayos a compresión de los especímenes	42
10. Descripción y resultados de los ensayos a flexión	44
10.1. Norma de ensayo a flexión NTG 41017 h8 (ASTM C293)	44
10.2. Ensayo y resultados de las 5 vigas	44
11. Análisis y comparación de resultados de los ensayos a flexión	53
12. Conclusiones	57
13. Recomendaciones	58
14. Bibliografía	59
15. Anexos	61

Figura	Página
1. Sistema FRCM	10
2. Características matriz cementicia	13
3. Características fibra PBO	14
4. Comparación del rendimiento de los distintos tipos de fibras	14
5. Características de la malla PBO MESH GOLD 105	15
6. Ensayos curva tensión - deformación	16
7. Curva tensión-deformación	17
8. Etapas de instalación sistema FRCM	19
9. Representación esquemática del sistema FRCM	22
10. Representación esquemática del sistema FRCM	23
11. Esquema deformaciones y fuerzas a nivel de sección	25
12. Ruptura por fluencia y fatiga según el tipo de fibra	29
13. Resultados viga diseñada	30
14. Sección transversal de la viga diseñada	30
15. Sección longitudinal de la viga diseñada	31
16. Resultados del reforzamiento con 1 capa	32
17. Resultados del reforzamiento con 2 capas	32
18. Armadura de las vigas	34
19. Formaleta de las vigas	34
20. Colocación de la armadura en la formaleta	35
21. Fundición de vigas	35
22. Curado de vigas	36
23. Dosificación del mortero y agua	36
24. Humedecido de la superficie a reforzar	37
25. Primera capa de mortero	37
26. Colocación de la malla	38
27. Colocación de la última capa del mortero	38
28. Refuerzo transversal	39

29.	Elaboración de los cilindros	41
30.	Cilindros uno y dos	41
31.	Desencofrado y curado de cilindros	42
32.	Ensayo de cilindro No.1	43
33.	Ensayo de cilindro No.2	43
34.	Ensayo de cilindro No.2	43
35.	Gráfica fuerza/deformación de viga sin refuerzo	45
36.	Viga previo a ser ensayada	45
37.	Viga ensayada	46
38.	Gráfica fuerza/deformación de primera viga con una capa de malla	46
39.	Viga previo a ser ensayada	47
40.	Viga ensayada	47
41.	Gráfica fuerza/deformación de segunda viga con una capa de malla	48
42.	Viga previo a ser ensayada	48
43.	Viga ensayada	49
44.	Grafica fuerza/deformación de primera viga con dos capas de malla	49
45.	Viga previo a ser ensayada	50
46.	Viga ensayada	50
47.	Gráfica fuerza/deformación de segunda viga con dos capas de malla	51
48.	Viga previo a ser ensayada	51
49.	Viga ensayada	52
50.	Comparación cargas máximas de cada ensayo	54
51.	Comparación deformaciones máximas de cada ensayo	55
52.	Anexo 1 – “Transporte del material”	61
53.	Anexo 2 – “Corte de varillas”	62
54.	Anexo 3 – “Elaboración de estribos”	62
55.	Anexo 4 – “Trazo y distribución de estribos para armado de viga”	63
56.	Anexo 5 – “Armado de vigas”	63
57.	Anexo 6 – “Armado de formaleta”	64
58.	Anexo 7 – “Mezcla del concreto”	64
59.	Anexo 8 – “Aplicación del desencofraste en la formaleta”	65
60.	Anexo 9 – “Fundición de vigas”	65
61.	Anexo 10 – “Fundición de vigas 2”	66
62.	Anexo 11 – “Vibrado del concreto”	66
63.	Anexo 12 – “Informe de los especímenes ensayados”	67
64.	Anexo 12 – “Tipos de fallas”	68
65.	Anexo 13 – “Lecturas tomadas de la viga sin refuerzo”	68
66.	Anexo 14 – “Lecturas tomadas de la primera viga con una capa de refuerzo”	69
67.	Anexo 15 – “Lecturas tomadas de la segunda viga con una capa de refuerzo”	70
68.	Anexo 16 – “Lecturas tomadas de la primera viga con dos capas de refuerzo”	71
69.	Anexo 17 – “Lecturas tomadas de la primera viga con dos capas de refuerzo”	72
70.	Anexo 18 – “Delaminación del material FRCM”	72
71.	Anexo 19 – “Delaminación del material FRCM”	73
72.	Anexo 20 – “Delaminación del material FRCM”	73

Cuadro		Página
2.	Comparación sistema FRCM y C- FRP	20
3.	Resultados de los ensayos a compresión	42
4.	Resultados viga sin reforzamiento	44
5.	Resultados primera viga reforzada con una capa de malla	46
6.	Resultados segunda viga reforzada con una capa de malla	48
7.	Resultados primera viga reforzada con dos capas de malla	49
8.	Resultados segunda viga reforzada con dos capas de malla	51
9.	Resultados ensayos a flexión	53
10.	Comparación resultados teóricos y experimentales	56

El proyecto de tesis *Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCM*, busca mostrar una alternativa de reforzamiento a vigas sometidas a esfuerzos de flexión, con la finalidad de dar a conocer este tipo de sistema a profesionales que se desempeñen en dicha área.

Las estructuras de concreto presentan con gran frecuencia patologías causadas por diversos factores, ya sea factores provocados por: efectos sísmicos, efectos de temperatura, problemas de durabilidad, inadecuado diseño, exceder su vida útil, cambios de uso que implica un incremento de cargas en relación a lo considerado inicialmente, entre otros.

En la mayoría de los casos es necesario considerar algún tipo de refuerzo o reforzamiento, por lo que uno de los métodos más eficientes actualmente es el refuerzo exterior. Hoy en día uno de los métodos de reforzamiento es el sistema FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix), por ser poco invasivo, rápido y de fácil aplicación. El sistema consiste en una base de mortero inorgánico cementicio más malla estructural. Este tipo de reforzamiento es utilizado con la finalidad de mejorar las propiedades de torsión, corte, flexión y confinamiento de un elemento estructural.

Este documento abarca detalladamente la información necesaria acerca del sistema FRCM, para conocer uno de los sistemas más innovadores de reforzamiento hoy en día. Se hablará también de las ventajas, capacidad que este sistema brinda a las estructuras, y de los problemas que el sistema no presenta o soluciona en relación al FRP.

Posteriormente se diseñará una viga de concreto reforzado, para luego reforzarla a flexión con el sistema FRCM, de acuerdo a los códigos; ACI 318-14 y ACI 549.4R-13. Posteriormente, en base a los parámetros de diseño las vigas fueron ensayadas, tanto con refuerzo convencional como con un refuerzo adicional FRCM, presentando resultados fundamentales para concluir acerca de este tipo de reforzamiento estructural.

The thesis project "Bending reinforcement in concrete beams using the FRCM system", exposes an alternative to reinforce beams subjected to bending stresses, in order to make this type of system known to professionals who works in this area.

Concrete structures frequently present pathologies caused by various factors, such as: seismic effects, temperature effects, durability problems, inadequate design, exceeding useful life, changes in use or increased loads in relation to what it was initially considered, among others.

In most cases it is necessary to consider some type of reinforcement, one of the most efficient repairs and reinforcement methods is the exterior reinforcement. Nowadays one of the most efficient reinforcement methods is the FRCM system, because it is not very invasive, the application tends to be fast and easy. The system consists of a mesh and a stabilized inorganic matrix designed to connect the mesh with the concrete substrate. This type of reinforcement is used to improve the properties of torsion, shear, bending and confinement of a structural element.

This document covers all the necessary information about the FRCM system, to learn more about it and find out why it is one of the most innovative reinforcement systems today. It will also talk about the advantages, the capacity that this system provides to the structures and the issues that this system covers that the FRP reinforcement doesn't.

A reinforced concrete beam will be designed, it will be reinforced in flexion with the FRCM system, according to the codes; ACI 318-14 and ACI 549.4R-13. Subsequently, based on the design parameters, the beams were tested, with conventional reinforcement and with an additional FRCM reinforcement, presenting fundamental results to conclude about this type of structural reinforcement.

La ingeniería ha evolucionado constantemente, no solo por la construcción de nuevas edificaciones, sino que también por la reparación y restauración de edificaciones existentes del pasado, las cuales llegan a ser consideradas íconos de su país o son consideradas hoy en día íconos. La construcción día con día está siendo más innovadora con la finalidad de superar o minimizar los daños estructurales en las edificaciones, debido a eventos naturales y no naturales, que últimamente han sido las principales causas de los daños en las estructuras.

Al estar involucrado en temas de restauraciones y reparaciones estructurales, se analiza la opción más efectiva y viable para evitar que una edificación existente sufra cambios internos con la finalidad de mantener su forma y geometría, buscando la opción de reforzamiento más eficiente que satisface dichas necesidades y brinde una solución aceptable a los problemas presentes.

Existen diversas opciones de reforzamiento a emplear en casos de restauraciones o reparaciones estructurales. Una de ellas es el sistema FRCC, el cual está compuesto por malla estructural de distintos tipos de fibras más mortero inorgánico cementicio. Este sistema de reforzamiento presenta ciertas ventajas en comparación con otros sistemas similares. Por mencionar alguna de las ventajas más importantes de este sistema; No altera las características arquitectónicas de los elementos a reforzar, fácil y rápida colocación, resistente a altas temperaturas y al fuego, vulnerable a la humedad, compatible con características físicas, químicas y mecánicas del concreto y mampostería.

En este trabajo de graduación, se estará presentado el diseño de reforzamiento de una viga a flexión, mediante el sistema FRCC. Donde se detallarán todos los aspectos necesarios que conllevan a la aplicación de este sistema, con la finalidad de corroborar su efectividad. Para ratificar su efectividad y del trabajo presentado, se realizarán ensayos de laboratorio, tanto para vigas con y sin refuerzo, para elaborar conclusiones acerca de este sistema.

Según Martínez (2016), el desarrollo y creación de nuevos sistemas de reforzamiento estructural recae principalmente a la necesidad de conjugar o adaptarse a las constantes actualizaciones de normas de diseño o las rehabilitaciones estructurales. Hoy en día no solo en Guatemala si no que el cualquier país del mundo se hace más importante reforzar y rehabilitar una estructura que la demolición y creación de una nueva edificación por temas de costos y tiempos de construcción.

Años atrás, uno de los sistemas de reforzamiento disponibles y presentados en el mercado para el refuerzo exterior de estructuras de concreto fue el sistema de reforzamiento FRP (Fiber-Reinforced Polymer). Catalogado en ese entonces como la nueva tecnología de reparación de estructuras de concreto y albañilería. (Martínez, citado por Nanni, 1995 y 1997)

El sistema FRP posee ventajas importantes las cuales le dieron una popularidad al refuerzo FRP, pero cabe mencionar que este sistema presenta ciertas desventajas que pueden llegar alterar su funcionalidad, siendo las desventajas más importantes: resinas epóxicas tóxicas para el trabajador, no es tolerante a altas temperaturas y fuego, baja permeabilidad al vapor, incompatibilidad de la resina con las propiedades del concreto, entre otras. Lo que conllevó a la búsqueda y creación de resinas epóxicas que pudieran contrarrestar ciertas desventajas al ser aplicado.

Según Martínez, citado por Nanni (2012), tomando en cuenta las desventajas del sistema FRP, se estudió el uso de una nueva tecnología de reforzamiento que pudiera suplir las desventajas del sistema FRP, siendo esta denominada como sistema FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix), la cual está compuesta de un inorgánico cementicio + malla estructural de distintos tipos de fibras.

Previo a crear el sistema FRCM, se creó un sistema conocido como FRM (Fiber-Reinforced Mortar), compuesto por una matriz o mortero inorgánico cementicio con fibras laminadas, pero este sistema tuvo ciertos inconvenientes ya que la matriz inorgánica se le dificultaba ingresar a las láminas de fibras. Para resolver el problema se observó que las propiedades y

características de la unión de la fibra-matriz en una matriz en base a cemento podían ser mejoradas, si las láminas continuas de fibras eran reemplazadas por mallas de fibras, dando origen al sistema de refuerzo FRCM.

Al terminar de diseñar y construir una edificación se busca que la estructura cumpla y funcione adecuadamente a lo largo de su vida útil, pero en el transcurso de su vida la estructura puede sufrir cambios interiores debido a factores ambientales, respuestas sísmicas, problemas de durabilidad, incremento de cargas, problemas de impactos, mal diseño o cambios de uso, entre otros, factores que reducen la capacidad del elemento estructural y se exponen al uso necesario de un reforzamiento que pueda satisfacer su demanda.

Al realizar un reforzamiento de una estructura las personas que laboran en el área de la construcción deben tener un conocimiento amplio de las metodologías existentes en el mercado para reforzar. Por temas de costo, dificultad y tiempo de reparación la opción de demoler la estructura y construir una nueva, no es tan viable, por lo que una solución eficiente, es a través de metodologías de reforzamiento exteriores, que sería una forma no necesariamente más económica, pero terminara siendo más fácil y rápida, que la demolición y construcción de una nueva edificación.

Al citar el diseño de reforzamiento de estructuras con el sistema FRCM, las estructuras de concreto armado a base de textiles ha sido utilizado con gran frecuencia últimamente en países de Europa y Estados Unidos, no solo para el reforzamiento de estructuras, sino que también para las construcciones de nuevas edificaciones. Este tipo de refuerzo ha sido aplicado en puentes, chimeneas, iglesias antiguas, edificios antiguos, entre otros. (Nanni, 2012)

Una de las razones por la cual se realizó este trabajo es que Guatemala cuenta con varias estructuras antiguas y ricas en historia, por lo que sería una pérdida para el patrimonio cultural no mantener la forma y geometría de las estructuras antiguas. Es por eso que con este tipo de reforzamiento estructural se lograría mejorar la resistencia de estas estructuras sometidas a eventos naturales y no naturales, reduciendo daños integrales que surgen o han surgido a lo largo de su vida.

El objetivo de este trabajo de graduación es presentar el método de “Refuerzos estructurales con el sistema FRCM”, para entender el comportamiento de una viga de concreto

con este sistema al ser aplicado a cargas de flexión. A demás de lo mencionado, verificar el comportamiento de los refuerzos. Hoy en día el sistema FRCM es uno de los métodos más prácticos y funcionales utilizados con la finalidad de aumentar la resistencia a la flexión, corte y vida útil del elemento estructural.

4.1. Objetivo general

- Presentar el método de “Reforzamiento Estructural con el Sistema FRCM” para el reforzamiento de vigas de concreto.

4.2. Objetivos específicos

- Conocer los criterios de diseño de refuerzos a flexión mediante el sistema FRCM en vigas de concreto.
- Diseñar una viga de concreto con reforzamiento a flexión, utilizando el sistema FRCM basándose en los códigos ACI 318-14 y ACI 549.4R-13.
- Comparar la capacidad de diseño con la experimental, a partir de pruebas de laboratorio para las vigas sometidas a esfuerzos de flexión.
- Analizar el comportamiento de una viga de concreto al aplicar el sistema FRCM sometidas a esfuerzos de flexión.

5.1. Reforzamiento estructural

Hoy en día las estructuras de concreto, madera y acero se ven afectadas por el pasar del tiempo, estando expuestas a sufrir cambios según sean sus condiciones de carga y resistencia. Cambios generados a partir de efectos sísmicos, modificaciones en su uso, incendio, impacto, mal diseño estructural, entre otros. Esto conlleva afectar negativamente la capacidad de la estructura, lo que conlleva a efectos de fatiga, corrosión, fisuras, asentamientos, entre otros, lo que eventualmente genera daños internos y colapsos de la estructura.

Cuando se diseña, analiza y construye una estructura se espera que la estructura pueda satisfacer con todas las demandas para la cual fue diseñada y construida. De igual manera se busca que la capacidad resistente de cálculo sea mayor o igual a los valores del momento o fuerza interna.

Tomando en cuenta lo anterior en la mayoría de los casos es necesario realizar una reparación con la aplicación de refuerzos en algunos elementos estructurales o en todo su conjunto para aumentar la capacidad, y así recuperar su funcionalidad en gran porcentaje.

5.2. ¿Por qué reforzar estructuras?

Hoy en día es a menudo tener que reforzar una estructura por daños internos y externos provocados por diversas causas. Al estar afectando el comportamiento de una estructura, esta tiende a dañarse o no comportarse de la misma manera, por lo que se busca y analiza una opción viable para minimizar el daño, lo cual orienta a diseñar y reforzar estructuras. Entre las principales causas que conllevan a evaluar y reforzar estructuras, se puede mencionar los siguientes:

- Errores en los cálculos estructurales.

- Eliminación parcial o total de elementos estructurales existentes.
- Asentamientos diferenciales.
- Errores durante la fase de construcción.
- Escasas secciones de columnas y vigas.
- Efectos sísmicos.
- Cambio de uso en la edificación.
- Baja resistencia del concreto.
- Actualización y cambios de las normativas de construcciones.
- Daños producidos por fenómenos naturales, explosiones, impactos, entre otros.

5.3. En qué consiste el sistema FRCM

El sistema de reforzamiento FRCM surge como una evolución de los sistemas FRP, la cual trata de solucionar los problemas que este sistema presentaba, como baja resistencia altas temperaturas, alteraciones (química o mecánica) al ser aplicado en soportes húmedos, es un sistema tóxico debido a las resinas epoxicas que utiliza, necesita de trabajadores especiales, etc.

El sistema consiste de una matriz inorgánica cementicia con malla estructural. El sistema permite mejorar e incrementar las propiedades de un elemento estructural, destacando entre ellas las propiedades de la resistencia a la tensión, resistencia a la flexión, confinamiento, resistencia a cortante, tenacidad, fatiga, impacto, permeabilidad y resistencia a la abrasión. (ACI 549.4R-13.)

