

CARACTERIZACIÓN FÍSICO - MECÁNICA DEL FERROCEMENTO

**ÁNGELA ROCÍO GAMBOA GONZÁLEZ
MARÍA CAMILA NAVARRO GARCÍA**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2013

CARACTERIZACIÓN FÍSICO - MECÁNICA DEL FERROCEMENTO

**ÁNGELA ROCÍO GAMBOA GONZÁLEZ
MARÍA CAMILA NAVARRO GARCÍA**

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniera Civil

**Director
LUZ MARINA TORRADO GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

A Dios por mostrarme día a día que con humildad, paciencia y sabiduría todo es posible, por ser ese sentimiento de alegría, tranquilidad y serenidad, por darme salud fortaleciendo mi corazón e iluminando mi mente para poder lograr mis objetivos, además por haber puesto con amor en mi camino aquellas personas que han sido mi soporte y compañía.

A mis padres, hermanos y a mi novio les quiero decir que no hay un día que no agradezca a Dios el haberme colocado entre sus vidas, la fortuna más grande es tenerlos a mi lado, y el tesoro más maravilloso son todos y cada uno de los consejos brindados, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona correcta, gracias por estar ahí cuando lo necesito, y por todo el amor que me brindan, los adoro.

MARÍA CAMILA NAVARRO GARCÍA

A Dios y a mi familia que son los pilares de mi vida, a ellos les debo esto por su incansable apoyo en momentos de debilidad, por su compañía en todo instante y por llenar mi corazón de alegría, amor y confianza en mí misma para alcanzar la meta en este largo trayecto, a ellos les dedico el esfuerzo y el trabajo depositados en este proyecto que me permitirá abrir campo a nuevos caminos en mi vida.

ÁNGELA ROCÍO GAMBOA GONZÁLEZ

AGRADECIMIENTO:

Le agradezco a Dios haberme guiado por el camino correcto a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y mucha felicidad.

Al finalizar un proyecto lleno de dificultades, situaciones inolvidables, es inevitable concentrar una gran parte del mérito en lo que has hecho, sin darte cuenta que sin la participación de una compañera y amiga, la ayuda directa e indirecta de varias personas que aportaron su grano de arena, y a todos los docentes que al transcurrir el tiempo compartieron sus conocimientos, hicieron de este proceso un gran resultado, por esto les expreso mis mayores agradecimientos.

MARÍA CAMILA NAVARRO GARCÍA

Agradezco profundamente a Dios por regalarme esta bella experiencia en mi vida, a mis padres por depositar en mi todo su amor y confianza dándome su apoyo incondicional para llevar a cabo este proyecto, a mi hermano por sus consejos y palabras de ánimo en el momento oportuno, a mis amigos por brindarme una amistad sincera y cálida llena de maravillosos instantes, a mi compañera y amiga Camila, por su inagotable paciencia y a mis profesores que me acompañaron en todo el proceso formativo y a todas aquellas personas que aportaron de alguna manera en la evolución de este trabajo.

ÁNGELA ROCÍO GAMBOA GONZÁLEZ

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. ESTADO DEL ARTE FERROCEMENTO	16
2.1 RESEÑA HISTÓRICA	16
3. FERROCEMENTO	19
3.1 CARACTERÍSTICAS DEL FERROCEMENTO	20
3.2 ESTRUCTURAS CON FERRECEMENTO	20
3.3 EL FERROCEMENTO EN COLOMBIA	26
4. FUENTES DE MATERIALES DEL FERROCEMENTO EN BUCARAMANGA	29
4.1 MALLA	29
4.2 CEMENTO	32
5. PARÁMETROS DE DISEÑO DEL FERROCEMENTO	33
5.1 ARENA	33
5.2 CEMENTO	36
5.3 AGUA	36
5.4 MALLA	36
6. METODOLOGÍA DE TRABAJO	38
6.1 DISEÑO DE MEZCLA DEL MORTERO	40

7. ANÁLISIS DE DATOS	52
7.1 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DEL FERROCEMENTO	56
7.2 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	62
7.3 RESISTENCIA A COMPRESIÓN	75
8. CONCLUSIONES	82
9. RECOMENDACIONES	85
BIBLIOGRAFÍA	86
ANEXOS	88
Anexo A. Ensayo a tracción con malla pajarito 1/2" con diferentes capas.	88
Anexo B. Ensayo a tracción con malla gallinero 3/4" con diferentes capas.	91

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Bote hecho en ferrocemento por Lambot	16
Figura 2. Palazzetoo de deportes de Roma (etapa de montaje)	17
Figura 3. Cubierta del Palacio de exposiciones de Turín	17
Figura 4. Casa de verano en Australia	21
Figura 5. Elaboración de tanques de agua.	22
Figura 6. Tanques construidos en ferrocemento	23
Figura 7. Bodega construida en ferrocemento	24
Figura 8. Astillero Ferrosur en Puerto Montt	24
Figura 9 Viviendas de dos niveles	25
Figura 10. Vivienda subsidio rural	25
Figura 11. Primera edificación construida en Ferrocemento	26
Figura 12. Perfiles en U ensamblados.	27
Figura 13. Modulo I construido	28
Figura 14. Módulo 2 construido	28
Figura 15. Mallas de alambre de acero galvanizado	30
Figura 16. Ensayo de Tiempo de fraguado.	38
Figura 17. Ensayo de Masas Unitarias sueltas y compactas.	39
Figura 18. Granulometría.	39
Figura 19. Peso específico del cemento.	39
Figura 20. Resultado de ensayo de Materia Orgánica.	40
Figura 21. Correspondencia de valores de resistencia y relación agua-cemento.	41
Figura 22. Relación entre % fluidez y relación agua cemento	42
Figura 23. Número de muestras a realizar	45
Figura 24. Mezcla obtenida para la realización de los cilindros.	45
Figura 25. Elaboración de mezcla.	46

Figura 26. Probetas con malla $\frac{3}{4}$ ", para prueba a tracción.	46
Figura 27. Malla encapsulada en sus extremidades.	46
Figura 28. Malla encapsulada en su totalidad.	47
Figura 29. Probetas Malla $\frac{1}{2}$ " Pajarito.	47
Figura 30. Mezcla para la elaboración de vigas.	48
Figura 31. Construcción de vigas.	48
Figura 32. Elaboración de vigas con las respectivas capas de malla	48
Figura 33. Vigas con capas de malla.	49
Figura 34. Platina de 15x50x2.5 con diferentes capas de malla.	49
Figura 35. Formaleta de 15*7*24, con las capas respectivas de malla.	50
Figura 36. Probetas fundidas.	50
Figura 37. Dimensiones requeridas para malla hexagonal.	52
Figura 38. Especímenes ensayados a tracción	56
Figura 39. Capacidad de Carga vs Volumen de fracción (%) de especímenes a tracción.	60
Figura 40. Evidencia de malla rigidizada.	61
Figura 41. Esfuerzo vs Volumen de fracción (%) de especímenes a tracción.	62
Figura 42. Muestra de láminas y vigas en ensayo a flexión.	63
Figura 43. Sección transversal del espécimen.	64
Figura 44. Módulo de rotura vs Volumen de fracción de especímenes a flexión.	72
Figura 45. Módulo de rotura vs Volumen de fracción de especímenes a flexión.	73
Figura 46. Paneles y cilindros en ensayo a compresión.	77
Figura 47. Resistencia vs Volumen de fracción de especímenes a compresión.	79

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones de alambre galvanizado PROALCO	31
Tabla 2. Especificaciones de alambre galvanizado – Retrefilado PROALCO	31
Tabla 3. Granulometría requerida para la arena	34
Tabla 4. Análisis granulométrico obtenido en laboratorio.	35
Tabla 5. Valores de b para distintas consistencias y módulos de finura	42
Tabla 6. Cantidades determinadas para 1 metro cubico de mortero.	44
Tabla 7. Cantidad de especimenes realizadas	51
Tabla 8. Volumen de fracción según número de capas (%)	53
Tabla 9. Volumen de fracción según número de capas (%)	53
Tabla 10. Superficie especifica según el volumen de fracción (<i>mm²mm³</i>)	55
Tabla 11. Superficie especifica según el volumen de fracción (<i>mm²mm³</i>)	55
Tabla 12. Factor de eficiencia.	58
Tabla 13. Cálculos realizados a láminas de 0,08x0,50x0,025 (m) a tracción.	59
Tabla 14. Cálculos realizados a Platinas 0,25*0,15 a Flexión.	71
Tabla 15. Cálculos realizados a vigas 0,15*0,15 a Flexión.	72
Tabla 16. Comparación Modulo de rotura y esfuerzo teórico.	74
Tabla 17. Cálculos realizados a Paneles a compresión 7,5*15*24.	78
Tabla 18. Cálculos de cilindros a compresión con mortero de 5000 psi.	80

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Caracterización Físico - Mecánica del Ferrocemento

AUTOR(ES): Ángela Rocío Gamboa González
Maria Camila Navarro Garcia

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Luz Marina Torrado Gomez

RESUMEN

En esta investigación se estudió el comportamiento de un material que tiene gran trayecto en la construcción pero no se emplea debido al desconocimiento de sus propiedades y al temor que se genera por sus bajos espesores (2.5 cms.). Este material recibe el nombre de ferrocemento y es concebido como el conjunto de mortero (ordinario o con aditivos) y malla de refuerzo. Para el proyecto se trabajó malla hexagonal, que es la más comercializada en Bucaramanga con diferente abertura ($\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ "). Para la caracterización del ferrocemento se construyeron especímenes que se adaptaron según la ACI 549, para ser sometidos a flexión, tracción y compresión. Estos ejemplares se fabricaron con diferente número de mallas, variando el volumen de fracción (contenido de acero) de estas secciones. Seguidamente se realizan los cálculos de resistencia teóricos consignados en la norma y se compara con los resultados experimentales, con el siguiente análisis: En Flexión se reportaron datos dispersos a nivel teórico, ya que se requerían parámetros que dependían directamente del proceso constructivo del ferrocemento. Para el análisis desarrollado a tracción, existe una diferencia de resultados entre los tipos de abertura trabajados, logrando mejores cuantías para la abertura de $\frac{3}{4}$ " que para la de $\frac{1}{2}$ ", debido a que esta última tiene más contenido de acero. Para las experiencias de flexión y tracción se aumenta la resistencia en función del número de capas de refuerzo, lo cual ocurre de forma inversa en los valores de resistencia a la compresión del ferrocemento, disminuyendo, según el aumento del volumen de fracción equivaliendo al 80% de la resistencia a compresión del mortero. Finalmente se revisa el comportamiento de las dos aberturas, y se concluye que es favorable emplear mallas con mayores aberturas porque representan un volumen de fracción moderado y son más fáciles de manejar en un proceso constructivo.