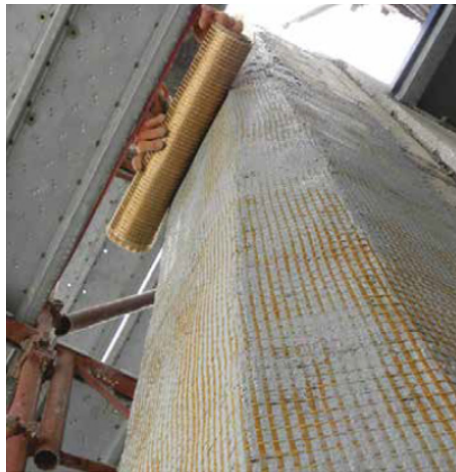


Figura 1: Sistema FRCM
(Fuente: Ruregold S.r.l., 2019)

5.4. Norma ACI 549.4R-13

El sistema de reforzamiento FRCM está regulado por el Instituto Americano del Concreto (ACI), siendo aprobada y publicado la norma en diciembre del año 2013, titulado “Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures”. Dicha norma está basada de la guía AC434 del ICC (International Code Council Evaluation Service), la cual fue utilizada para parametrizar todas las propiedades y características de los materiales que componen el sistema, siendo basadas en investigaciones experimentales, trabajos analíticos y aplicaciones en campo.

Dicha norma fue elaborada para conocer este tipo de reforzamiento, y a la vez servir de guía para la aplicación del sistema de reforzamiento FRCM. La norma aporta del capítulo 3 al capítulo 9 los siguientes aspectos del sistema: aplicaciones en campo, propiedades y características de los materiales, instalación, inspección, evaluación, aceptación, mantenimiento y reparación. Del capítulo 10 al 14 se detallan y especifican todos los parámetros y criterios del diseño de reforzamiento, tanto para estructuras de concreto armado y mampostería.

5.5. Caracterización de los materiales constituyentes del sistema FRCM

Los sistemas de refuerzo FRCM poseen dos componentes principales: la matriz cementicia más una o más mallas de refuerzo conformadas por grupos de fibras minerales. Generalmente los valores de las propiedades de los materiales que componen un sistema de reforzamiento son proporcionados por los proveedores del material. Según la Norma ACI 549 estos valores solo se deben de utilizar para dar una aproximación inicial de que el material seleccionado cumple con los requisitos mecánicos y físicos para el refuerzo que se desea aplicar. Los materiales se deben de caracterizar según su uso y las condiciones a las cuales será sometido. La caracterización del mortero cementicio y del material compuesto del sistema FRCM se rigen según los códigos AC 434 y ACI 549.

En la norma ACI 549 en la sección 5.2.1 se detalla un plan de prueba de calificación según AC434-A, este plan se realiza mediante los requisitos establecido en el AC434, con el fin de verificar y validar las propiedades de diseño que se utilizan en el sistema FRCM. La prueba proporciona datos de las propiedades del material, fuerza, y estados límites de deformación.

En el capítulo 5 del ACI 549 se especifica y describe una lista de las propiedades mecánicas, físicas y durabilidad que deben estudiarse o determinarse a partir de ensayos para así caracterizar el sistema FRCM de acuerdo con el código AC 434. Las propiedades que se toman en cuenta para caracterizar un sistema FRCM, son las siguientes:

5.5.1. Contracción por secado y contenido vacío

Para determinar estas características, se deben realizar los siguientes ensayos:

ASTM C157: Ensayos de contracción por secado.

ASTM C138: Pruebas de contenido de vacío.

5.5.2. Unión y resistencia al corte interlaminar

Para determinar estas características, se deben realizar los siguientes ensayos:

ASTM C1583: Resistencia a la tensión de superficies de concreto y resistencia de unión o resistencia a la tensión de reparaciones de concreto y materiales de recubrimiento por medio de tensión directa.

ASTM D2344: Resistencia de vigas cortas de materiales compuestos de matriz polimérica y sus laminados.

AC434 ofrece interpretación y límites para tres posibles modos de falla:

- Cohesivo cuando ocurre una falla en el material del sustrato.
- Adhesivo cuando ocurre una falla en la interfaz FRCM y el material del sustrato.
- Adhesivo cuando la falla está en la interfaz entre la malla de refuerzo y la matriz dentro del FRCM.

5.5.3. Durabilidad

Para determinar la durabilidad, se deben realizar los siguientes ensayos:

Envejecimiento: Evalúan los siguientes criterios luego de ser sometidos a los regímenes de acondicionamiento establecidos en el código AC434:

- Ambiente.
- Envejecimiento en vapor de agua.
- Envejecimiento agua salda.
- Envejecimiento en ambiente alcalino.

Congelación y descongelación: Son evaluados luego de ser sometidos a ciclos de congelación y descongelación, cada ciclo consta de un mínimo de 4 horas seguido de 12 horas en una cámara de humedad.

Resistencia al combustible: Lo evalúan luego de estar expuesto al reactivo por un mínimo de 4 horas.

5.5.4. Mortero cementicio

El mortero corresponde normalmente en una base de cemento con una baja dosis de polímeros secos a menos del 5 por ciento en relación con el peso de cemento. El mortero debe ser capaz de cumplir con los siguientes requisitos: saturar las fibras, la adherencia entre la matriz y la fibra y la adherencia entre la matriz y el sustrato donde se aplica el sistema. El mortero cementicio debe de cumplir con las siguientes normativas para ser utilizadas como matriz en el refuerzo y al menos 5 especímenes deben de ser ensayados.

ASTM C387: Regula la resistencia del mortero a compresión y al contenido de vacíos, a los 7 y 28 días.

ASTM C109: Determinación de la resistencia a la compresión de mortero de cemento hidráulico usando especímenes cúbicos de 50 mm (2 pulg) de lado.

PROPIEDADES DE LA MATRIZ INORGÁNICA	PBO-MX GOLD CONCRETE	PBO-MX GOLD MASONRY
Agua de mezcla para 100 kg de premezcla seca	26 – 28 litros	26 – 28 litros
Consistencia del mortero (EN13395-1)	175 +/- 10 mm	170 +/- 10 mm
Peso específico de mortero fresco (EN 1015-6)	1,80 ± 0,05 G/CC	1,65 ± 0,05 G/CC
Volumen de mortero fresco por cada 100 kg de premezcla seca	Aprox. 71 litros	Aprox. 77 litros
Resistencia a la compresión 28 días (EN12190)	≥ 40 MPa	> 20 MPa
Resistencia a la flexión 28 días ((EN 196-1)	≥ 4MPa	> 3,5 MPa
Módulo elástico 28 días (EN 13412)	≥ 7 GPa	> 7,5 GPa
ESPECIFICACIONES PARA EL SUMINISTRO		
Presentación	Sacos de 25 kg	Sacos de 25 kg
Consumo de premezcla seca	Aprox. 1,41 kg/m ² /mm	Aprox. 1,3 kg/m ² /mm

Figura 2: Características matriz cementicia
(Fuente: Ruregold S.r.l., 2019)

5.5.5. Fibras de la malla estructural

Existen cuatro tipos de fibras (vidrio, aramida, carbono y PBO) que pueden ser utilizadas en las mallas estructurales que componen el sistema FRCM, de los cuatro tipos de fibras el que mejor rendimiento brinda, son las fibras PBO. Las fibras de PBO (Poliparafenil benzobisoxazol) son una nueva generación de fibras de elevado rendimiento, actualmente se considera la fibra polimérica más resistente en el mundo. Hoy en día la innovación avanza cada vez más rápido, por lo que en el tema de las fibras no es la excepción. La formulación química de la fibra permite realizar enlaces químicos con el mortero cementicio de la empresa Ruregold. Los enlaces químicos son capaces de realizar una buena adhesión entre la fibra y la matriz, garantizando de este modo excelentes resultados de reforzamiento.

Las fibras PBO presentan las siguientes características:

PROPIEDADES DE LA FIBRA EN PBO	
Resistencia a la tracción	5,8 GPa
Módulo elástico	270 GPa
Densidad de fibra	1,56 g/cm ³
Elongación a rotura	2,5 %

Figura 3: Características fibra PBO
(Fuente: Ruregold S.r.l., 2019)

La Figura 4 muestra una comparación del rendimiento entre la fibra PBO con las fibras de carbono, aramida y vidrio. Las fibras de PBO resultaron ser un 40 por ciento más resistentes a la tensión y un 15 por ciento respecto al módulo de elasticidad comparada con el de fibras de carbono. En cambio, al ser comparadas con las fibras de aramida a alta resistencia, las fibras con PBO registran respectivamente un 210 por ciento más de resistencia a la tensión y 250 por ciento respecto al módulo de elasticidad.

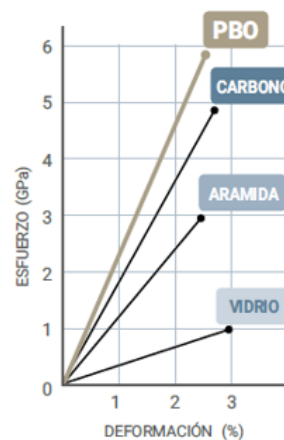


Figura 4: Comparación del rendimiento de los distintos tipos de fibras
(Fuente: Ruregold S.r.l., 2019)

5.5.6. Malla estructural

Existe una variedad de mallas de distintos tipos de fibras disponibles en el mercado que podrían usarse como componentes del sistema FRCM. Los sistemas de refuerzo estructural FRCM consisten de una fibra de alto rendimiento y una matriz cementicia empleada con la finalidad de adhesivo. Actualmente existen mallas de refuerzo a base de fibras de vidrio, aramida, carbono y PBO, cada una con características variables. El tipo de malla a utilizar dependerá del elemento al cual se le va a reforzar, esto quiere decir si será de mampostería, concreto, monumento histórico, entre otros.

Para mampostería se utiliza la malla “Ruredil X Mesh C10/M25” y para elementos

estructurales de concreto “Ruredil X Mesh Gold”. En este trabajo por estar enfocado a un elemento estructural de concreto se estará utilizando la malla Mesh Gold.

En los sistemas de refuerzo Ruregold se utilizan dos tipos diferentes de fibras: Carbono y PBO, ambos materiales sintéticos presentan propiedades mecánicas de alto rendimiento capaces de absorber las tensiones generadas por sobrecargas y eventos excepcionales, como los terremotos.

Ruredil X Mesh Gold es un sistema de FRCM patentado constituido por una malla de fibras de Poliparafenil benzobisoxazol (PBO) y por una matriz inorgánica estabilizada, estudiada para que la malla se adhiriera solidariamente al soporte de hormigón. La fibra PBO es la fibra con el módulo elástico más alto actualmente disponible en el mercado de la construcción.

Esta malla se utiliza para el refuerzo de estructuras de concreto armado y de concreto armado presforzado, incluidas aquellas sometidas a la acción del fuego o a altas temperaturas. Se aplica en especial para:

- Refuerzo para la flexión (no se puede usar el sistema para incrementar la resistencia a flexión en zonas de articulación plástica).
- Refuerzo para el corte.
- Confinamiento de columnas pandeadas con poca excentricidad.
- Confinamiento y refuerzo longitudinal de pilares pandeados con gran excentricidad.

En lo que respecta a su utilización en zonas sísmicas, esta malla es adecuada para:

- Incrementar la resistencia a la flexión simple o al pandeo de columnas y vigas.
- Incrementar la resistencia al corte de las vigas y columnas.
- Incrementar la resistencia a la tensión de los paneles de los nudos viga-columna con las fibras dispuestas según las isostáticas de tensión.

PROPIEDADES DE EL TEJIDO UNIDIRECCIONAL	PBO-MESH GOLD 105
Peso de las fibras PBO en el tejido	105 g/m ²
Espesor equivalente de tejido seco en la dirección de la trama	0,067 mm
Espesor equivalente de tejido seco en la dirección de la trama	0 mm
Carga de rotura de la trama por unidad de ancho	370 kN/m
Carga de rotura de la trama por unidad de ancho	0 kN/m
Peso neto (soporte + fibras en PBO)	137 g/m ²

Figura 5: Características de la malla PBO MESH GOLD 105
(Fuente: Ruregold S.r.l., 2019)

5.6. Propiedades del sistema

La norma ACI 549, en el capítulo 5 da los lineamientos que fueron utilizados para determinar las propiedades del sistema. Para determinar el comportamiento a tensión del sistema FRCM, realizaron ciertos ensayos basados en el anexo A de la guía AC434, la Figura 6 muestra cinco curvas experimentales obtenidas con pruebas de ensayo, de las cuales determinaron la forma del comportamiento de la curva tensión-deformación. A partir de la segunda curva determinaron el módulo de elasticidad del sistema, donde la norma sugiera que para calcular la pendiente se utilicen los puntos $0.9f_{fu}$ y $0.6f_{fu}$. Finalmente, mediante el módulo de elasticidad se calcula la deformación última del sistema.

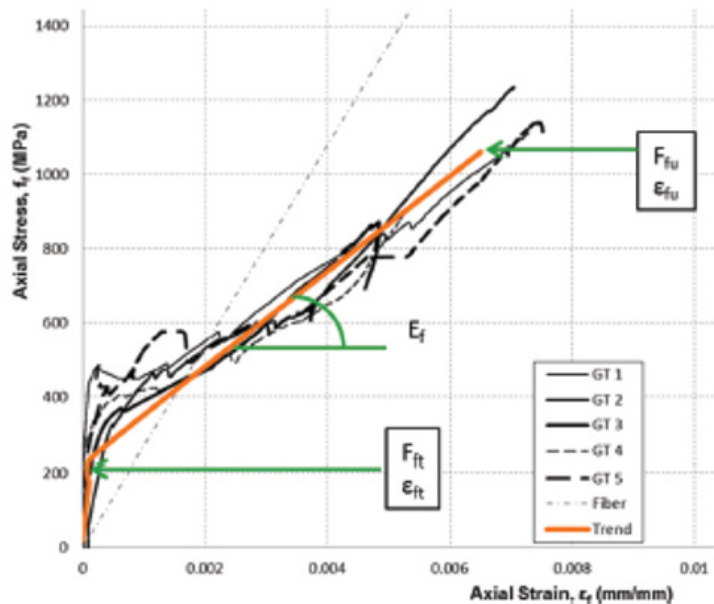


Figura 6: Ensayos curva tensión - deformación
(Fuente: ACI 549.4R-13)

En la Figura 7 se puede apreciar la curva tensión-deformación (curva de respuesta) por tensión, la cual da una muestra del comportamiento del sistema FRCM, teniendo un comportamiento bi-lineal. Al principio se puede apreciar que la curva tiende a comportarse de forma lineal no agrietado, llegando al punto donde ocurre el agrietamiento del mortero (punto de transición), luego tiende a desviarse de forma lineal, donde existe transferencia de tensiones de la malla de refuerzo al mortero, hasta llegar al punto del fallo, que se produce por la ruptura de los filamentos de la malla estructural. Dando lugar a la curva idealizada, con la que se trabaja en el diseño del reforzamiento FRCM.

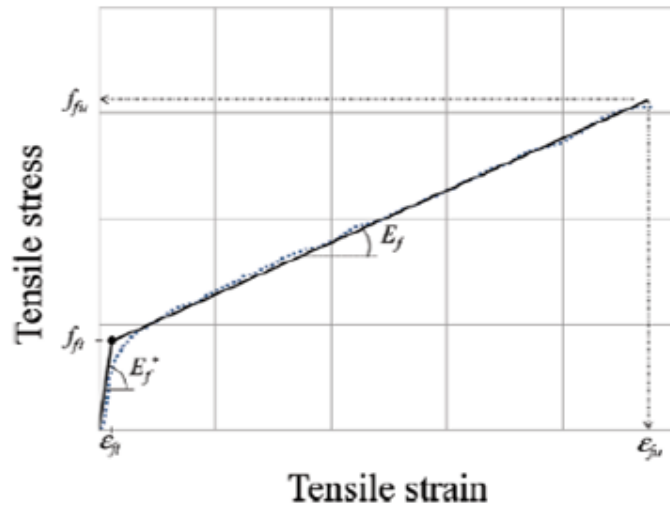


Fig. 5.3.2a—Idealized tensile stress-versus-strain curve of an FRCM coupon specimen.

Figura 7: Curva tensión-deformación
(Fuente: ACI 549.4R-13)

Donde:

E_{f*} Módulo de elasticidad sin agrietar.

E_f Módulo de elasticidad agrietado.

ε_{fu} Deformación unitaria última.

ε_{ft} Deformación unitaria de transición.

f_{fu} Esfuerzo último.

f_{ft} Esfuerzo en el punto de transición

5.7. Ventajas del sistema FRCM

- No altera significativamente las características arquitectónicas de los elementos reforzados y posibilidad de restituir la condición original de la estructura si se requiere.
- Resistente a la corrosión.
- Fácil y rápida aplicación (No requiere de mano de obra calificada).
- Matriz cementicia es una base inorgánica estabilizada.
- Permiten reparar y reforzar estructuras mediante una capa delgada de material.

- No es tóxico, lo que quiere decir que no es un producto dañino para la salud y al medio ambiente.
- Compatibilidad con las características físicas, químicas y mecánicas del concreto armado y mampostería.
- Facilidad de reversibilidad, es decir, capacidad de deshacer la reparación sin dañar la estructura original.
- Alta resistencia a ciclos de congelamiento y des congelamiento.
- Aplicable en sustratos húmedos, lo que quiere decir que la matriz puede mantener sus características iniciales.
- Permeabilidad al vapor de agua, evitando daños arquitectónicos.
- Buen rendimiento a altas temperaturas y al fuego, lo que quiere decir que no es combustible, y libera una baja emisión de humo y partículas incandescentes.

Fuente: (ACI 549.4R-13)

5.8. Procedimiento de instalación

El código ACI 549 da ciertos lineamientos los cuales se deben de tomar en cuenta previo a una instalación del sistema FRCCM, el capítulo 7 brinda las consideraciones necesarias, desde las consideraciones ambientales hasta las condiciones temporales de protección luego de ser colocado el sistema. La instalación del sistema FRCCM consiste básicamente en cuatro pasos primordiales: preparación de la superficie, aplicación de una primera capa de mortero cementicio, seguido de la aplicación de la malla de refuerzo sobre el mortero cementicio y finalmente la aplicación de una última capa de mortero. Este procedimiento se realiza dependiendo la cantidad de capas a utilizar.