PALABRAS CLAVES: Ferrocemento, resistencia, flexión, compresión, tracción, malla, mortero.

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Physic Mechanics Characterization of Ferrocement

AUTHOR(S): Ángela Rocío Gamboa González
Maria Camila Navarro Garcia

FACULTY: Civil Engineering

DIRECTOR: Luz Marina Torrado Gomez

ABSTRACT

In this research was studied the behavior of a material that has a great ride in the construction area, but is not used due to unknowledge of its properties and the fear generated by its low thicknesses (2.5 cms). This material is called ferrocement and is conceived as a set of mortar (ordinary or with additives) and reinforcing mesh. For this investigation was worked an hexagonal mesh, which is the most marketed in Bucaramanga with different opening ($\frac{1}{2}$ " and $\frac{3}{4}$ "). For the characterization of ferrocement were constructed specimens which were adapted according to ACI 549, to be submitted to bending, tension and compression. These samples were manufactured with different number of meshes varying the volume of fraction (steel content) of these sections. After that were performed theoretical calculations of resistance recorded in the standard, and these values were compared with experimental results with the following analysis: The bending data reported a large dispersion on a theoretical level, as required parameters depending directly on the construction process. For the analysis done in a tension there is one difference between the worked opening type that obtained better results for the opening of $\frac{3}{4}$ " than those of $\frac{1}{2}$ " because $\frac{1}{2}$ " contains more steel. The results for the bending and tension research show an increase for the resistance on the function of number of reinforcing layers. Occurring on the inverse form for the compression resistance of ferrocement, decreasing according to the increase of the volume of fraction equal to 80% of the compression resistance of the mortar Finally, after reviewing the behavior of the two openings we concluded that is better to use the mesh with greater openings because gives a moderate volume of fraction and are better to use in a building process.

KEYWORDS: Ferrocement, resistance, bending, tension, mesh, mortar

INTRODUCCIÓN

El ferrocemento es un elemento compuesto por dos materiales; mortero y malla de alambre de acero. El objetivo de esta investigación es realizar la caracterización físico-mecánica del ferrocemento con los materiales que se encuentran disponibles en la ciudad de Bucaramanga y su Área Metropolitana, estos se ensayaron en el laboratorio para definir si los materiales a emplear cumplen con los requisitos para ser usados en la fabricación del ferrocemento.

De esta manera, se podrá establecer de acuerdo al análisis de los resultados obtenidos de los ensayos, a nivel cuantitativo, las propiedades que posee el material a través de la evaluación de un número de especímenes realizados a base de los materiales caracterizados previamente y ensayados de acuerdo a los lineamientos de la ACI.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar la caracterización físico-mecánica del ferrocemento utilizando materiales locales de Bucaramanga.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar los componentes del ferrocemento.

Elaborar y ensayar especímenes de las dimensiones solicitadas por el comité ACI 549.

Comparar el comportamiento de los tipos de malla propuestos para este proyecto.

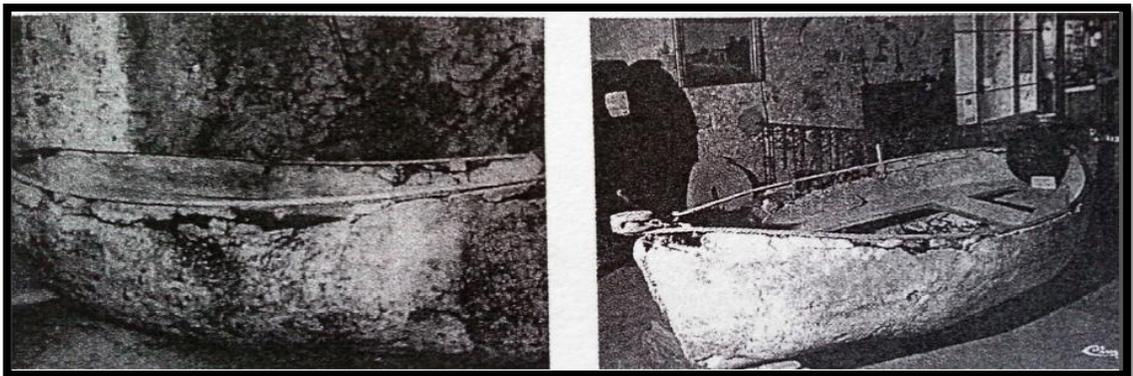
2. ESTADO DEL ARTE FERROCEMENTO

2.1 RESEÑA HISTÓRICA

Los antecedentes del ferrocemento se enlazan con los del concreto, pues su uso comenzó con la fabricación de macetas, recipientes para agua, pequeños botes y otros objetos llevados a cabo por el Francés Joseph Louis Lambot¹.

A mediados del año 1849, Lambot patentó el método bajo el nombre de “Ferciment” y construyó un bote de ferro-cemento que se muestra en la figura 1 en Holanda en 1887 que hasta el año 1972 se encontraba en uso en el zoológico de Ámsterdam.

Figura 1. Bote hecho en ferrocemento por Lambot



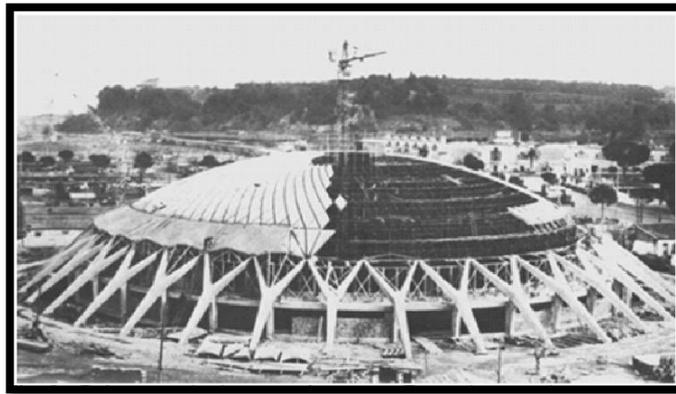
Fuente. Imágenes Google

A partir de este material se desarrolló el concreto armado y fue el Dr. P. L. Nervi ingeniero Italiano quien retomó la idea original de Lambot, reinventando y desarrollando el ferrocemento. A partir de 1920 realizó sus primeras experiencias,

¹ WHANG Benjamin. Comparison study of aluminium, ferrocement, and fiber-reinforced plastic for small craft in Korea. December 1972. Pag.5

especialmente en la construcción de pequeños barcos, el proceso fue revivido en los años 1940 como “Ferro-cement”, y se construyeron pequeñas embarcaciones en ese país entre 1943 y 1948. En este último año se incursionó con el uso de este material en la construcción civil, área donde se desarrollaron obras notables, entre las que se destacan el Palacio y el Pequeño Palacio (Palazzetto) de deportes de Roma, la cubierta de la sala central del Palacio de Exposiciones de Turín con una luz de 95 m. mostrado en la figura 2 y figura 3, el edificio de la feria de Milán y el Palacio de deportes de Florencia.

Figura 2. Palazzetto de deportes de Roma (etapa de montaje)²



Fuente: Imágenes Google

Figura 3. Cubierta del Palacio de exposiciones de Turín



Fuente: Daniel Bedoya

² SALEME Horacio, MENDEZ MUÑOZ Jose, COMOGLIO Susana. Ferrocemento un material apropiado en nuestro medio. Universidad de Tucuman. Octubre 2012. Pag. 20.

Aparentemente no hubo ninguna actividad entre los años 1948 hasta 1961. Fue en este año en que se revivió el proceso del Ferrocemento en Inglaterra. El material fue introducido a los Estados Unidos y Canadá entre los años 1965 y 1967.

Hubo presencia de construcciones de Ferrocemento en Inglaterra y Nueva Zelanda, Australia, China, Tailandia, Vietnam, Irán, Sur África, España, Francia y Korea.

El ferrocemento tuvo aceptación en los años 1960 con la construcción de botes en el reino Unido, Nueva Zelanda, Canadá y Australia. En 1968 el departamento de pesca de agricultura de las naciones unidas comenzó a realizar proyectos de botes a base de ferrocemento en Asia, África y Latino América. Otros países les siguieron incluyendo como la Unión soviética, China, y varios países en el sur este de Asia.

En 1972 la academia nacional de ciencia conformo un reporte de las aplicaciones del ferrocemento en países desarrollados. Una de las recomendaciones del reporte era establecer un centro de recolección, procesamiento y discernimiento de la información del ferrocemento. Subsecuentemente, en 1976 el Centro Internacional de Información del ferrocemento fue establecido en el Instituto Tecnológico de Asia, en Bangkok Tailandia. El instituto Americano de concreto conformo el comité 549 y en 1991 la sociedad Internacional del ferrocemento, fue establecida en Bangkok.

3. FERROCEMENTO

Algunas de las definiciones desarrolladas por diversos investigadores se presentan a continuación.

El ferrocemento³ es un tipo de hormigón armado de pared delgada, habitualmente construido con mortero de cemento y refuerzo con capas de malla de alambre continuas, de pequeño calibre y ocasionalmente barras de acero de armazón.

Los Rusos definieron el ferrocemento como una malla reforzada con mortero con una resistencia a la compresión de no menos de 39.3 N/mm^2 y una superficie específica (k) entre $2.0 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ y $3.0 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$. Pero el concepto se encuentra restringido a valores determinados lo que con lleva a una verificación experimental.

Debido a la variabilidad de las características de los materiales se obtiene un concepto mucho más generalizado del ferrocemento como sigue:

El ferrocemento⁴ consiste en varias capas de malla de alambre reforzada en mortero hecho a base de cemento portland. Existe una tendencia en comparar este material con el concreto reforzado, pero hay diferencias fundamentadas entre las propiedades de cada uno de estos materiales. Las diferencias básicas radican en la composición del material; el ferrocemento posee un porcentaje más alto de refuerzo en peso (más del 15%) y el material con el que se realiza dicho

³ BEDOYA RUIZ Daniel., ALVAREZ BETANCUR David., Comportamiento de viviendas de ferrocemento bajo cargas cíclicas. Revista de Ingenierías. Universidad de Medellín, Vol 8, num 15. Julio-Diciembre, 2009 Pag. 39

⁴ Byrne, J.G., and Wright, W. "An investigation of Ferro-cement using Expanded Metal" Concrete and construction engineering. Londres. 1961. Pag. 5

reforzamiento se encuentra distribuido de una mejor manera, la cantidad de agregado fino en la mezcla representa la mayor proporción de esta, el ferrocemento alcanza resistencias a la tracción mayores comparándolo con el concreto por su contenido de acero y para la construcción de elementos en concreto se usan espesores de grandes dimensiones contrario al ferrocemento en el que se usan espesores no mayores a una pulgada.