La efectividad del sistema FRCCM depende en gran cantidad del sustrato y la buena preparación de la superficie a la cual va a ser aplicada. Una superficie mal preparada puede provocar la desunión del sistema.

1. Preparación de la superficie:

Previo aplicar la primera capa se debe verificar que la temperatura sea la adecuada según se especificada por el proveedor. Luego se verifica que la estructura no presente daños ya que puede comprometer la integridad del sistema FRCCM. Si la estructura presenta ciertos daños se deben de reparar con un mortero de reparación. Luego se debe limpiar la superficie para que esta esté libre de polvo, lechada, partículas ajenas al sustrato y otro tipo de contaminación que puede afectar la adherencia y al sustrato. Por último, se debe de humedecer la superficie.

2. Primera capa de mortero cementicio:

La aplicación de la primera capa del mortero se realiza de acuerdo con las recomendaciones dadas por el proveedor o fabricante. Normalmente el mortero se prepara mezclándolo con agua durante un tiempo de 2-4 minutos.

Se aplica una primera capa sobre el sustrato a reforzar, en la cual se embeberán las fibras, con espesor de aproximadamente 3-4 mm. El mortero cementicio se considera un pegamento inorgánico, con el fin de adherir las fibras y no un material de reparación estructural, por lo que los daños existentes en el sustrato deben repararse en la etapa de preparación del sustrato como se mencionaba anteriormente.

3. Aplicación de la malla estructural:

La instalación de la malla estructural se realiza según las recomendaciones del fabricante. La malla de refuerzo se coloca sobre la primera capa de mortero suavemente, asegurándose que esta quede bien estirada y alineada respecto al elemento a reforzar.

4. Segunda capa de mortero cementicio:

Luego de aplicar la capa de malla, se aplica una última capa de mortero cementicio, de modo que quede como un recubrimiento a estas, normalmente se busca que quede una capa de 3 mm de modo que la malla quede completamente cubierta. De ser necesario la aplicación de más capas se siguen aplicando sucesivamente. La norma recomienda un máximo de 3 capas de malla para reforzar un elemento estructural.

En la Figura 8 podemos tener una idea más clara de cómo es el proceso de instalación del sistema, descrito anteriormente, siendo esta apreciada de la siguiente manera:

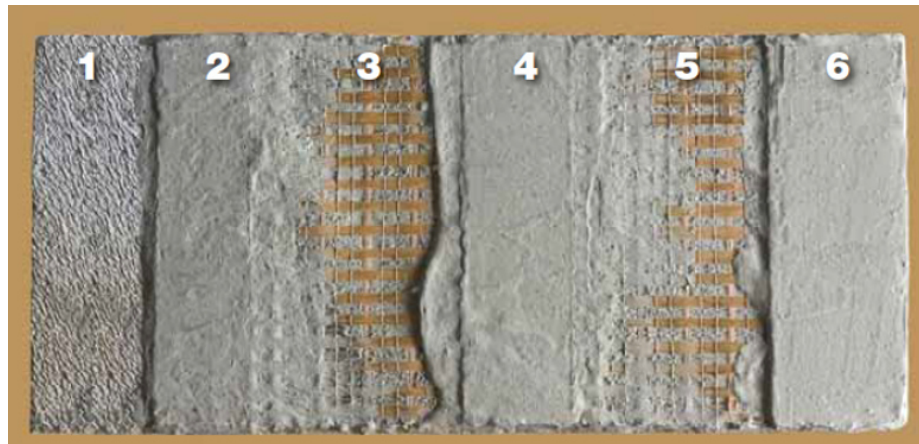


Figura 8: Etapas de instalación sistema FRCM
(Fuente: Ruredil, 2009)

- 1. Superficie a reforzar.
- 2. Primera capa del mortero cementicio.
- 3. Aplicación primera capa de la malla.
- 4. Segunda capa de mortero.
- 5. Segunda capa de la malla(Si fuera requerida según los cálculos estructurales).
- 6. Ultima capa de mortero cementicio.

5.9. Comparación sistema FRCM respecto al FRP

Como se mencionó, el sistema FRCM surgió a base de ciertas irregularidades que presentaba el sistema FRP, estas irregularidades o desventajas eran apreciables ya sea al momento de ser aplicada o luego de ser aplicado el sistema FRP a la superficie. A continuación, se puede apreciar una tabla comparativa de las irregularidades que presentaba el sistema FRP.

FRCM	FRP
Fácil aplicación, no necesita de trabajadores expertos.	Necesita de trabajadores especializados.
Resistente a altas temperaturas.	Resiste temperaturas menores a 90°C.
Buena relación con la permeabilidad al vapor de agua.	Baja permeabilidad al vapor del agua.
Aplicable en soportes húmedos.	No es aplicable en soportes húmedos.
No es toxico.	Toxico.
Resistente al fuego.	No es resistente al fuego
Fácil limpieza luego de su colocación.	Requiere de solventes especiales para la limpieza de los epóxidos aplicados.
Mantiene condiciones arquitectónicas originales.	Daños arquitectónicos al colocarlo o quitarlo.

Cuadro 2: Comparación sistema FRCM y C- FRP
(Fuente: Rosada, 2019)

5.10. Mantenimiento y reparación del sistema FRCM

Toda estructura a reparar, evaluar o darle mantenimiento debe estar regulada por el ACI 562, el propietario o representante debe inspeccionar y evaluar periódicamente el rendimiento del sistema FRCM utilizado. Si el sistema presenta ciertas patologías por diferentes motivos. Se debe de realizar una inspección visual para determinar cualquier desunión, grietas, desviaciones, cambios de color u otras anomalías. Las pruebas ultrasónicas, de sonido o termografía pueden revelar signos de desunión y delaminación del sistema.

La evaluación de un sistema FRCM se lleva a cabo para evaluar cualquier daño e integridad estructural del sistema. Las evaluaciones deben de incluir recomendaciones de reparación y sugerencias para reducir daños a futuro.

El método de reparación y mantenimiento que se vaya a elegir dependerá de las causas del daño, tipo de material, la forma de degradación y nivel del daño. Por lo que antes de reparar el sistema se deben de determinar las causas del daño.

El trabajo de graduación se trabajó en tres etapas, la primera etapa fue la recopilación de información bibliográfica, información que fue obtenida mediante normas de diseño, material proporcionado por la empresa fabricadora y catálogos de los sistemas FRCM existentes, los cuales proporcionan la suficiente información para su comprensión y aplicación.

La segunda etapa fue la del diseño de la viga a flexión y diseño de las vigas reforzadas con el sistema FRCM, en esta etapa se realizó todo el procedimiento necesario que conllevo al diseño de una viga de concreto reforzada, a la cual se le aplicó refuerzo a flexión. Diseñando 3 tipos de vigas, una viga sin reforzamiento, otra viga con una capa de reforzamiento y, por último, una viga con dos capas de reforzamiento, las cuales fueron ensayadas en el laboratorio bajo esfuerzos de flexión.

La última etapa realizada fue la del análisis de los resultados de las pruebas de laboratorio, donde se sacaron conclusiones importantes acerca de este sistema de reforzamiento. Los resultados obtenidos fueron esenciales para corroborar que el sistema FRCM es viable, confiable y aceptable hoy en día.

El trabajo fue ejecutado bajo las normas del código ACI 318-14 y ACI 549.4R-13, la norma ACI 318-14 sirvió de guía para el diseño de la viga de concreto reforzada y la norma ACI 549.4R-13 para la aplicación del reforzamiento FRCM, bajo esfuerzos de flexión. Se utilizaron las herramientas de PTC MathCad Prime para realizar todas las hojas de cálculo, desde el diseño de la viga hasta el diseño de la viga reforzada y la herramienta de Excel para graficar los resultados de los ensayos.

Diseño de viga de acuerdo al código ACI 318-14 y diseño de viga reforzada a flexión de acuerdo al código ACI 549.4R-13 y ACI 562

7.1. Consideraciones generales para el diseño del refuerzo FRCM a flexión

En las figura 9 y 10 se puede observar dos vistas diferentes de la ubicación de los materiales que componen el sistema FRCM (malla estructural y mortero cementicio) reforzando una viga a flexión en la zona de tensión de la viga. El mortero cementicio cumple la función de adherirse con la malla estructural, actuando como un medio que transmite los esfuerzos soportados hacia la malla estructural. El mortero cementicio tiene la capacidad de resistir una pequeña cantidad de esfuerzos. El mortero cementicio también cumple con la función de proteger a la malla ante cualquier deterioro o reaccionar que pudiera perjudicarla.

En cuanto a las mallas, estas cuentan con cierta abertura o espaciamiento, con la finalidad de permitir el paso del mortero cementicio y para que sea bien adherido con la malla. Las mallas cumplen con la función de soportar los esfuerzos, con la finalidad de mejorar la capacidad del elemento.

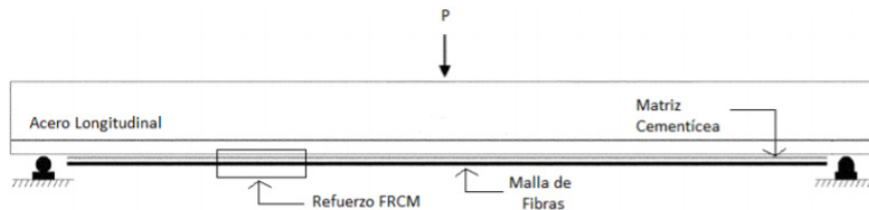


Figura 9: Representación esquemática del sistema FRCM
(Fuente: Salazar, 2016)

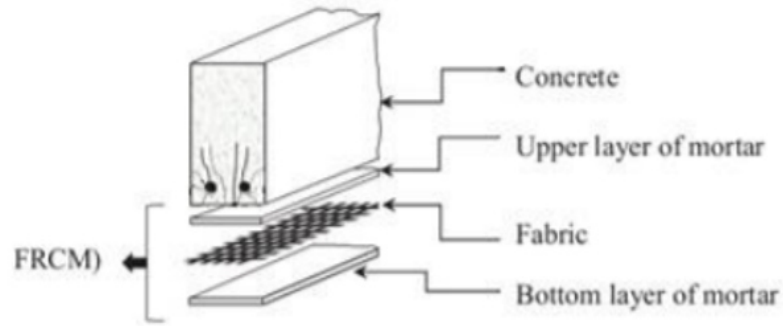


Figura 10: Representación esquemática del sistema FRCM
(Fuente: Gonzalez, 2020)

7.1.1. Verificación de la capacidad del elemento en condiciones de servicio

Para utilizar o aplicar el sistema de reforzamiento FRCM en una estructura de concreto, la estructura debe de cumplir con el requisito establecido en el código ACI 562 en condiciones de servicio. El código ACI 562 sirve de base para verificar una capacidad de resistencia mínima para garantizar la seguridad del elemento reforzado en caso de la falla del sistema. Según la norma mencionada la capacidad de la estructura previa a la instalación del refuerzo debe de ser al menos igual a la combinación de carga siguiente:

$$U \geq 1.D + 0.5L + Ak + 0.2S \quad (1)$$

Donde:

- U Capacidad estructura.
- D Cargas muertas.
- L Cargas vivas.
- Ak Cargas debidas a eventos externos.
- S Carga de nieve.

El factor de carga viva 0.5 puede ser remplazado por 1, si la carga viva se mantiene presente durante un tiempo largo. No se considera viento y sismo ya que es poco probable que le ocasione daño al refuerzo.

7.1.2. Hipótesis de diseño

Para el análisis de una sección se deben de tomar en cuenta los siguientes supuestos:

- Secciones planas permaneces planas luego de aplicar la carga.

- Unión entre el FRCM y las superficies se mantienen efectivas.
- La deformación máxima del concreto es 0.003.
- El sistema FRCM tiene un comportamiento bilineal de falla donde solo la segunda parte lineal de la curva es usada para el análisis y diseño.

7.1.3. Modos de falla

Cuando se está realizando un reforzamiento a flexión en una viga de concreto la resistencia a flexión depende del modo de falla que controla al diseño. El análisis considera los siguientes modos de falla, tanto para una sección reforzada con FRCM, como para las fallas en dicho sistema.

Los modos de falla para una sección reforzada FRCM incluyen:

- Falla del concreto en compresión antes de trabajar el acero de refuerzo.
- Fluencia del acero seguido de la falla del concreto.
- Fluencia de acero seguido por la falla del sistema FRCM.
- Falla del sistema FRCM.

Los modos de falla para el sistema FRCM incluyen:

- Delaminación por corte o tensión del concreto.
- Desunión del sistema FRCM con el concreto.
- Desunión interlaminar (deslizamiento de las fibras).
- Deslizamiento de la malla dentro de la matriz cementicia.

7.1.4. Consideraciones de diseño para viga reforzada con sistema FRCM

La Figura 11 representa una sección rectangular de una viga reforzada con el sistema FRCM, mostrando las deformaciones unitarias, esfuerzos y fuerzas resultantes. En la segunda figura se puede observar la variación de las deformaciones unitarias, las cuales varían en proporción a la distancia del eje neutro. En la tercera imagen se puede apreciar los esfuerzos de los materiales de acorde a las deformaciones unitarias. Por último, se observa las fuerzas resultantes de los materiales obtenidas del esfuerzo por el área del material que componen la viga rectangular reforzada.

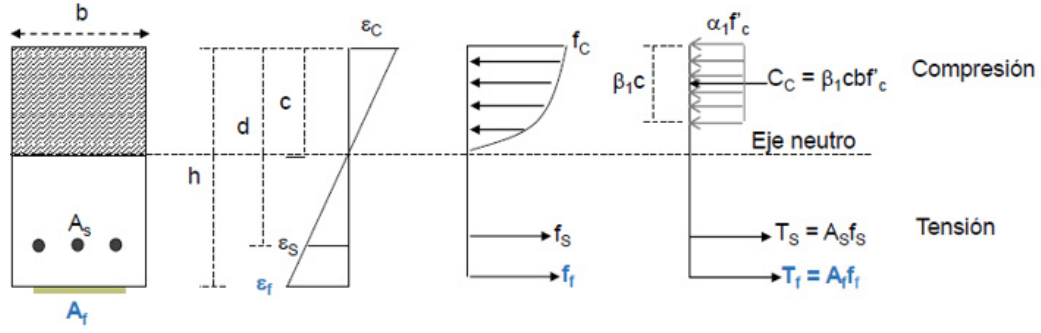


Figura 11: Esquema deformaciones y fuerzas a nivel de sección
(Fuente: Rosada, 2019)

Deformaciones en los elementos resistentes:

→Para el refuerzo FRM:

La efectividad de la deformación por tensión del sistema FRM alcanzado en la falla ε_{fe} , se rige por el nivel de deformación desarrollado en la malla en el punto donde el hormigón se aplasta a compresión o en el punto donde el sistema FRM se despega del estrato. Siendo verificada la deformación real del estrato sobre el que se instala el FRM, restándole la deformación inicial calculada para las condiciones de carga al momento de la instalación.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} \leq 0.012 \quad (2)$$

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{bi} = M \left(\frac{h - c_{cr}}{I_{cr} E_c} \right) \quad (4)$$

Donde:

ε_{fe} Deformación unitaria en el sistema FRM.

ε_{cu} Deformación unitaria en el concreto.

ε_{fd} Deformación por tensión del material compuesto.

h Altura.

c Profundidad a eje neutro.

ε_{bi} Deformación inicial en el sustrato antes de colocar el sistema FRM.

M Momento en la viga debido a las cargas. presentes.

E_c Módulo de elasticidad del concreto.

I_{cr} Momento de inercia fisurado.

C_{cr} Distancia desde el extremo a compresión hasta el eje neutro.

La deformación unitaria del sistema FRCM se limita al 0.012 para evitar que el sistema FRCM se desprenda de la superficie adherida. Inicialmente se puede comenzar suponiendo la distancia del eje neutro como dos veces el peralte efectivo de la viga.

→Para el concreto a compresión:

La deformación del concreto está regulado por las siguientes condiciones:

$$Si \quad \varepsilon_{fe} \leq \varepsilon_{fd} \quad \varepsilon_c = 0.003 \quad (5)$$

$$Si \quad \varepsilon_{fe} \geq \varepsilon_{fd} \quad \varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{c}{h - c} \right) \quad (6)$$

→Para el acero a tension:

La deformación del acero está regulado por la siguiente condición:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{h - c} \right) \quad (7)$$

Esfuerzos en los elementos resistentes:

→Para el refuerzo FRCM:

La efectividad de tensión a tracción del sistema FRCM alcanzado en la falla f_{fe} en el sistema de reforzamiento FRCM se define en función del módulo de elasticidad del refuerzo, debe de ser calculado como se define a continuación.

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (8)$$

Donde:

$$\varepsilon_{fe} \leq \varepsilon_{fd} \quad (9)$$

Donde:

f_{fe} Esfuerzo efectivo en el FRCM.

E_f Módulo de elasticidad a tensión del FRCM, MPa.

→Para el acero a tensión:

El esfuerzo del acero está regulado por las siguientes condiciones:

$$Si \quad \varepsilon_s \geq \varepsilon_y \quad f_s = f_y \quad (10)$$

$$Si \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \quad f_s = E_s \varepsilon_s \quad (11)$$

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \quad (12)$$

Donde:

f_s Esfuerzo del acero.

E_s Módulo de elasticidad del acero.

f_y Resistencia a la fluencia del acero.

ε_y Deformación unitaria de un miembro sujeto a flexión.

ε_s Deformación por tensión neta en el refuerzo de acero a tensión con resistencia nominal.

Fuerza resultante en elementos resistentes:

→Para el refuerzo FRCM:

$$F_{fe} = n f_{fe} W_f A_f \quad (13)$$

→Para el refuerzo de acero a tensión:

$$F_s = f_s A_s \quad (14)$$

→Para el refuerzo de concreto a compresión:

$$F_c = \alpha_1 f'_c \beta_1 c b \quad (15)$$

Donde:

N Número de capas.