3.1 CARACTERÍSTICAS DEL FERROCEMENTO

Ventajas técnicas del ferrocemento⁵:

- Debido a que el ferrocemento es un material de bajo espesor, sus estructuras o prefabricados pueden ser livianos y fáciles de transportar.
- Cada uno de sus componentes se basa en unidades estandarizadas.
- El ferrocemento puede ser usado con otros materiales.
- Sus acabados y texturas interiores y exteriores pueden ser diferentes según la estructura a fabricar.
- Facilidad de mantenimiento, bajo costo en su construcción y sin mano de obra calificada.
- Resistencia a tensión, aumento de impermeabilidad y a la corrosión.

3.2 ESTRUCTURAS CON FERROCEMENTO

El ferrocemento viene siendo estudiado y aplicado desde hace más de 25 décadas en todas partes del mundo como opción de construcción de viviendas y otros elementos que no requieren cualidades estructurales.

⁵ GUERRERO ZUÑIGA Aydeé Patricia., GONZALEZ SALCEDO Luis Octavio., Conceptos Generales sobre Ferrocemento., Palmira., 2008., Pág. 8

En Estados Unidos se estableció un comité denominado como ACI 549. 1R-93 (Guide for the Design, Construction, and Repair of Ferrocement) que compila el trabajo desarrollado años atrás, por diversos autores encargados de establecer rangos, limitaciones y valores estándar para la elaboración del ferrocemento.

Tanto en este país como en Australia, se han construido casas de descanso y verano con ferrocemento en la parte estructural como en su cubierta tal como se registra en la siguiente figura.

Figura 4. Casa de verano en Australia



Fuente: Daniel Bedoya

En china⁶ se han construido puentes con sección en viga cajón, enteramente estructurados en el sitio con ferrocemento. Sin embargo, la mano de obra intensiva hace que la prefabricación sea la única manera de competir eficientemente con otros materiales.

⁶ BEDOYA RUIZ Daniel Alveiro., Estudio de resistencia y vulnerabilidad sísmicas: aplicación a casas de Ferrocemento. Universidad de Medellin., Medellin., Colombia., Pág. 34

En Perú⁷ se ha adoptado una norma denominada como “Guía de Construcción para Estructuras de Ferrocemento” que establece los requisitos y exigencias para la construcción de estructuras en este material.

Se ha desarrollado el proyecto SANBASUR⁸ es una iniciativa de cooperación bilateral entre los gobiernos de la Confederación Suiza y Perú, que se ejecuta en la Región Cusco desde 1996, y promueve, con especial atención, la innovación tecnológica para asegurar la sostenibilidad de las inversiones en saneamiento rural, y la gestión orientada al uso eficiente de los recursos humanos, técnicos y económicos disponibles. Este proyecto se encuentra desarrollado con un especial direccionamiento para el ferrocemento hacia la construcción de tanques de almacenamiento de agua. También se puede observar el uso del ferrocemento en este país en las experiencias de FONCODES en la construcción de tanques de agua en Cusco. Estos proyectos representan una tecnología sencilla para los servicios de saneamiento rural sostenible con un costo menor de inversión asegurando la calidad, incrementando la cobertura del servicio y estableciendo alianzas entre el gobierno nacional, los gobiernos locales y las ONG. En la figura 5 y 6 se evidencia la elaboración de los tanques con el uso del ferrocemento.

Figura 5. Elaboración de tanques de agua.



Fuente: Proyecto Sanbasur

⁷ GUIA DE CONSTRUCCIÓN PARA ESTRUCTURAS DE FERROCEMENTO., Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente., Lima., 2003. Pág. 4

⁸EL FERROCEMENTO: Una opción Tecnológica para la construcción de tanques de almacenamiento de agua Lima Julio 2007 Pág. 7

Figura 6. Tanques construidos en ferrocemento

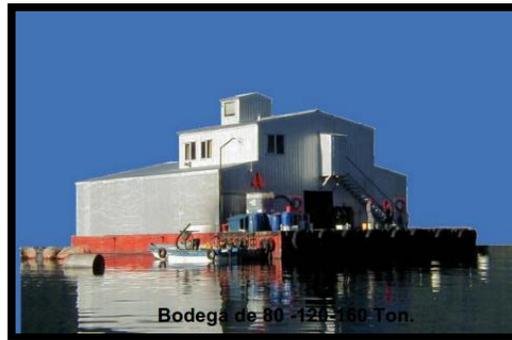


Fuente: Proyecto Sanbasur

En Chile⁹ se ha utilizado el ferrocemento en el ambiente marino desarrollando en la zona de Puerto Montt que comienza con las primeras plataformas flotantes para bodegas de almacenamiento de alimento. Posteriormente, se fue innovando en la forma en cómo se realiza la construcción del ferrocemento, y, de esta manera, el mortero se introduce en su estado fluido en los moldes. Parte de la estructura de estas plataformas se hacen en concreto, o, en algunas casos son un híbrido entre el ferrocemento y el concreto. La empresa Ferrosur ha construido desde 1989 175 bodegas, 15 muelles flotantes y 3 casas, uno de estos ejemplos de bodegas se muestra en las figuras 7 y 8.

⁹ SANTIBAÑEZ BARRIENTOS Lisette Marlene., Construcción de Vivienda Social de Altura en Ferrocemento. Universidad Austral de Chile. Chile., 2004., Pág. 13

Figura 7. Bodega construida en ferrocemento



Fuente: Lisette Santibañez

Figura 8. Astillero Ferrosur en Puerto Montt



Fuente: Lisette Santibañez

También se han implementado y desarrollado en Chile la prefabricación e industrialización de la construcción de viviendas de 1 a 3 pisos, con paneles doble cámara de aire en ferrocemento. A continuación se muestran algunas de las construcciones realizadas por la constructora Pablo Torres en Chillán en la figura 9 y 10.

Figura 9 Viviendas de dos niveles



Fuente: Lisette Santibañez

Figura 10. Vivienda subsidio rural



Fuente: Lisette Santibañez

Además se ha desarrollado una alternativa de prefabricados que permite la producción de diversos tipos de partes y piezas que son complementarias al uso habitacional, tales como: cierros vibrados, postes, cámaras, canaletas de aguas lluvias, soleras, adocretos, etc.

En México¹⁰ a mediados de 1970, Olvera López construyó casas de ferrocemento. Desarrollando un sistema constructivo para edificaciones de uno y dos pisos usando paneles livianos prefabricados de ferrocemento de diferentes secciones y experimento con varios tipos de conexiones. El sistema fue diseñado para permitir flexibilidad en los diseños arquitectónicos; más de mil viviendas se han construido desde entonces.

Figura 11. Primera edificación construida en Ferrocemento



Fuente: Daniel Bedoya

3.3 EL FERROCEMENTO EN COLOMBIA

En 1994¹¹ se llevaron a cabo investigaciones sobre perfiles estructurales, se ensayaron secciones tubulares, rectangulares, secciones en U y secciones en I, con diferentes relaciones altura/longitud y altura/anchura. Se mostró la eficiencia del perfil, la cual, dependía de la relación carga/unidad de masa, aumenta en función de la esbeltez de la sección, para una longitud determinada.

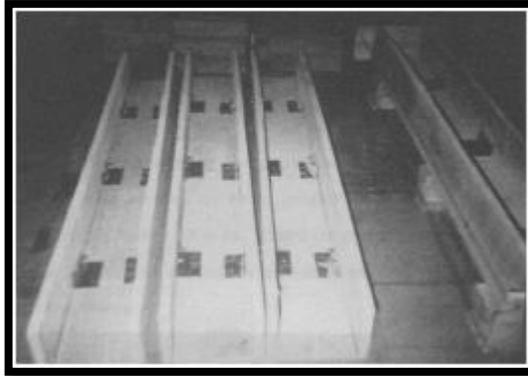
En el estudio sobre formaletas permanentes de ferrocemento en 1997 se ensayaron losas y vigas vaciadas sin y con formaleta permanente, construida con

¹⁰ Óp., Cit., Pág. 36

¹¹ IBID., Cit., Pág. 34

ferrocemento y conectada con el hormigón convencional para garantizar el trabajo con perfiles en U vaciados y perfiles en U ensamblados, como se ve en la siguiente imagen.

Figura 12. Perfiles en U ensamblados.



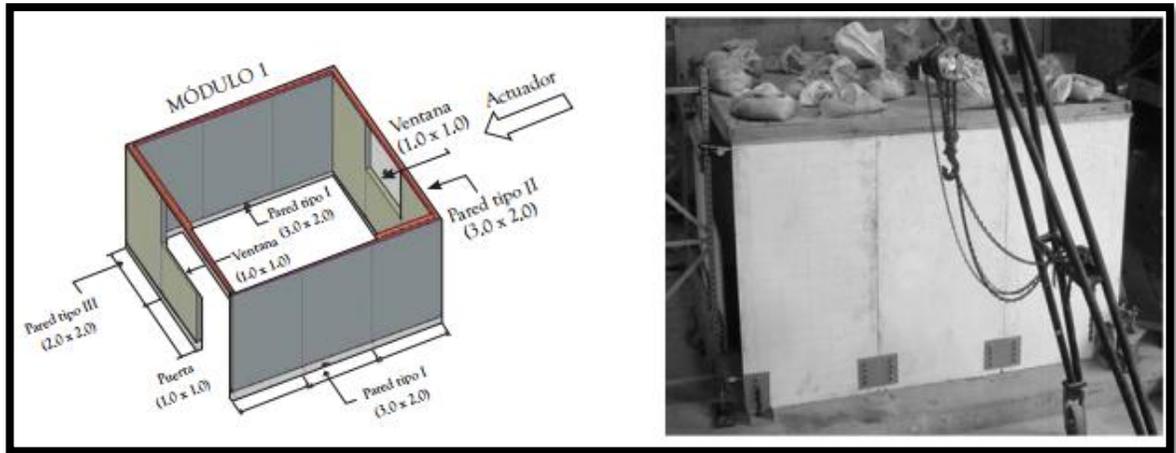
Fuente: Daniel Bedoya

Recientemente se ha documentado una investigación en la cual se han llevado a cabo diversidad de experimentaciones en nombre del ingeniero Daniel Bedoya Ruiz¹². El trabajo elaborado tiene como objetivo definir el comportamiento de las viviendas de ferrocemento bajo cargas cíclicas, cabe destacar que las viviendas mencionadas en este informe son concebidas como viviendas de bajo costo para la población perteneciente a estratos 1 y 2.