W_f Ancho de la tira FRCM.

A_f Área de la malla FRCM por unidad de ancho.

A_s Área del acero.

f'_c Resistencia del concreto.

b Ancho de la viga.

β_1 Parámetro que depende de la resistencia mínima a compresión del concreto.

La resistencia a flexión es calculada mediante la siguiente ecuación:

$$\phi_m M_n \geq M_u \quad (16)$$

$$\phi_m M_n = \phi_m (M_s + M_f) \quad (17)$$

$$M_s = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (18)$$

$$M_f = n A_f W_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (19)$$

Donde:

M_n Momento nominal a flexión del elemento.

M_s Momento nominal a flexión del acero.

M_f Momento nominal a flexión del sistema FRCM.

ϕ_m Factor de reducción.

→Para viga simplemente reforzada:

$$\phi_m M_n = \phi_m \left[A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 C}{2} \right) + n A_f w_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 C}{2} \right) \right] \quad (20)$$

→Para viga doblemente reforzada:

$$\phi_m M_n = \phi_m \left[A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 C}{2} \right) + n A_f w_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 C}{2} \right) + A'_s f_{s'} \left(\frac{\beta_1 C}{2} - d' \right) \right] \quad (21)$$

El factor de reducción está definido por el ACI 318 y ACI 562 como:

$$\phi_m = 0.90 \quad \text{para} \quad \varepsilon_t \geq 0.005 \quad (22)$$

$$\phi_m = 0.65 + \frac{0.25(\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} \quad \text{para} \quad \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0.005 \quad (23)$$

$$\phi_m = 0.65 \quad \text{para} \quad \varepsilon_t < \varepsilon_{sy} \quad (24)$$

Donde:

ε_t Deformación por tensión neta en el refuerzo de acero a tensión con resistencia nominal.

ε_{sy} Deformación por tensión del acero.

Chequeo para estado de servicio:

Para evitar la fluencia plástica y la fatiga en el FRCM debido a los esfuerzos soportados, la tensión del refuerzo FRCM f_{fs} debe de ser menor o igual a los valores de la Figura 12, dependiendo el tipo de fibra utilizado se toman en consideración los siguientes valores,

Table 11.1.3—Creep rupture and fatigue stress limits for reinforcement based on fiber type

	Fiber type				
	AR glass	Aramid	Basalt	Carbon	PBO
Creep rupture and fatigue	0.20 f_{fd}	0.30 f_{fd}	0.20 f_{fd}	0.55 f_{fd}	0.30 f_{fd}

Figura 12: Ruptura por fluencia y fatiga según el tipo de fibra
(Fuente: ACI 549.4R-13.)

Donde:

f_{fs} Tensión del refuerzo FRCM, bajo las cargas de servicio.

f_{fd} Tensión del diseño efectivo del refuerzo FRCM.

Para controlar deflexiones y fisuraciones debidas a deformaciones inelásticas, la deformación por tensión del acero reforzado bajo las cargas de servicio f_{ss} , deben de estar limitadas al 80 por ciento del límite elástico del acero, como lo indica la siguiente ecuación:

$$f_{ss} \leq 0.80f_y \quad (25)$$

Donde:

f_{ss} Tensión del acero, bajo las cargas de servicio

7.1.5. Limitaciones del diseño

- Los hilos de fibra de dirección primaria (PD) deben orientarse paralelos a los ejes principales del elemento, con una alineación de no más de ± 5 grados de la orientación de dicho eje.
- No se puede utilizar para mejorar la resistencia a la flexión de los miembros en las regiones plásticas de los marcos de momento dúctil que resisten cargas sísmicas.
- Para limitar la fuerza total por unidad de ancho transferida al concreto, el aumento en la resistencia a la flexión proporcionada por el refuerzo FRCM no debe exceder el 50 por ciento de la capacidad original de la estructura. Se debe de verificar antes de aplicar el factor de reducción de resistencia.

7.2. Diseño de viga de acuerdo al código ACI 318-14.

La viga de concreto se diseñó bajo la norma ACI 318-14, considerando que será ensayada como simplemente apoyada con carga al centro. La viga se diseñó cumpliendo todos los requisitos estipulados en dicha norma para ser ensayada a flexión. El diseño de la viga sirvió de base para realizarle un reforzamiento a flexión mediante el sistema FRCM, para ser ensayada de igual manera con refuerzo.

7.2.1. Características de la viga diseñada

Las vigas de concreto se trabajaron de 10 cm por 20 cm, con un largo de 1.20 m, para ser cargadas hasta 4.71 toneladas. Se utilizó acero grado 40 de AG en el reforzamiento de las vigas, obteniendo la siguiente distribución como se muestra en las figuras 14 y 15:

Calculo del momento nominal de la viga

$$A_{s2} := \frac{A'_s \cdot f'_s}{f_y} = 0.08 \text{ cm}^2$$
$$A_{s1} := A_s - A_{s2} = 2.454 \text{ cm}^2$$
$$M_n := A_{s1} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) + A_{s2} \cdot f'_s \cdot (d - d') = 1179.268 \text{ kgf} \cdot \text{m} \quad \text{Momento Nominal}$$

Figura 13: Resultados viga diseñada
(Fuente: Elaboración propia)

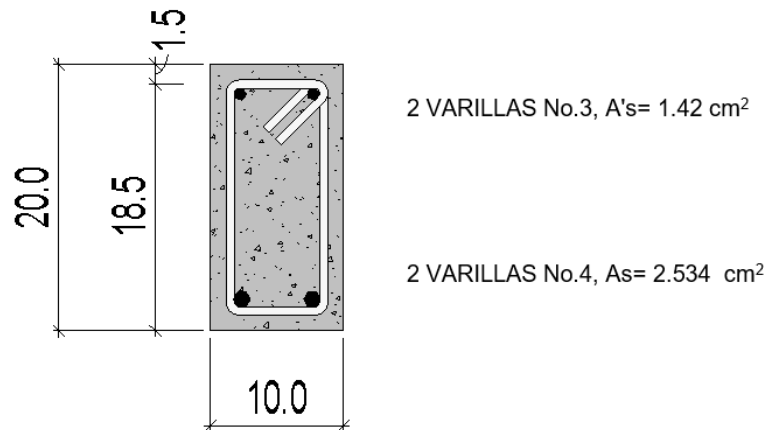


Figura 14: Sección transversal de la viga diseñada
(Fuente: Elaboración propia)

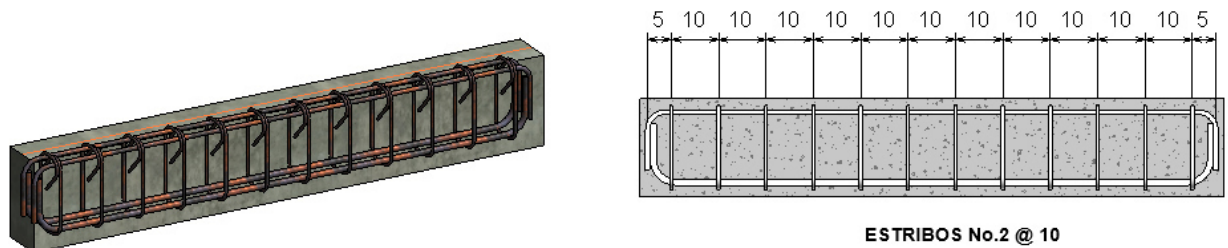


Figura 15: Sección longitudinal de la viga diseñada
(Fuente: Elaboración propia)

Nota: Unidades en cm

7.3. Diseño de viga reforzada a flexión de acuerdo al código ACI 549.4R-13.

Tomando en cuenta la viga rectangular diseñada, se le realizaron dos análisis de reforzamiento a flexión. Diferenciándolas, una con otra con la cantidad de capas aplicadas, el primer análisis con una capa de reforzamiento y el segundo análisis con dos capas de reforzamiento. Se realizaron dos análisis con la finalidad de verificar cuando incrementa su capacidad de reforzamiento una con otra, y su aumento en relación a la viga convencional.

7.3.1. Características de las vigas reforzadas a flexión

A continuación, se detallan los resultados obtenidos del reforzamiento a flexión realizado a la viga rectangular diseñada, tomando en cuenta que se realizaron dos análisis de reforzamiento, dichos diseños fueron aplicados en la viga armada para posteriormente ser ensayadas.

Resultados del reforzamiento con una capa del sistema FRCM:

Al aplicarle el refuerzo, la viga es capaz de ser cargada hasta 6.11 toneladas con una capa del sistema FRCM. Incrementando su capacidad a flexión a un 30 por ciento más que la viga sin refuerzo. El porcentaje de incremento es calculado por medio del momento nominal final de la viga reforzada dentro del momento nominal de la viga sin refuerzo.

Calculo del momento flector nominal de la viga reforzada con el sistema FRCM

$$\phi M_n = \phi (M_s + M_f)$$

Momento nominal a flexion de la viga reforzada

$$M_s := A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) = 1185.963 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Momento nominal a flexión del acero

$$M_f := n \cdot f_{fc} \cdot w_f \cdot A_f \cdot \left(h - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) = 341.287 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Momento nominal a flexión del sistema FRCM

$$\text{if} (\epsilon_s \geq 0.005, \text{"}\phi=0.90\text{"}, \text{"}\phi \text{ no es } 0.90\text{"}) = \text{"}\phi=0.90\text{"}$$

Chequeo del factor de reducción

$$\therefore \quad \phi := 1$$

$$\phi M_n := \phi \cdot (M_s + M_f) = 1527.25 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Momento nominal final

Figura 16: Resultados del reforzamiento con 1 capa
(Fuente: Elaboración propia)

Resultados del reforzamiento con dos capas del sistema FRCM:

Al aplicarle el refuerzo, la viga es capaz de ser cargada hasta 6.94 toneladas con dos capas del sistema FRCM. Incrementando su capacidad a flexión hasta un 47 por ciento más que la viga sin refuerzo. El porcentaje de incremento es calculado por medio del momento nominal final de la viga reforzada dentro del momento nominal de la viga sin refuerzo.

Calculo del momento flector nominal de la viga reforzada con el sistema FRCM

$$\phi M_n = \phi (M_s + M_f)$$

Momento nominal a flexion de la viga reforzada

$$M_s := A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) = 1167.87 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Momento nominal a flexión del acero

$$M_f := n \cdot w_f \cdot A_f \cdot f_{fc} \cdot \left(h - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) = 566.529 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Momento nominal a flexión del sistema FRCM

$$\text{if} (\epsilon_s \geq 0.005, \text{"}\phi=0.90\text{"}, \text{"}\phi \text{ no es } 0.90\text{"}) = \text{"}\phi=0.90\text{"}$$

Chequeo del factor de reducción

$$\therefore \quad \phi := 1$$

$$\phi M_n := \phi \cdot (M_s + M_f) = 1734.399 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Momento nominal final

Figura 17: Resultados del reforzamiento con 2 capas
(Fuente: Elaboración propia)

Elaboración de vigas e instalación del sistema FRCM en las vigas

8.1. Descripción del proceso de la fabricación de las vigas

Se realizaron 5 vigas de concreto, de las 5 vigas elaboradas, 4 vigas serán utilizadas para aplicar el reforzamiento FRCM, dos vigas con una capa del sistema y 2 vigas con dos capas del sistema.

Para elaborar las vigas, primero se definieron las dimensiones tanto de las varillas longitudinales como de los estribos, con el fin de realizar los cortes exactos en las varillas comerciales de $3/8$, $1/2$ y $1/4$. Luego se cortaron las varillas y se fabricaron las varillas longitudinales con su escuadra y los estribos con su respectivo gancho.

Posteriormente, se procedió al armado de las vigas con las características de la sección 7.2.1. Luego, se armó la formaleta y se colocaron las armaduras en la formaleta, para ser fundidas. Por último, se realizó su respectivo curado.



Figura 18: Armadura de las vigas
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 19: Formaleta de las vigas
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 20: Colocación de la armadura en la formaleta
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 21: Fundición de vigas
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 22: Curado de vigas
(Fuente: Elaboración propia)

8.2. Instalación del reforzamiento FRCM en las 4 vigas

Para el reforzamiento de las vigas de concreto, se utilizó la malla C Mesh Gold 105 (PBO) más la matriz PBO-MX Gold Concrete. Para la preparación del mortero se utilizó la siguiente dosificación tomado en cuenta las condiciones o instrucción del mortero.

Dosificación del mortero		
Rendimiento del mortero	1.4	kg/m ² /mm
Viga 0.1 X 1.20 m	0.12	m ²
Para 2 capas de mortero	6	mm
Para 3 capas de mortero	9	mm
Cantidad de mortero estimado para una viga con 2 capas de mortero	1.008	kg
Cantidad de mortero estimado para una viga con 3 capas de mortero	1.512	kg
Cantidad de Mortero a Preparar	4	kg
Dosificación del agua		
Para un saco de 25 kg, se necesita 6.5 a 7 lts de agua.		
Para 25 kg	7	lt
Para 1 kg	0.28	lt
Para 1.51 kg	0.4228	lt
Para 4 kg	1.1	lt

Figura 23: Dosificación del mortero y agua
(Fuente: Elaboración propia)

Al reforzar las vigas se tomaron en cuenta todas las consideraciones descritas en el capítulo 5, sección 5.8. Aplicando el sistema de la siguiente manera:

A) Se verifico que la superficie a reforzar no tuviera ninguna irregularidad, y que estuviera libre de polvos, lechada y partículas. Tomando en cuenta que la efectividad del sistema FRCM depende del sustrato y la buena preparación de la superficie. Luego de verificar que la superficie estuviera en aptas condiciones para la aplicación del refuerzo, se humedeció la superficie.



Figura 24: Humedecido de la superficie a reforzar
(Fuente: Elaboración propia)

B) Luego de humedecer la superficie se preparó el mortero, tomando en cuenta las recomendaciones dadas por el proveedor y la hoja técnica del sistema. Aplicando el 90 por ciento de agua a los 4kg de mortero revolviéndolo durante 3 minutos, luego se aplicó el 10 por ciento de agua restante revolviéndolo durante 2 minutos. Luego de preparar el mortero se esperó 2-3 minutos para aplicar la primera capa de mortero de 3mm.



Figura 25: Primera capa de mortero
(Fuente: Elaboración propia)

C) Después de aplicar la primera capa de mortero, se esperó un minuto para aplicar la malla sobre el mortero, asegurándose que la malla estuviera lo más estirada posible y alineada a la superficie.



Figura 26: Colocación de la malla
(Fuente: Elaboración propia)

D) Luego de colocar la malla, se esperó un minuto para aplicar la última capa de mortero, con un espesor de 3mm asegurándose que la malla estructural fuera cubierta por completo.



Figura 27: Colocación de la última capa del mortero
(Fuente: Elaboración propia)

E) Por último, se agregó un refuerzo transversal en ambas esquinas a 5 cm de la esquina, esto para evitar la delaminación de la malla al momento de ser ensayadas. Tomando el mismo criterio de colocación que el refuerzo longitudinal.



Figura 28: Refuerzo transversal
(Fuente: Elaboración propia)

Para el reforzamiento de las vigas donde se utilizaron dos capas de malla, el procedimiento fue el mismo, la única variación que se tuvo, fue que luego de la colocación de la segunda capa del mortero, se colocó otra capa de malla asegurándose que estuviera bien estirada y alineadas para su buena adherencia con el mortero. Luego se colocó la última capa de mortero (3 capa de mortero), asegurándose que esta cubriera por completo la malla estructural. Por último, se agregó el refuerzo transversal para evitar la delaminación.

Ensayo a compresión de los especímenes de concreto

Los ensayos de las probetas de resistencia a compresión se realizaron para determinar que el concreto utilizado en las vigas cumple con la resistencia especificada en las bolsas de concreto utilizadas. Para la fabricación de las vigas se utilizó un concreto pre mezclado con una resistencia de 210 kgf/cm² (3000psi). Fue necesario obtener el valor de la resistencia a compresión de los especímenes, ya que se necesitaba saber el valor de la resistencia del concreto que se había alcanzado a los 28 días, para re ajustar los cálculos tanto de la viga diseñada como de las vigas reforzadas, esto con la finalidad de conocer la carga máxima a soportar de las vigas.

Los especímenes cilíndricos de concreto se trabajaron mediante la norma ASTM C 31 (Práctica para la elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto en la obra). Se ensayaron mediante la norma ASTM C39 (Fuerza a compresión de las muestras de concreto del cilindro).

Este método consiste en aplicar una carga axial de compresión a cilindros o núcleos moldeados a una velocidad que está dentro de un intervalo prescrito hasta que se produce un fallo. La resistencia a la compresión de la muestra se calcula dividiendo la carga máxima obtenida durante el ensayo por el área de la sección transversal de la muestra.

9.1. Fabricación de los especímenes de concreto

Para los ensayos a compresión se fabricaron 2 especímenes de 15 cm x 30 cm, utilizando moldes normados, y tomando en cuenta todas las especificaciones de la norma ASTM C 31 para su elaboración y curado de cilindros, con la finalidad de evitar cualquier tipo de inconveniente al momento de ser ensayados.