Para las modelaciones realizadas de carga cíclicas se construyeron dos módulos de vivienda a escala real, contruidos con paneles prefabricados de pared delgada de ferrocemento. Los resultados obtenidos muestran la sensibilidad de este sistema estructural ante varios ciclos de carga, con pérdidas de rigidez cercanas al 20% para los primeros ciclos de carga y hasta un 85% al final de los mismos.

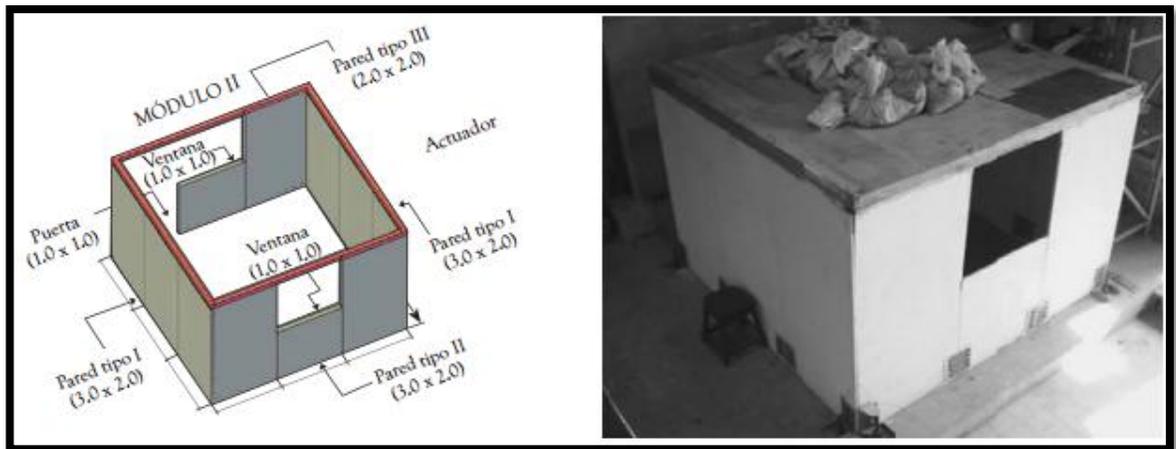
¹² Óp., Cit., Pag. 37-46

Figura 13. Módulo I construido



Fuente: Daniel Bedoya y David Betancur

Figura 14. Módulo 2 construido



Fuente: Daniel Bedoya y David Betancur

4. FUENTES DE MATERIALES DEL FERROCEMENTO EN BUCARAMANGA

4.1 MALLA

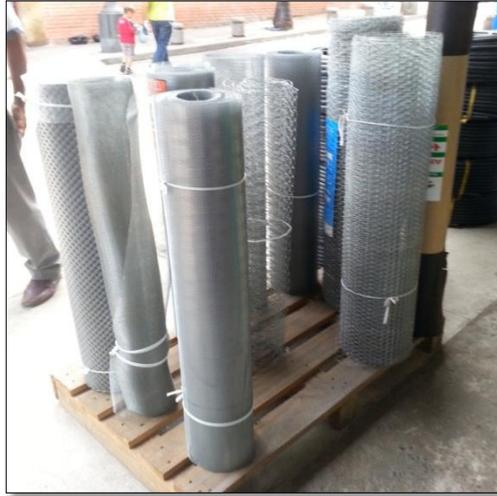
Se realizó un reconocimiento de las mallas que se trabajan a nivel general en la ciudad de Bucaramanga y se encontraron diferentes tipologías de malla que divergen en su abertura por tamaño, forma y material, también se diferencian por la manera en que se juntan las aberturas de la malla, pueden ser soldadas o tejidas.

Las principales distribuidoras de malla que se encontraron en la ciudad fueron las siguientes:

- Trefilados de Colombia. Bucaramanga, cra 14 N° 24-49 PBX (57+7) 6305000
- Proalco. Bogotá, autopista sur Km 25 Vía sibate, zona Industrial del Muña PBX (571)7198899.
- Ferrasa. Bogotá Cundinamarca Cra 128 # 15ª 36, PBX (57-1) 401 2525
- Mallasan. CR 14 18 50, Bucaramanga, Santander, Colombia
- Prada Hermanos: Bucaramanga Santander calle 58 N° 27 - 97

En la figura 15 se muestran las mallas encontradas en el comercio, estas son utilizadas con fines de construcción y poseen suficiente flexibilidad para ser trabajadas en elementos de ferrocemento.

Figura 15. Mallas de alambre de acero galvanizado



Fuente: Propia

La malla a utilizar para el desarrollo de este proyecto se denomina malla gallinero y se decidió emplear las mallas con abertura de $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ " (1,905mm y 1,27mm) con calibre No 20 el cual poseen un diámetro de alambre de 0.89 milímetros. Esta malla se define como malla hexagonal tejida hecha a base de alambre galvanizado, fabricado en acero de bajo, medio y alto carbono, que ofrece las ventajas y beneficios:

- Resistencia a la corrosión
- Uniformidad en el diámetro y en el recubrimiento del zinc
- Fabricado con diferentes niveles de resistencia a la tracción

Los niveles de resistencia se encuentran relacionados directamente por el calibre del alambre empleado en la malla, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1. Especificaciones de alambre galvanizado PROALCO