Figura 29: Elaboración de los cilindros
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 30: Cilindros uno y dos
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 31: Desencofrado y curado de cilindros
(Fuente: Elaboración propia)

9.2. Resultados de los ensayos a compresión de los especímenes

Los dos cilindros elaborados fueron sometidos a pruebas de compresión, con la finalidad de conocer la resistencia, ambos cilindros obtuvieron una falla tipo 5, presentando fracturas en los lados de las partes superior e inferior. A continuación se detallan los siguientes resultados a los 34 días:

No	Fecha de realización	Fecha de ensayo	Área (cm ²)	Carga Maxima (kgf)	Resistencia a la compresión (kgf/cm ²)	Promedio (kgf/cm ²)	Tipo de falla
1	8/8/2020	11/9/2020	180.838	50146.451	277.3	295	5
2	8/8/2020	11/9/2020	181.484	56911.327	313.6		5

Cuadro 3: Resultados de los ensayos a compresión
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 32: Ensayo de cilindro No.1
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 33: Ensayo de cilindro No.2
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 34: Ensayo de cilindro No.2
(Fuente: Elaboración propia)

Descripción y resultados de los ensayos a flexión

10.1. Norma de ensayo a flexión NTG 41017 h8 (ASTM C293)

Uno de los principales objetivos de esta norma, es la determinación del esfuerzo a flexión en vigas de concreto, usando especímenes de concreto ensayados como una viga simplemente apoyada con una carga puntual en el centro de la luz. La determinación de la resistencia a flexión tendrá variaciones cuando se tengan diferentes características de especímenes.

Para ensayar, tanto la viga no reforzada como las vigas reforzadas a flexión, se tomaron en cuenta todos los criterios establecidos en la norma, el equipo de ensayo está conformado por un bloque de aplicación de carga y dos bloques que soportan las vigas.

10.2. Ensayo y resultados de las 5 vigas

Resultados viga sin reforzamiento:

La viga de concreto logro soportar una carga máxima de 5187 kgf y alcanzo una deformación de 24mm.

Viga Ensayada	Dimensiones (cm)			Distancia entre apoyos (cm)	Carga teórica a soportar (kgf)	Carga max soportada (kgf)	Deformación max (mm)	% Error
	Ancho	Altura	Largo					
Viga sin refuerzo	10	20	120	100	4717	5187	24	9.07

Cuadro 4: Resultados viga sin reforzamiento
(Fuente: Elaboración propia)

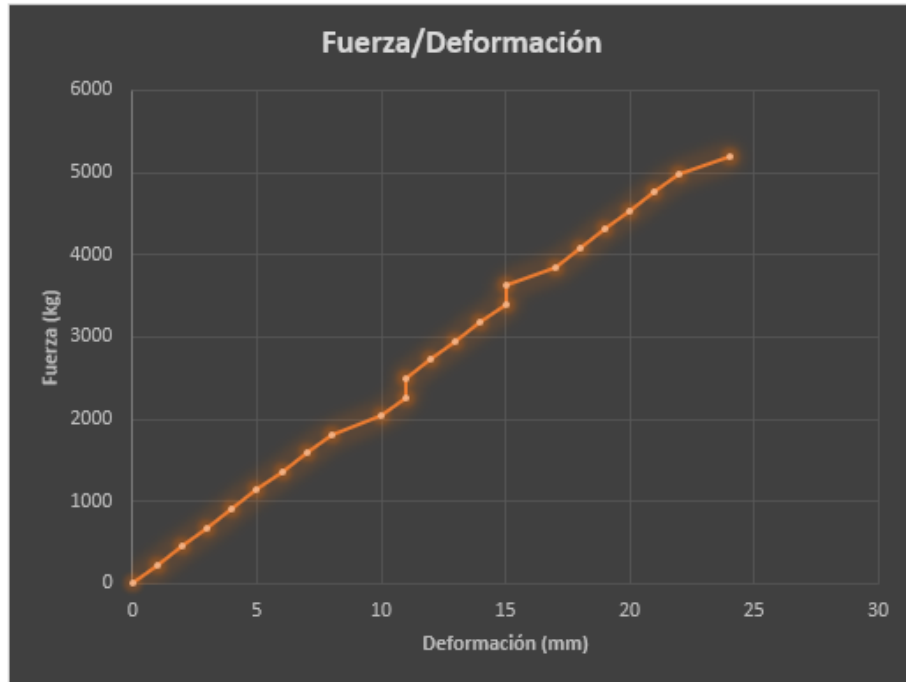


Figura 35: Gráfica fuerza/deformación de viga sin refuerzo
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 36: Viga previo a ser ensayada
(Fuente: Elaboración propia)

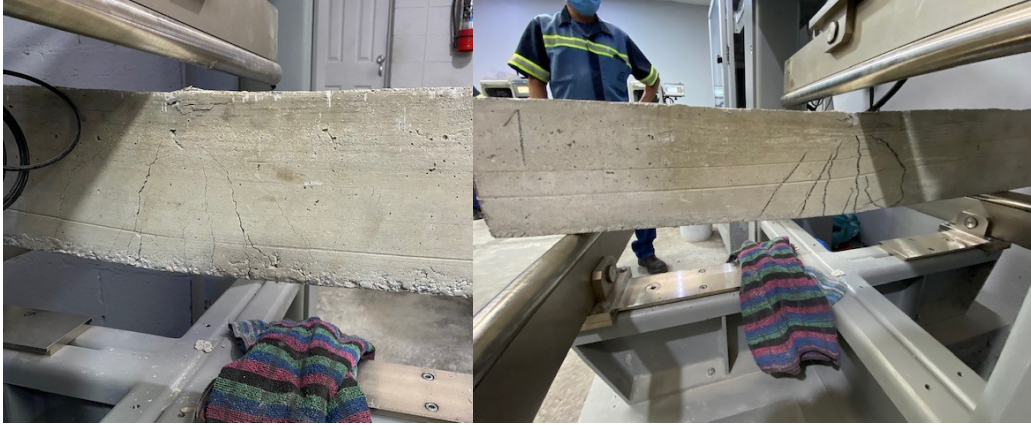


Figura 37: Viga ensayada
(Fuente: Elaboración propia)

Resultados primera viga con una capa de reforzamiento FRCM:

La primera viga de concreto reforzada con una capa de malla logro soportar una carga máxima de 6401 kgf y alcanzo una deformación de 31mm.

Viga Ensayada	Dimensiones (cm)			Distancia entre apoyos (cm)	Carga teórica a soportar (kgf)	Carga max soportada (kgf)	Deformación max (mm)	% Error
	Ancho	Altura	Largo					
Viga con una capa de FRCM	10	20	120	100	6109	6401	31	4.56

Cuadro 5: Resultados primera viga reforzada con una capa de malla
(Fuente: Elaboración propia)

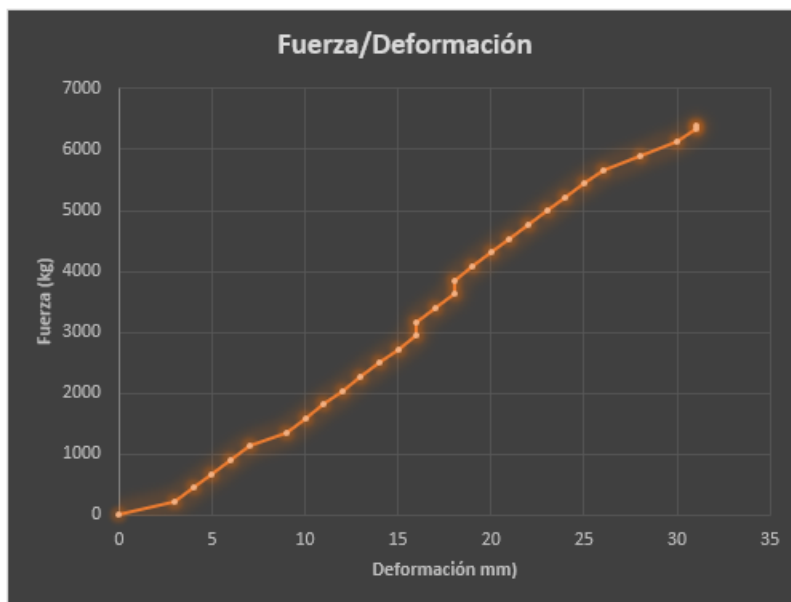


Figura 38: Gráfica fuerza/deformación de primera viga con una capa de malla
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 39: Viga previo a ser ensayada
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 40: Viga ensayada
(Fuente: Elaboración propia)

Resultados segunda viga con una capa de reforzamiento FRCM:

La segunda viga de concreto reforzada con una capa de malla logro soportar una carga máxima de 6327 kgf y alcanzo una deformación de 33 mm.

Viga Ensayada	Dimensiones (cm)			Distancia entre apoyos (cm)	Carga teórica a soportar (kgf)	Carga max soportada (kgf)	Deformación max (mm)	% Error
	Ancho	Altura	Largo					
Viga con 1 capa de FRCM	10	20	120	100	6109	6327	33	3.45

Cuadro 6: Resultados segunda viga reforzada con una capa de malla
(Fuente: Elaboración propia)

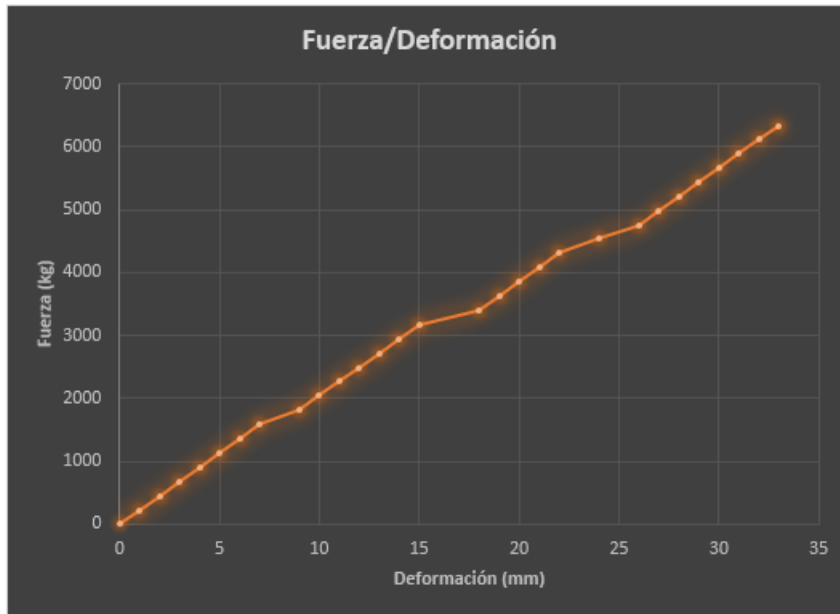


Figura 41: Gráfica fuerza/deformación de segunda viga con una capa de malla
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 42: Viga previo a ser ensayada
(Fuente: Elaboración propia)

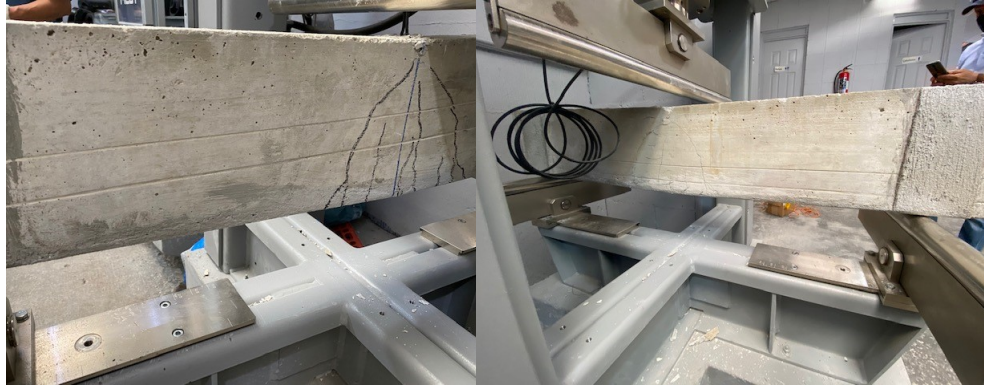


Figura 43: Viga ensayada
(Fuente: Elaboración propia)

Resultados primera viga con dos capas de reforzamiento FRCM:

La primera viga de concreto reforzada con dos capas de malla logro soportar una carga máxima de 7239 kgf y alcanzo una deformación de 39 mm.

Viga Ensayada	Dimensiones (cm)			Distancia entre apoyos (cm)	Carga teórica a soportar (kgf)	Carga max soportada (kgf)	Deformación max (mm)	% Error
	Ancho	Altura	Largo					
Viga con dos capas de FRCM	10	20	120	100	6938	7239	39	4.16

Cuadro 7: Resultados primera viga reforzada con dos capas de malla
(Fuente: Elaboración propia)

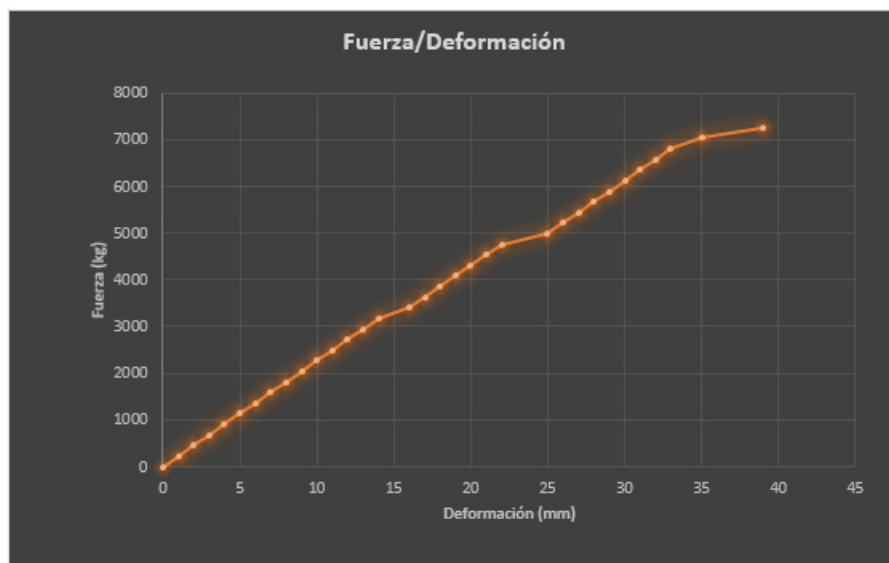


Figura 44: Grafica fuerza/deformación de primera viga con dos capas de malla
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 45: Viga previo a ser ensayada
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 46: Viga ensayada
(Fuente: Elaboración propia)

Resultados segunda viga con dos capas de reforzamiento FRCM:

La segunda viga de concreto reforzada con dos capas de malla logro soportar una carga máxima de 6854 kgf y alcanzo una deformación de 42 mm.

Viga Ensayada	Dimensiones (cm)			Distancia entre apoyos (cm)	Carga teórica a soportar (kgf)	Carga max soportada (kgf)	Deformación max (mm)	% Error
	Ancho	Altura	Largo					
Viga con dos capas de FRCM	10	20	120	100	6938	6864	42	-1.1

Cuadro 8: Resultados segunda viga reforzada con dos capas de malla
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 47: Gráfica fuerza/deformación de segunda viga con dos capas de malla
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 48: Viga previo a ser ensayada
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 49: Viga ensayada
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis y comparación de resultados de los ensayos a flexión

Los resultados obtenidos de los ensayos cumplieron con los objetivos planteados, logrando verificar la funcionalidad y validez del sistema FRCM. Se debe tomar en cuenta, que en los cálculos de la viga diseñada y de las vigas reforzadas se utilizó un promedio de los resultados de los ensayos a compresión del concreto utilizado para la fundición de las vigas. Únicamente se realizaron dos especímenes para las cinco vigas fundidas, por lo que se recomienda para futuras pruebas hacer mínimo de 3 a 4 ensayos a compresión, para tener un margen de error más pequeño o variaciones menores de resultados comparando lo teórico con lo experimental.

No Viga	Carga maxima experimental (kgf)	Deformación máxima (mm)
V1 - Sin Refuerzo	5187	24
V2 - Una Capa	6401	31
V3 - Una Capa	6327	33
V4 - Dos Capas	7239	39
V5 - Dos Capas	6864	42

Cuadro 9: Resultados ensayos a flexión
(Fuente: Elaboración propia)

En el Cuadro 9 se muestran los resultados experimentales obtenidos de las 5 vigas ensayadas, una viga sin refuerzo y cuatro vigas con refuerzo FRCM, donde se detallan las cargas máximas soportadas de cada viga, y su respectiva deformación máxima alcanzada en su punto de falla.

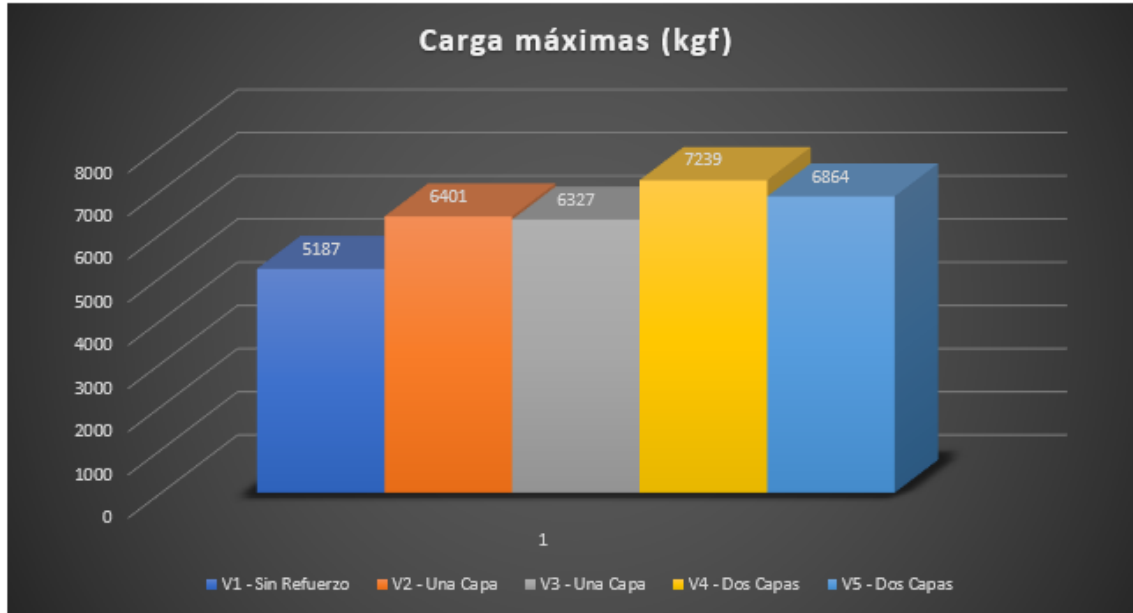


Figura 50: Comparación cargas máximas de cada ensayo
(Fuente: Elaboración propia)

De los resultados mostrados en la Figura 50, observamos como se da el incremento de la capacidad de carga de falla de una viga reforzada con el sistema FRCM con respecto a la de una viga convencional o no reforzada. Se aprecia como las vigas reforzadas con una y dos capas de malla poseen una mayor capacidad. Las vigas con una capa de malla incrementaron su capacidad de carga en un 22 y 23 por ciento, y las vigas con dos capas de malla incrementaron su capacidad de carga en un 32 y 40 por ciento.

Se puede apreciar que la capacidad de incremento de carga está dada en función de la cantidad de mallas aplicadas. Se logró corroborar como la segunda capa de malla soporta un poco menos de resistencia en proporción a una capa de malla, esto debido a la limitante de la capacidad de transferencia de esfuerzos por unidad de área entre la malla, el mortero y la superficie del elemento. Con una capa de malla se logró incrementar 1177 kgf y con dos capas de malla se incrementó una carga de 1864 kgf, siendo el aporte de agregar una segunda capa un 58 por ciento de lo que aportaba la primera por si sola.

Estas pérdidas debido a la transferencia de esfuerzos, hacen referencia a lo recomendado por la norma ACI 549 de limitar la cantidad de capas utilizadas y no exceder el 50 por ciento de la capacidad a flexión original del elemento a reforzar. A mayor cantidad de refuerzo, menor será la eficiencia del mismo. En resumen, se observó en los resultados experimentales, que con una capa de malla se logra un incremento de aproximadamente un 23 por ciento de la capacidad original a flexión y con dos capas, un 36 por ciento. En los resultados teóricos se observó que con una capa de malla se logra un incremento de aproximadamente un 30 por ciento de la capacidad original a flexión y con dos capas, un 47 por ciento.

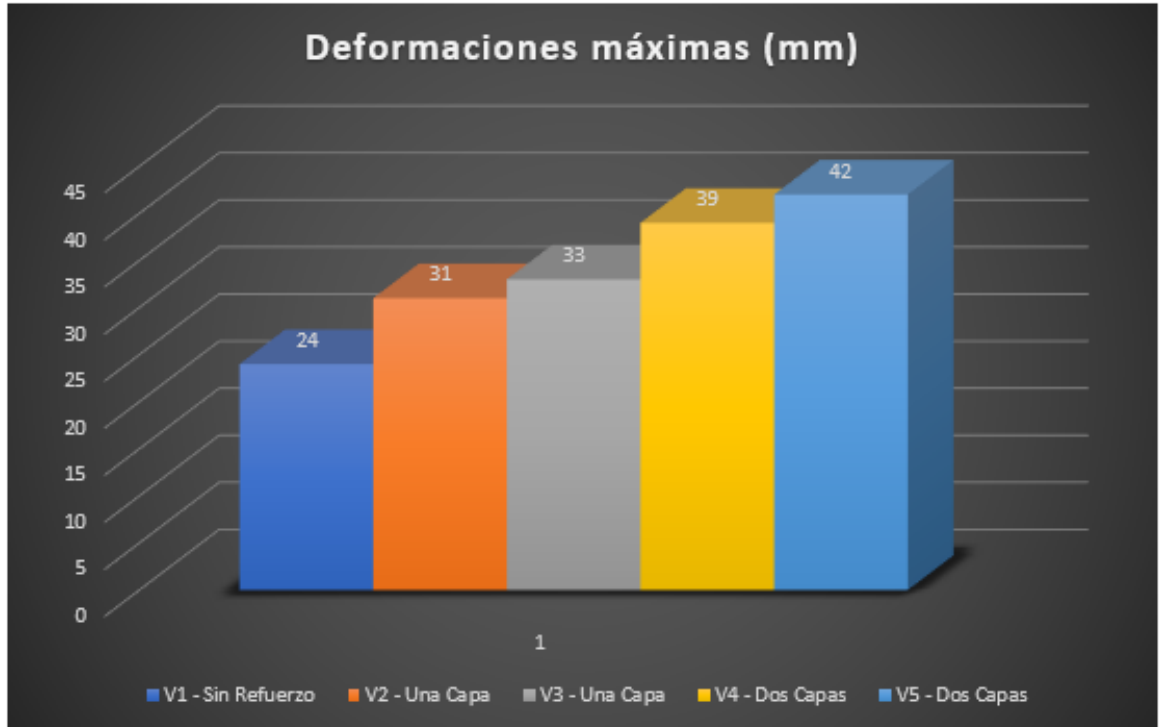


Figura 51: Comparación deformaciones máximas de cada ensayo
(Fuente: Elaboración propia)

Comparando las deformaciones máximas de la viga sin refuerzo y de las vigas con refuerzo, se puede apreciar en la Figura 51 que se obtuvo un aumento de casi 1 cm de deformación en la viga reforzada con una capa de malla en relación a la viga no reforzada, y un aumento de casi 2 cm de deformación en la viga reforzada con dos capas de malla en relación a la no reforzada. Estos aumentos de deformaciones eran de esperarse, ya que la deformación depende de la carga y la rigidez de la viga, y el refuerzo brinda un aporte mínimo a la rigidez del elemento.

Además, al haber realizado los ensayos a flexión de las 5 vigas, se observó como la viga sin refuerzo obtuvo una falla dúctil, acorde a lo esperado según los criterios de diseño utilizados, donde se establece que al momento de alcanzar la máxima deformación unitaria del concreto el acero tuvo que comenzar a ceder fluencia significativamente antes de que ocurriera la falla. En los ensayos de las vigas reforzadas también se tuvo un modo de falla dúctil, pues se llegó primero a la falla por delaminación del refuerzo FRCM, seguida por la fluencia del refuerzo a flexión.

Esto da validez a los criterios de diseño orientados a alcanzar la falla en el acero de refuerzo antes de que ocurra aplastamiento en el concreto. En los ensayos se notó primero como comenzaron a producirse las fisuras en el centro de la viga. Después, se notó el comienzo de la delaminación o separación del refuerzo de la superficie adherida, por último, se observó como luego de fallar el sistema FRCM, el acero fluyó, manteniendo su capacidad de carga a medida que aumentaba la deformación en la viga hasta alcanzar la falla.

No Viga	Carga maxima teórica (kgf)	Carga máxima experimental (kgf)	%Error
V1 - Sin Refuerzo	4717	5187	9.07
V2 - Una Capa	6109	6401	4.56
V3 - Una Capa	6109	6327	3.45
V4 - Dos Capas	6938	7239	4.16
V5 - Dos Capas	6938	6864	-1.08

Cuadro 10: Comparación resultados teóricos y experimentales
(Fuente: Elaboración propia)

En el Cuadro 10 se muestra la comparación de los resultados teóricos con los experimentales de las 5 vigas trabajadas. Se obtuvo porcentajes de error menores al 5 por ciento en las vigas reforzadas con el sistema FRCM, lo cual nos da a entender que los cálculos del diseño de refuerzo de las vigas fueron trabajados correctamente, al igual que la aplicación del refuerzo superficial FRCM a las 4 vigas reforzadas. Esto demuestra la eficiencia, confiabilidad y funcionalidad del sistema de refuerzo.

La fiabilidad de los resultados, hace que el sistema de reforzamiento sea viable para proyectos de reparación y refuerzo estructural en Guatemala, considerando particularmente que es un país altamente sísmico, con varias estructuras antiguas y ricas en historia.

- Habiendo trabajado con los códigos ACI 318-14, ACI 549.4R-13 y ACI 562, los cuales se usan para el diseño de la viga convencional, y para la aplicación de los criterios de diseño de los refuerzos con sistemas FRCM, se considera que los mismos son claros, concisos y fáciles de interpretar y seguir.
- A partir de las pruebas de laboratorio realizadas a las vigas reforzadas con el sistema FRCM, los resultados teóricos y experimentales coincidieron con bajos márgenes de error, lo que da validez a los procesos de diseño y ejecución.
- Los ensayos demostraron la efectividad del sistema FRCM. Se pudo verificar el aumento de resistencia a flexión de las vigas mediante la comparación de los resultados de la viga sin refuerzo con las vigas reforzadas con una y dos capas. Los resultados demostraron que con una capa se alcanzó un incremento promedio del 23 por ciento y con dos capas se alcanzó un incremento promedio del 36 por ciento. Estos porcentajes varían dependiendo de las dimensiones, acero de refuerzo, resistencia del concreto, malla utilizada, condiciones de carga y apoyo del elemento intervenido con el sistema.
- Se analizó el comportamiento de las vigas reforzadas con el sistema FRCM sometida bajo esfuerzos de flexión, donde se observó que el sistema permite un incremento en la capacidad de carga manteniéndose un comportamiento de falla dúctil.

- Al diseñar e instalar los sistemas FRCM es indispensable seguir las consideraciones del proveedor y de las normas de diseño, ya que la efectividad del sistema depende de que ambos procesos sean desarrollados adecuadamente por personal capacitado.
- Se les recomienda a las universidades impartir clases de como reforzar estructuras y dar a conocer que tipos de reforzamiento existen hoy en día, debido a la frecuencia con la que actualmente es necesario reparar o reforzar estructuras debido a cambios de deterioro, problemas de durabilidad, cambios de uso, entre otros.
- Se le recomienda a AGIES crear una norma de reforzamiento de elementos estructurales o adaptar dentro de sus normativas los criterios de diseño de la norma ACI 549.4R-13, tomando en cuenta la efectividad del sistema corroborada en este trabajo.
- Se le recomienda a ICCG que incorpore dentro de sus investigaciones científicas y técnicas la aplicación del sistema de reforzamiento FRCM en el concreto y sus aplicaciones.
- Se recomienda tener en cuenta este sistema ante la ocurrencia de eventos sísmicos que ocasionen daños significativos a las estructuras. Cabe resaltar que, si bien no se analizó en este trabajo de graduación, el refuerzo FRCM también es muy funcional para refuerzos a cortante y confinamiento.
- Promover el sistema de reforzamiento FRCM en el mercado del concreto y las aplicaciones en sistemas constructivos que utilizan el cemento motivando a que sus usuarios estén con las tecnologías de punta.

Literatura citada:

- ACI 549.4R-13. *Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures*, American Concrete Institute, 2013.
- ACI 562-13, *Code Requirements for Evaluation, Repair, and Rehabilitation of Concrete Buildings*, American Concrete Institute, 2013.
- ACI 318-14, *Building Code Requirements of Structural Concrete and Commentary*, American Concrete Institute, 2014.
- González-Mañalich, K. M., Zamora-Díaz-Comas, O., Wainshtok-Rivas, H. (2020). *Bases para el diseño del reforzamiento de elementos de hormigón armado por medio de telas de mallas de fibras embebidas en matriz cementicia*. *Ciencia Futuro*, 10(1), 87-108.
- McCormac, J. Brown, Russell H. *Diseño de Concreto Reforzado*. 10a Edición. 2018. Alfaomega.
- Nanni, Antonio. (2012), *A New Tool for Concrete and Masonry Repair*.
- Norma NTG 41017 h8 (ASTM C293). *Método de ensayo. Determinación del esfuerzo de flexión en el concreto (Utilizando una viga simplemente soportada con carga al centro de la luz)*. Extraído de: https://conred.gob.gt/site/normas/NRD3/2_concreto/norma_ntg_41017_h_8_astm_c_293-c_293m-10.pdf
- Norma NTG 41017 h1 (ASTM C39). *Método de ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*. Extraído de: https://conred.gob.gt/site/normas/NRD3/2_concreto/NTG_41017_h1_ASTM_C39.pdf

- Norma NTG 41061 (ASTM C 31). *Práctica para la elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto en la obra*. Extraído de: https://conred.gob.gt/site/normas/NRD3/2_concreto/norma_coguanor_ntg_41061_astm_c_31.pdf
- Rosada, Mario. (2019). *Refuerzos estructurales con sistema FRCCM*.
- Ruredil. (2018). *Ruredil X Mesh Gold PBO*. Italia. 5a Edición. www.ruregold.it.
- Ruregold S.r.l. (2019). Catálogo General. Italia. www.ruregold.it.
- Ruredil. (2009). *Ruredil X Mesh Gold Refuerzo estructural “composite” especialmente estudiado para estructuras de hormigón*. Italia. www.ruregold.it.
- Martínez, M. (2016). *Guía para el Diseño de Refuerzos de Elementos Estructurales de Hormigón Armado Mediante Material Compuesto por Mallas de Fibras Minerales Embebidas en Matriz Cementícea (FRCCM)*. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile.

CAPÍTULO 15

Anexos



Figura 52: Anexo 1 – “Transporte del material”
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 53: Anexo 2 – “Corte de varillas”
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 54: Anexo 3 – “Elaboración de estribos”
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 55: Anexo 4 – “Trazo y distribución de estribos para armado de viga”
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 56: Anexo 5 – “Armado de vigas”
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 57: Anexo 6 – “Armado de formaleta”
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 58: Anexo 7 – “Mezcla del concreto”
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 59: Anexo 8 – “Aplicación del desencofrado en la formaleta”
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 60: Anexo 9 – “Fundición de vigas”
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 61: Anexo 10 – “Fundición de vigas 2”
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 62: Anexo 11 – “Vibrado del concreto”
(Fuente: Elaboración propia)

Informe No.: **86055**
 Emisión: **12/09/2020**
 O.T.: **22173-1**

**INFORME DE RESISTENCIAS A COMPRESIÓN
 ENSAYO ASTM C31, C470, C39, C617 Y C1231**

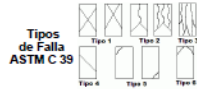


Proyecto: **TESIS - 2020** Cliente: **Kenneth Berduo**
 Dirección del proyecto: Residente: **Kenneth Berduo**
 Tipo de concreto: **3000** No. Camión: **0** No. Guía: Planta:
 Proveedor de concreto: **BOLSA MIXTO LISTO** Volumen m³: **0.00** Colocación: Fecha de Fundición: **11/08/20**
 Estructura: **TESIS - 2020** * Muestra elaborada y enviada por el interesado.

Correlativo Asignado	Fecha Hechura	Fc psi	Rel. A/C	Slump Pulg.	Temp. Con °C	Temp. Amb °C	% Aire	Peso Planta Kg	Peso Unitario Kg	Volumen Producido MP	Rend. Relativo	Edad Rotura días	Fecha Rotura	Peso Cilindro Lbs	Diametro Promedio Pulg	Area Pulg²	Carga Libras Fuerza	Tipo Falla	Individual psi	Rango psi	Prom. psi	%Fc
10287	11/08/20	3,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31	11/09/20	29.90	5.98	28.03	110,554	5	3,044			
10288	11/08/20	3,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31	11/09/20	29.77	5.98	28.13	125,478	5	4,461	518	4,202	140%

 Última Línea

Observaciones * Muestra elaborada y enviada por el interesado.
 O.T. Orden de Trabajo, Fc Resistencia especificada a 28 días.
 Vol/Volumen, Slump Asentamiento, Temp. Temperatura.
 Con. Concreto, Amb. Ambiente, Rend. Rendimiento
 D Directo, B Bombeado



Revisión
 Ing. Estuardo Palencia, Colegiado 4030, Certificación ACI
 Grado 1 y 2 Inspector de obras de concreto ID # 01092277

Seillo

PROQUALITY INGENIERIA Y CALIDAD ESTRUCTURAL

6 Avenida "A" 0-25, Zona 2 de Mixco, Colonia El Tesoro • Guatemala, Guatemala
 Tel.: (502) 2250-7855 y 2250-7862 • laboratorio@proquality.com.gt

Figura 63: Anexo 12 – “Informe de los especímenes ensayados”
 (Fuente: Elaboración propia)

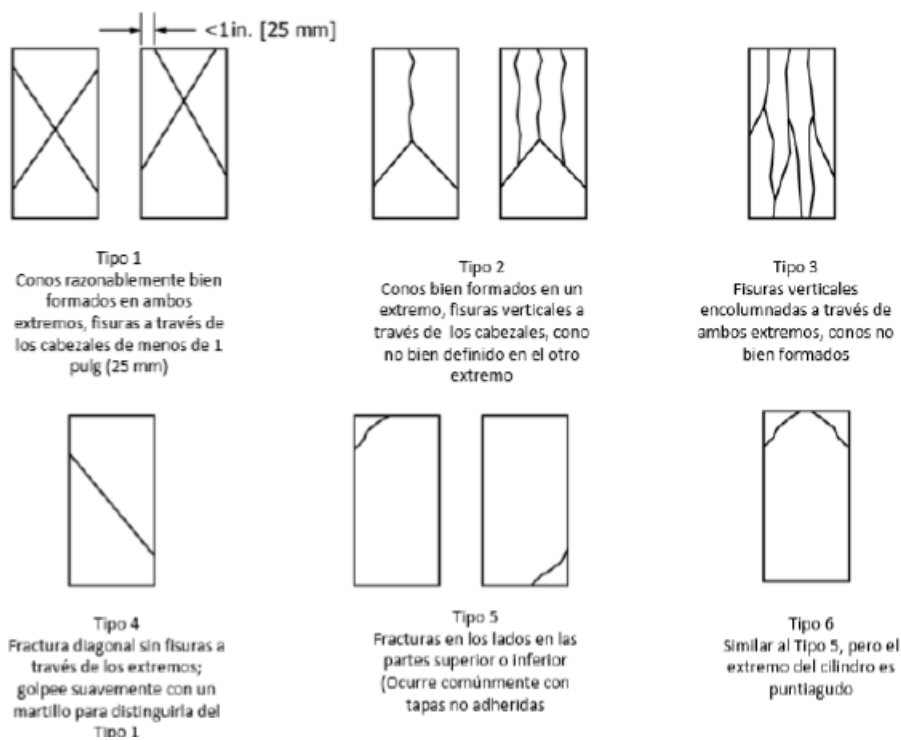


Figura 64: Anexo 12 – “Tipos de fallas”
(Fuente: Elaboración propia)

Fuerza (lbf)	Fuerza (Kgf)	Lector digital	Deformación (mm)
0	0	164.2	0
500	227	164.1	1
1000	453	164	2
1500	680	163.9	3
2000	907	163.8	4
2500	1133	163.7	5
3000	1360	163.6	6
3500	1587	163.5	7
4000	1814	163.4	8
4500	2041	163.2	10
5000	2267	163.1	11
5500	2494	163.1	11
6000	2721	163	12
6500	2948	162.9	13
7000	3175	162.8	14
7500	3401	162.7	15
8000	3628	162.7	15
8500	3855	162.5	17
9000	4082	162.4	18
9500	4309	162.3	19
10000	4535	162.2	20
10500	4762	162.1	21
11000	4989	162	22
10399	5187	161.8	24

Figura 65: Anexo 13 – “Lecturas tomadas de la viga sin refuerzo”
(Fuente: Elaboración propia)

Fuerza (lbf)	Fuerza (Kgf)	Lector digial	Deformación
0	0	163.6	0
500	227	163.3	3
1000	453	163.2	4
1500	680	163.1	5
2000	907	163	6
2500	1133	162.9	7
3000	1360	162.7	9
3500	1587	162.6	10
4000	1814	162.5	11
4500	2041	162.4	12
5000	2267	162.3	13
5500	2494	162.2	14
6000	2721	162.1	15
6500	2948	162	16
7000	3175	162	16
7500	3401	161.9	17
8000	3628	161.8	18
8500	3855	161.8	18
9000	4082	161.7	19
9500	4309	161.6	20
10000	4535	161.5	21
10500	4762	161.4	22
11000	4989	161.3	23
11500	5216	161.2	24
12000	5443	161.1	25
12500	5669	161	26
13000	5896	160.8	28
13500	6123	160.6	30
14000	6350	160.5	31
14113	6401	160.5	31

Figura 66: Anexo 14 – “Lecturas tomadas de la primera viga con una capa de refuerzo”
(Fuente: Elaboración propia)

Fuerza (lbf)	Fuerza (Kgf)	Lector digital	Deformación
0	0	163.6	0
500	227	163.5	1
1000	453	163.4	2
1500	680	163.3	3
2000	907	163.2	4
2500	1133	163.1	5
3000	1360	163	6
3500	1587	162.9	7
4000	1814	162.7	9
4500	2041	162.6	10
5000	2267	162.5	11
5500	2494	162.4	12
6000	2721	162.3	13
6500	2948	162.2	14
7000	3175	162.1	15
7500	3401	161.8	18
8000	3628	161.7	19
8500	3855	161.6	20
9000	4082	161.5	21
9500	4309	161.4	22
10000	4535	161.2	24
10500	4762	161	26
11000	4989	160.9	27
11500	5216	160.8	28
12000	5443	160.7	29
12500	5669	160.6	30
13000	5896	160.5	31
13500	6123	160.4	32
13950	6327	160.3	33

Figura 67: Anexo 15 – “Lecturas tomadas de la segunda viga con una capa de refuerzo”
(Fuente: Elaboración propia)

Fuerza (lbf)	Fuerza (Kgf)	Lector digital	Deformación
0	0	165.2	0
500	227	165.1	1
1000	453	165	2
1500	680	164.9	3
2000	907	164.8	4
2500	1133	164.7	5
3000	1360	164.6	6
3500	1587	164.5	7
4000	1814	164.4	8
4500	2041	164.3	9
5000	2267	164.2	10
5500	2494	164.1	11
6000	2721	164	12
6500	2948	163.9	13
7000	3175	163.8	14
7500	3401	163.6	16
8000	3628	163.5	17
8500	3855	163.4	18
9000	4082	163.3	19
9500	4309	163.2	20
10000	4535	163.1	21
10500	4762	163	22
11000	4989	162.7	25
11500	5216	162.6	26
12000	5443	162.5	27
12500	5669	162.4	28
13000	5896	162.3	29
13500	6123	162.2	30
14000	6350	162.1	31
14500	6577	162	32
15000	6803	161.9	33
15500	7030	161.7	35
15960	7239	161.3	39

Figura 68: Anexo 16 – “Lecturas tomadas de la primera viga con dos capas de refuerzo”
(Fuente: Elaboración propia)

Fuerza (lbf)	Fuerza (Kgf)	Lector digital	Deformación
0	0	166	0
500	227	165.9	1
1000	453	165.4	5
1500	680	165.3	6
2000	907	165.1	8
2500	1133	165	9
3000	1360	164.9	10
3500	1587	164.8	11
4000	1814	164.7	12
4500	2041	164.6	13
5000	2267	164.5	14
5500	2494	164.3	16
6000	2721	164.2	17
6500	2948	164.1	18
7000	3175	164	19
7500	3401	163.9	20
8000	3628	163.8	21
8500	3855	163.7	22
9000	4082	163.6	23
9500	4309	163.5	24
10000	4535	163.4	25
10500	4762	163.3	26
11000	4989	163.2	27
11500	5216	163.1	28
12000	5443	162.9	29
12500	5669	162.4	34
13000	5896	161.7	36
13500	6123	161.6	37
14000	6350	161.5	38
14500	6577	161.4	39
15000	6803	160.2	41
15133	6864	160.1	42

Figura 69: Anexo 17 – “Lecturas tomadas de la primera viga con dos capas de refuerzo”
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 70: Anexo 18 – “Delaminación del material FRCM”
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 71: Anexo 19 – “Delaminación del material FRCC”
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 72: Anexo 20 – “Delaminación del material FRCC”
(Fuente: Elaboración propia)

Diseño de viga a flexión

Especificaciones

$\beta_1 := 0.85$	Factor β equivalente a una viga rectangular
$f'_c := 295 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$	Resistencia mínima a la compresión del concreto a 28 días
$f_y := 2800 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$	Resistencia mínima a la fluencia del acero de refuerzo
$L := 1.2 \text{ m}$	Largo viga
$L_e := 1 \text{ m}$	Longitud entre apoyos
$E_s := 2100000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$	Módulo de elasticidad del acero de refuerzo

Características de la viga

$h := 20 \text{ cm}$	Altura de la viga
$b := 10 \text{ cm}$	Ancho de la viga
$d' := 1.5 \text{ cm}$	Recubrimiento
$A_s := 2.534 \text{ cm}^2$	Área total en zona a tensión, acero 1/2
$A'_s := 1.42 \text{ cm}^2$	Área total en zona a compresión, acero 3/8
$d := h - d' = 18.5 \text{ cm}$	Peralte de la viga

A partir del equilibrio de fuerzas

$$T = C_c + C'_s$$

$$A_s \cdot f_y = 0.85 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot c \cdot b + A'_s \cdot f'_s$$

Asumiendo $f'_s = f_y$

$$A_s \cdot f_y = 0.85 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot c \cdot b + A'_s \cdot f_y$$

$$c := \frac{f_y \cdot (A_s - A'_s)}{0.85 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot b} = 1.463 \text{ cm}$$

Altura del eje neutro

$$a := c \cdot \beta_1 = 1.244 \text{ cm}$$

Altura del bloque de compresión

Cálculo de las deformaciones unitarias del acero en compresión

$$\frac{0.003}{c} = \frac{\varepsilon'_s}{d' - c}$$

$$\varepsilon'_s := \frac{0.003 \cdot (d' - c)}{c} = 0.0001$$

$$\varepsilon_y := \frac{f_y}{E_s} = 0.0013$$

if ($\varepsilon'_s \geq \varepsilon_y$, “Acero fluye”, “Acero no fluye”) = “Acero no fluye” $\therefore f'_s \neq f_y$

Como la hipótesis no es válida, tenemos que usar la ecuación de equilibrio que se basa en f'_s sin fluencia

$$f'_s := E_s \cdot \varepsilon'_s = 157.263 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Esfuerzo del acero en compresión}$$

$$T = C_c + C'_s$$

$$A_s \cdot f_y = 0.85 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot c \cdot b + A'_s \cdot f'_s$$

$$c := \frac{A_s \cdot f_y - A'_s \cdot f'_s}{0.85 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot b} = 3.224 \text{ cm} \quad \text{Altura del eje neutro}$$

$$a := c \cdot \beta_1 = 2.741 \text{ cm} \quad \text{Altura del bloque de compresión}$$

$$\frac{0.003}{c} = \frac{\varepsilon'_s}{c - d'}$$

$$\varepsilon'_s := \frac{0.003 \cdot (c - d')}{c} = 0.0016$$

$$\frac{0.003}{c} = \frac{\varepsilon_t}{d - c}$$

Diseño de viga a flexión

$$\varepsilon_t := \frac{0.003 \cdot (d - c)}{c} = 0.0142$$

if ($\varepsilon_t \geq 0.005$, "Sección controlado por tensión", "Sección no controlado por tensión") = "Sección controlado por tensión"

Cálculo del momento nominal de la viga

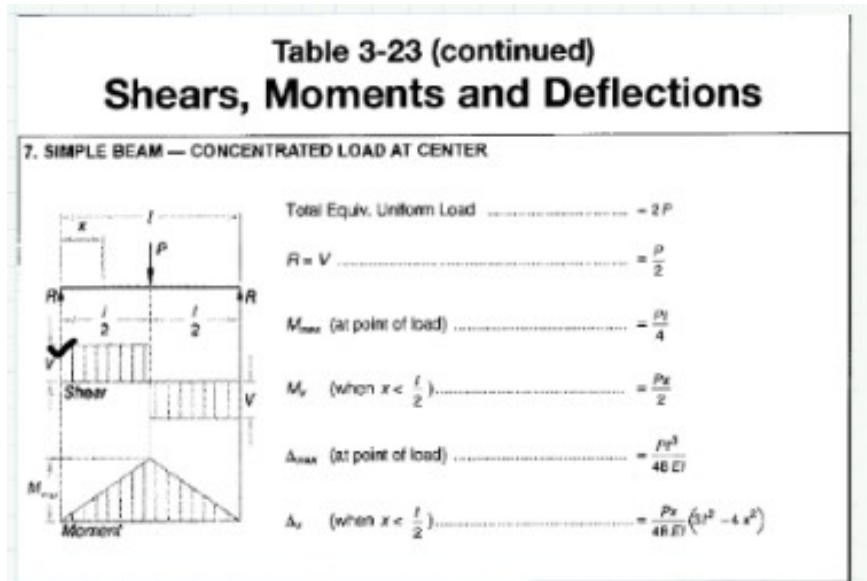
$$A_{s2} := \frac{A'_s \cdot f'_s}{f_y} = 0.08 \text{ cm}^2$$

$$A_{s1} := A_s - A_{s2} = 2.454 \text{ cm}^2$$

$$M_n := A_{s1} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_{s2} \cdot f'_s \cdot (d - d') = 1179.268 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Momento Nominal

Cálculo de la carga máxima a soportar



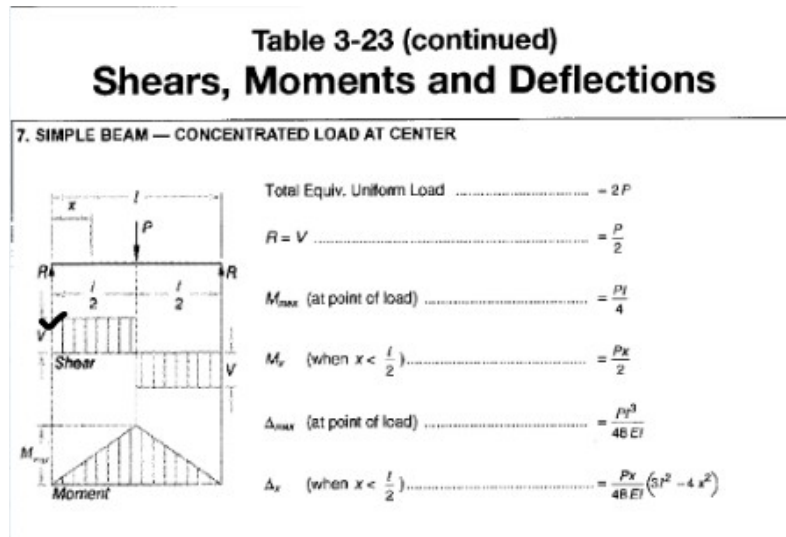
$$M_u \leq M_n$$

$$\frac{p \cdot L}{4} = M_n$$

$$p := \frac{M_n \cdot 4}{L_e} = 4.717 \text{ tonnef}$$

Carga última aplicar en la viga

Análisis a cortante de la viga



$$V_u := \frac{p}{2} = 2358.536 \text{ kgf}$$

Cortante último a una distancia "D" de la cara de apoyo

$$V_{ud} := \frac{V_u \cdot (0.5 \cdot L - d)}{0.5 \cdot L} = 1631.321 \text{ kgf}$$

Verificación refuerzo por cortante

$\phi := 0.75$ Factor de reducción para cortante en vigas.

$\lambda := 1$ Factor para concreto de peso normal.

$$\phi V_c := \phi \cdot 0.17 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cdot b \cdot d = 405.129 \text{ kgf}$$

if ($V_u > 0.5 \cdot \phi V_c$, "Se necesita estribos", "No se necesitan estribos") = "Se necesita estribos"

Cortante tomado por el acero de refuerzo

Diseño de viga a flexión

$$V_s := \frac{V_{ud} - \phi V_c}{\phi} = 1634.923 \text{ kgf}$$

Separación teórica entre estribos No.2 a una distancia "d" de la cara del apoyo

$$A_v := 0.317 \text{ cm}^2 \quad \text{Area estribos No.2}$$

$$S := \frac{2 \cdot A_v \cdot f_y \cdot d}{V_s} = 20.087 \text{ cm}$$

Separación teórica según requisitos del código ACI 318-14

$$V := 4 \cdot \sqrt{f'_c \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}} \cdot b \cdot d = 12709.917 \text{ kgf}$$

if ($V_s \leq V$, "Hacer chequeos S max y d/2", "Hacer chequeos S max y d/4") = "Hacer chequeos S max y d/2"

$$S_{max1} := \frac{d}{2} = 9.25 \text{ cm} \quad S_{max2} := 60 \text{ cm}$$

$$S := \min(S, S_{max1}, S_{max2}) = 9.25 \text{ cm}$$

$$S := 10 \text{ cm} \quad \text{Separación de estribos}$$

Ubicación a partir de la cual ya no se requieren estribos teóricamente

$$\frac{V_u}{0.5 \cdot L} = \frac{0.5 \cdot \phi V_c}{0.5 \cdot L - x}$$

$$\frac{V_u}{0.5 \cdot L} - \frac{0.5 \cdot \phi V_c}{0.5 \cdot L - x} \xrightarrow{\text{solve, } x} 0.54846863854296366367 \cdot m = 0.548 \text{ m}$$

$$x := 0.542 \text{ m}$$

$$S_{max2} := \frac{2 \cdot 31.7 \cdot 420}{0.062 \cdot \sqrt{21} \cdot 100} = 937.211$$
$$S_{max2} := 9.37 \text{ cm}$$

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCM

Características de la viga a reforzar

Propiedades geométricas

$L := 1.20 \text{ m}$ Largo de la viga

$L_e := 1 \text{ m}$ Longitud entre apoyos

$b := 10 \text{ cm}$ Ancho de la viga

$d := 18.5 \text{ cm}$ Peralte de la viga

$h := 20 \text{ cm}$ Altura de la viga

Propiedades del concreto

$f'_c := 295 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ Resistencia mínima a la compresión del concreto a 28 días

$\beta_1 := 0.85$ Parámetro que depende de la resistencia mínima a compresión del concreto 3 ksi

$\alpha_1 := 0.85$ Valor que equivale a una sección rectangular

$\varepsilon_{cu} := 0.003$ Deformación última del concreto

$E_c := 15100 \cdot \sqrt{f'_c \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}} = 259351.017 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ Módulo de elasticidad del concreto

Propiedades del acero

$f_y := 2800 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ Resistencia mínima a la fluencia del acero de refuerzo

$E_s := 2100000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ Módulo de elasticidad del acero

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCM

$$A_s := 2 \cdot 1.267 \text{ cm}^2 = 2.534 \text{ cm}^2 \quad \text{Área del acero de refuerzo a tensión}$$

$$\varepsilon_y := \frac{f_y}{E_s} = 0.001 \quad \text{Deformación unitaria del acero}$$

$$\rho_s := \frac{A_s}{b \cdot d} = 0.0137 \quad \text{Cuantía del acero}$$

Propiedades de la malla C Mesh Gold 105 (PBO)

$$A_f := 0.067 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}} \quad \text{Área por unidad de ancho de la malla}$$

$$E_f := 2753244 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Módulo de elasticidad de la malla}$$

$$w_f := 0.09 \text{ m} \quad \text{Ancho de la fibra}$$

$$\varepsilon_{fu} := 0.0148 \quad \text{Deformación última del sistema}$$

$$f_{fu} := 40748 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Esfuerzo último del sistema}$$

$$\rho_f := \frac{A_f \cdot b}{d \cdot b} = 0.000362 \quad \text{Cuantía del sistema}$$

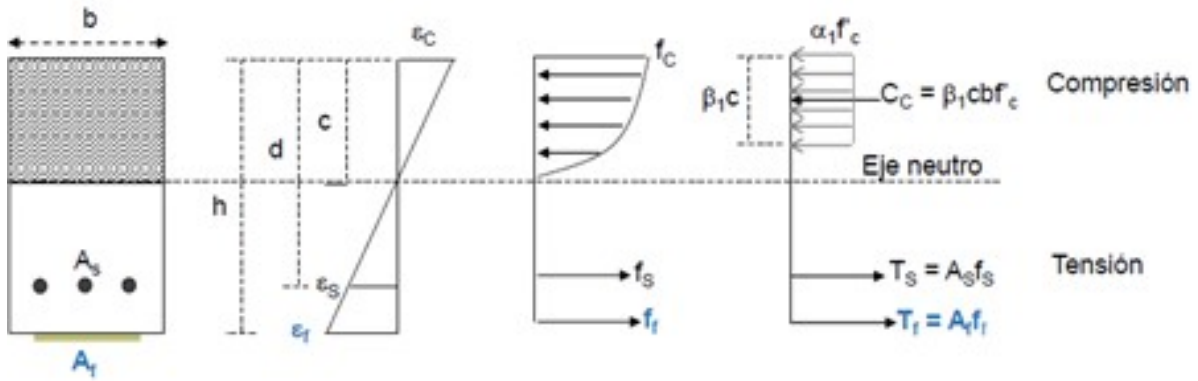
$$n := 1 \quad \text{Número de capas}$$

Momento nominal

$$M_n := 1179.268 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCM

Cálculo de la nueva capacidad a flexión



Cálculo de las deformaciones en los elementos resistentes

$c := 0.2 \cdot d = 3.7 \text{ cm}$ Profundidad al eje neutro

Nota: Para cálculos iniciales, la norma permite asumir un valor de c igual a 0.2 veces el peralte de la viga.

Para el sistema FRCM

$\epsilon_{fu} = 0.0148$ Deformación unitaria última de la malla

$\epsilon_{fd} := \epsilon_{fu} = 0.0148$ Deformación de diseño FRCM

$\epsilon_{fe1} := \min(\epsilon_{fd}, 0.012) = 0.012$ Deformación unitaria al momento de la falla.

$\epsilon_{bi} := 0$ Deformación inicial en el sustrato antes de colocar el sistema FRCM.

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCM

$$\varepsilon_{fe2} := \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} = 0.013$$

Deformación unitaria al momento de la falla.

$$\varepsilon_{fe} := \min(\varepsilon_{fe1}, \varepsilon_{fe2}) = 0.012$$

Deformación unitaria final al momento de la falla.

Para el concreto

$$\text{if}(\varepsilon_{fe} \leq \varepsilon_{fd}, \text{"1"}, \text{"2"}) = \text{"1"}$$

1. $\varepsilon_c = 0.003$

2. $\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{h-c} \right)$

$$\varepsilon_c := 0.003$$

Para el acero

$$\varepsilon_s := (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d-c}{h-c} \right) = 0.011$$

Cálculo de los esfuerzos en los elementos resistentes

Para el sistema FRCM

$$f_{fe} := E_f \cdot \varepsilon_{fe} = 33038.928 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Para el acero

$$\text{if}(\varepsilon_s \geq \varepsilon_y, \text{"1"}, \text{"2"}) = \text{"1"}$$

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCM

$$1. \quad f_s = f_y$$

$$2. \quad f_s = E_s \cdot \varepsilon_s$$

$$f_s := f_y = 2800 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Cálculo de las fuerzas resultantes en los elementos resistentes

Para el sistema FRCM

$$F_{fe} := n \cdot f_{fe} \cdot w_f \cdot A_f = 1992.247 \text{ kgf}$$

Para el acero

$$F_s := f_y \cdot A_s = 7095.2 \text{ kgf}$$

Para el concreto

$$F_c := \alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot c \cdot b = 7886.088 \text{ kgf}$$

Chequeo del equilibrio de fuerzas

$$-F_c + F_s + F_{fe} = 1201.36 \text{ kgf}$$

$$C := \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe} \cdot n \cdot w_f}{f'_c \cdot \beta_1 \cdot b \cdot \alpha_1} = 4.264 \text{ cm}$$

$$C_d := \frac{C - c}{c} = 0.152$$

if ($C_d \leq 0.05$, “Dentro del rango”, “Nueva iteracion”) = “Nueva iteracion”

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCM

Nota: Si la nueva profundidad calculada del eje neutro no es lo suficientemente cercana a la supuesta (se recomienda una diferencia de menos del 5 por ciento), revisar estimación e iterar hasta que se logre el equilibrio

Nueva iteración

$$c := 4.2 \text{ cm}$$

Profundidad al eje neutro

Para el sistema FRCM

$$\varepsilon_{fu} = 0.015$$

Deformación unitaria última de la malla

$$\varepsilon_{fd} := \varepsilon_{fu} = 0.015$$

Deformación de diseño FRCM

$$\varepsilon_{fe1} := \min(\varepsilon_{fd}, 0.012) = 0.012$$

Deformación unitaria al momento de la falla.

$$\varepsilon_{bi} := 0$$

Deformación inicial en el sustrato antes de colocar el sistema FRCM.

$$\varepsilon_{fe2} := \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} = 0.011$$

Deformación unitaria al momento de la falla.

$$\varepsilon_{fe} := \min(\varepsilon_{fe1}, \varepsilon_{fe2}) = 0.011$$

Deformación unitaria final al momento de la falla.

Para el concreto

$$\text{if}(\varepsilon_{fe} \leq \varepsilon_{fd}, \text{"1"}, \text{"2"}) = \text{"1"}$$

1. $\varepsilon_c = 0.003$

2. $\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{d_f - c} \right)$

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCM

$$\varepsilon_c := 0.003$$

Para el acero

$$\varepsilon_s := (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d-c}{h-c} \right) = 0.01$$

Cálculo de los esfuerzos en los elementos resistentes

Para el sistema FRCM

$$f_{fe} := E_f \cdot \varepsilon_{fe} = 31072.325 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Para el acero

$$\text{if}(\varepsilon_s \geq \varepsilon_y, "1", "2") = "1"$$

1. $f_s = f_y$

2. $f_s = E_s \cdot \varepsilon_s$

$$f_s := f_y = 2800 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Cálculo de las fuerzas resultantes en los elementos resistentes

Para el sistema FRCM

$$F_{fe} := n \cdot f_{fe} \cdot w_f \cdot A_f = 1873.661 \text{ kgf}$$

Para el acero

$$F_s := f_y \cdot A_s = 7095.2 \text{ kgf}$$

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCM

Para el concreto

$$F_c := \alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot c \cdot b = 8951.775 \text{ kgf}$$

Chequeo del equilibrio de fuerzas

$$-F_c + F_s + F_{fe} = 37.669 \text{ lbf}$$

$$C := \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe} \cdot n \cdot w_f}{f'_c \cdot \beta_1 \cdot b \cdot \alpha_1} = 1.657 \text{ in}$$

$$C_d := \frac{C - c}{c} = 0.002$$

if ($C_d \leq 0.05$, “Dentro del rango”, “Nueva iteracion”) = “Dentro del rango”

Cálculo del momento flector nominal de la viga reforzada con el sistema FRCM

$$\phi M_n = \phi (M_s + M_f)$$

Momento nominal a flexión de la viga reforzada

$$M_s := A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) = 1185.963 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Momento nominal a flexión del acero

$$M_f := n \cdot f_{fe} \cdot w_f \cdot A_f \cdot \left(h - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) = 341.287 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Momento nominal a flexión del sistema FRCM

if ($\epsilon_s \geq 0.005$, “ $\phi=0.90$ ”, “ ϕ no es 0.90”) = “ $\phi=0.90$ ”

Chequeo del factor de reducción

$$\therefore \phi := 1$$

$$\phi M_n := \phi \cdot (M_s + M_f) = 1527.25 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Momento nominal final

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCM

Nota: Se puso un factor de $\phi = 1$, ya que por ser una viga a ensayar los factores de seguridad no se aplicaron.

Chequeo del límite de la capacidad a flexión del sistema FRCM

$$M_n = 1179.268 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

if ($M_f \leq 0.5 \cdot M_n$, "Cumple", "No cumple") = "Cumple"

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCM

Características de la viga a reforzar

Propiedades geométricas

$L := 1.20 \text{ m}$	Largo de la viga
$L_e := 1 \text{ m}$	Longitud entre apoyos
$b := 10 \text{ cm}$	Ancho de la viga
$d := 18.5 \text{ cm}$	Peralte de la viga
$h := 20 \text{ cm}$	Altura de la viga

Propiedades del concreto

$f'_c := 295 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$	Resistencia mínima a la compresión del concreto a 28 días
$\beta_1 := 0.85$	Parámetro que depende de la resistencia mínima a compresión del concreto 3 ksi
$\alpha_1 := 0.85$	Valor que equivale a una sección rectangular
$\varepsilon_{cu} := 0.003$	Deformación última del concreto
$E_c := 15100 \cdot \sqrt{f'_c \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}} = 259351.017 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$	Módulo de elasticidad del concreto

Propiedades del acero

$f_y := 2800 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$	Resistencia mínima a la fluencia del acero de refuerzo
$E_s := 2100000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$	Módulo de elasticidad del acero

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCM

$$A_s := 2 \cdot 1.267 \text{ cm}^2 = 2.534 \text{ cm}^2 \quad \text{Área del acero de refuerzo a tensión}$$

$$\varepsilon_y := \frac{f_y}{E_s} = 0.001 \quad \text{Deformación unitaria del acero}$$

$$\rho_s := \frac{A_s}{b \cdot d} = 0.0137 \quad \text{Cuantía del acero}$$

Propiedades de la malla C Mesh Gold 105 (PBO)

$$A_f := 0.067 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}} \quad \text{Área por unidad de ancho de la malla}$$

$$E_f := 2753244 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Módulo de elasticidad de la malla}$$

$$w_f := 0.09 \text{ m} \quad \text{Ancho de la fibra}$$

$$\varepsilon_{fu} := 0.0137 \quad \text{Deformación última del sistema}$$

$$f_{fu} := 37719 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad \text{Esfuerzo último del sistema}$$

$$\rho_f := \frac{A_f \cdot b}{d \cdot b} = 0.00036 \quad \text{Cuantía del sistema}$$

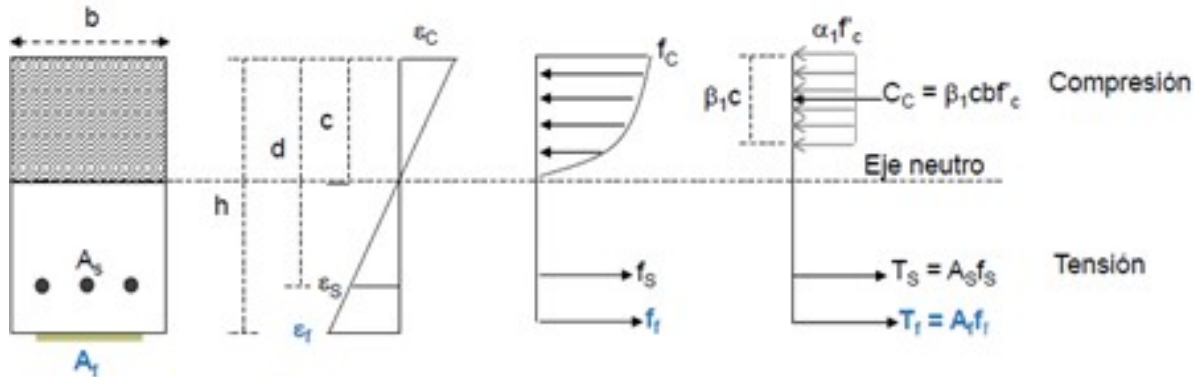
$$n := 2 \quad \text{Número de capas}$$

Momento último, momento nominal y momento nominal con factor de reducción

$$M_n := 1179.268 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCM

Cálculo de la nueva capacidad a flexión



Cálculo de las deformaciones en los elementos resistentes

$$c := 0.2 \cdot d = 3.7 \text{ cm} \quad \text{Profundidad al eje neutro}$$

Nota: Para cálculos iniciales, la norma permite sumir un valor de c igual a 0.2 veces el peralte de la viga o bien calcular el valor de " c " a partir del equilibrio del fuerzas.

Para el sistema FRCM

$$\epsilon_{fu} = 0.0137 \quad \text{Deformación unitaria última de la malla}$$

$$\epsilon_{fd} := \epsilon_{fu} = 0.0137 \quad \text{Deformación de diseño FRCM}$$

$$\epsilon_{fe1} := \min(\epsilon_{fd}, 0.012) = 0.012 \quad \text{Deformación unitaria de diseño FRCM}$$

$$\epsilon_{bi} := 0 \quad \text{Deformación inicial en el sustrato antes de colocar el sistema FRCM.}$$

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCM

$$\varepsilon_{fe2} := \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} = 0.013 \quad \text{Deformación unitaria de diseño FRCM}$$

$$\varepsilon_{fe} := \min(\varepsilon_{fe1}, \varepsilon_{fe2}) = 0.012 \quad \text{Deformación unitaria de diseño final FRCM}$$

Para el concreto

$$\text{if}(\varepsilon_{fe} \leq \varepsilon_{fd}, \text{"1"}, \text{"2"}) = \text{"1"}$$

1. $\varepsilon_c = 0.003$

2. $\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{d_f - c} \right)$

$$\varepsilon_c := 0.003$$

Para el acero

$$\varepsilon_s := (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d-c}{h-c} \right) = 0.011$$

Cálculo de los esfuerzos en los elementos resistentes

Para el sistema FRCM

$$f_{fe} := E_f \cdot \varepsilon_{fe} = 33038.928 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Para el acero

$$\text{if}(\varepsilon_s \geq \varepsilon_y, \text{"1"}, \text{"2"}) = \text{"1"}$$

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCM

$$1. \quad f_s = f_y$$

$$2. \quad f_s = E_s \cdot \varepsilon_s$$

$$f_s := f_y = 2800 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Cálculo de las fuerzas resultantes en los elementos resistentes

Para el sistema FRCM

$$F_{fe} := n \cdot f_{fe} \cdot w_f \cdot A_f = 3984.495 \text{ kgf}$$

Para el acero

$$F_s := f_y \cdot A_s = 7095.2 \text{ kgf}$$

Para el concreto

$$F_c := \alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot c \cdot b = 7886.088 \text{ kgf}$$

Chequeo del equilibrio de fuerzas

$$-F_c + F_s + F_{fe} = 3193.607 \text{ kgf}$$

$$C := \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe} \cdot n \cdot w_f}{\alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot b} = 5.198 \text{ cm}$$

$$C_d := \frac{C - c}{c} = 0.405$$

if ($C_d \leq 0.05$, “Dentro del rango”, “Nueva iteracion”) = “Nueva iteracion”

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCCM

Nota: Si la nueva profundidad calculada del eje neutro no es lo suficientemente cercana a la supuesta (se recomienda una diferencia de menos del 5 por ciento), revisar estimación e iterar hasta que se logre el equilibrio.

Nueva iteración

$c := 4.8 \text{ cm}$ Profundidad al eje neutro

Para el sistema FRCCM

$\varepsilon_{fu} = 0.014$ Deformación unitaria última de la malla

$\varepsilon_{fd} := \varepsilon_{fu} = 0.014$ Deformación de diseño FRCCM

$\varepsilon_{fe1} := \min(\varepsilon_{fd}, 0.012) = 0.012$ Deformación unitaria de diseño FRCCM

$\varepsilon_{bi} := 0$ Deformación inicial en el sustrato antes de colocar el sistema FRCCM.

$\varepsilon_{fe2} := \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{h-c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} = 0.01$ Deformación unitaria de diseño FRCCM

$\varepsilon_{fe} := \min(\varepsilon_{fe1}, \varepsilon_{fe2}) = 0.01$ Deformación unitaria de diseño final FRCCM

Para el concreto

if ($\varepsilon_{fe} \leq \varepsilon_{fd}$, "1", "2") = "1"

1. $\varepsilon_c = 0.003$

2. $\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{h-c}\right)$

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCM

$$\varepsilon_c := 0.003$$

Para el acero

$$\varepsilon_s := (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d-c}{h-c} \right) = 0.009$$

Cálculo de los esfuerzos en los elementos resistentes

Para el sistema FRCM

$$f_{fe} := E_f \cdot \varepsilon_{fe} = 26155.818 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Para el acero

$$\text{if}(\varepsilon_s \geq \varepsilon_y, "1", "2") = "1"$$

1. $f_s = f_y$

2. $f_s = E_s \cdot \varepsilon_s$

$$f_s := f_y = 2800 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Cálculo de las fuerzas resultantes en los elementos resistentes

Para el sistema FRCM

$$F_{fe} := n \cdot f_{fe} \cdot w_f \cdot A_f = 3154.392 \text{ kgf}$$

Para el acero

$$F_s := f_y \cdot A_s = 7095.2 \text{ kgf}$$

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCM

Para el concreto

$$F_c := \alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot c \cdot b = 22554.612 \text{ lbf}$$

Chequeo del equilibrio de fuerzas

$$-F_c + F_s + F_{fe} = 18.992 \text{ kgf}$$

$$C := \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe} \cdot n \cdot w_f}{\alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot b} = 4.809 \text{ cm}$$

$$C_d := \frac{C - c}{c} = 0.0019$$

if ($C_d \leq 0.05$, “Dentro del rango”, “Nueva iteracion”) = “Dentro del rango”

Cálculo del momento flector nominal de la viga reforzada con el sistema FRCM

$$\phi M_n = \phi (M_s + M_f)$$

Momento nominal a flexión de la viga reforzada

$$M_s := A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) = 1167.87 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Momento nominal a flexión del acero

$$M_f := n \cdot w_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(h - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) = 566.529 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Momento nominal a flexión del sistema FRCM

if ($\epsilon_s \geq 0.005$, “ $\phi=0.90$ ”, “ ϕ no es 0.90”) = “ $\phi=0.90$ ”

Chequeo del factor de reducción

$$\therefore \quad \phi := 1$$

$$\phi M_n := \phi \cdot (M_s + M_f) = 1734.399 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Momento nominal final

Reforzamiento a flexión en vigas de concreto utilizando el sistema FRCM

Nota: Se puso un factor de $\phi = 1$, ya que por ser una viga a ensayar los factores de seguridad no se aplicaron.

Chequeo del límite de la capacidad a flexión del sistema FRCM

$$M_n = 1179.268 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

if ($M_f \leq 0.5 \cdot M_n$, "Cumple", "No cumple") = "Cumple"