ALAMBRE GALVANIZADO						
CALIBRE BWG	DIAMETRO (mm)	TOLERANCIA (mm) (+ , -)	CAPA DE ZINC (g/m ²)	RESISTENCIA TRACCION (kgf/mm ²)	METROS/ TONELADA Aprox.	PESO APROX. (Kilos)
6	5,16	0.04	60	39-37	6.094	90
8	4,19	0.04	60	39-47	9.242	90
9	3,76	0.04	60	39-47	11.476	90
10	3,40	0.04	80	39-47	14.035	90
11	3,05	0.04	70	39-47	17.442	90
12	2,77	0.04	70	39-47	21.146	90
13	2,41	0.04	60	39-47	27.935	90
14	2,11	0.04	60	39-47	36.443	90
15	1,83	0.04	60	39-47	48.449	90
16	1,65	0.04	60	39-47	59.596	90
18	1,24	0.04	40	39-47	105.486	90

Fuente: Proalco

Además de su tamaño y forma, las mallas, difieren también por la forma en la que son fabricadas, para la investigación fue adquirida la malla hexagonal de la empresa PROALCO, que emplea una metodología de fabricación que se llama “retrefilado en húmedo”. De esta manera se obtienen también las características de las que se encuentra dotado el alambre, el cual es, el material base de la malla hexagonal.

Tabla 2. Especificaciones de alambre galvanizado – Retrefilado PROALCO

ALAMBRE GALVANIZADO – Retrefilado						
CALIBRE BWG	DIAMETRO (mm)	TOLERANCIA (mm) (+ , -)	CAPA DE ZINC (g/m ²)	RESISTENCIA TRACCION (kgf/mm ²)	METROS/ TONELADA Aprox.	PESO APROX. (Kilos)
14	2,10	0.02	40	50-70	36,779	25
16	1,65	0.02	40	50-70	59,576	25
18	1,25	0.02	40	50-70	103,805	25
20	0,89	0.02	40	50-70	204,767	25

Fuente: Proalco

Es decir, que se manejara una resistencia a la tracción aproximada de (490-686) Mpa para el alambre que compone la malla hexagonal empleada en las especímenes a realizar para la caracterización del ferrocemento.

4.2 CEMENTO

Las principales distribuidoras de cemento que se encuentran en el área de Bucaramanga son: Toxement, Holcim, Cemex y Argos. Éstas proveen diversidad de cementos para la industria de la construcción en la ciudad. Generalmente, el cemento que se comercializa en grandes cantidades es el cemento Portland Tipo 1¹³, es el producto que se obtiene por la pulverización del clinker portland con la adición de una o más formas de sulfato de calcio. Se admite la adición de otros productos siempre que su inclusión no afecte las propiedades del cemento resultante. Todos los productos adicionales deben ser pulverizados conjuntamente con el clinker.

El cemento empleado para el desarrollo de este trabajo fue HOLCIM ,posee las siguientes ventajas:

- Ideal en la producción de pequeños elementos prefabricados.
- Apto para obras marinas y masivas.
- Da mejores tiempos de fraguado que permiten un manejo adecuado (transporte, colocación, compactación y afinado), sin que se presente pérdida de movilidad prematura.
- Al tener calor de hidratación bajo, mejora el desempeño en concretos masiva.

¹³ INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA. CEMENTO. DEFINICIONES. Norma Técnica Colombiana. Pag. 1

5. PARÁMETROS DE DISEÑO DEL FERROCEMENTO

El ferrocemento se trabaja en forma de láminas con un espesor de 2.5 cm como máximo, y los materiales que componen esta pared delgada son mortero y malla. A continuación se encuentran definidos los parámetros requeridos para la fabricación del ferrocemento según la ACI 549.

- La proporción de arena-cemento debe ser 1.5 - 2.5 por peso
- La proporción de agua – cemento debe ser de 0.35 – 0.5
- De acuerdo a los parámetros anteriores se debe realizar una dosificación adecuada de tal modo que se obtenga una pasta de mortero lo suficientemente fluida para realizar un recubrimiento de la malla de manera completa.
- Uno de los principales criterios de diseño es la plasticidad en la pasta del mortero preservando la fluidez anteriormente mencionada.
- El espesor del mortero en el que será encapsulado la malla para formar la matriz del ferrocemento no deberá exceder los 50 mm.

Ahora se presentan las características de los materiales trabajados en laboratorio con su respectiva normativa.

5.1 ARENA

La arena representa la mayor proporción en las mezclas de mortero, y en el caso del ferrocemento debe cumplir determinadas especificaciones que permitan un

desempeño favorable en el ferrocemento. A continuación se presentan los requerimientos solicitados por la ACI 549.1 R-93¹⁴

- El agregado fino debe cumplir con una gradación que está sometida a unos rangos establecidos por la ACI mostrada en la tabla 3, que garantiza la uniformidad de los granos permita una adecuada penetración en la malla hexagonal utilizada como refuerzo.

Tabla 3. Granulometría requerida para la arena

Tamaño del tamiz	Porcentaje pasa (por peso)
N°8 (2.36mm)	80-100
N°16(1.18mm)	50-85
N°30(0.60mm)	25-60
N°50(0.30mm)	10-30
N°100(0.15mm)	2-10

Fuente: ACI 549.1 R-93

De esta manera, se tienen los valores límites requeridos para la gradación de la arena que será utilizada en el mortero del ferrocemento. La siguiente tabla muestra la gradación obtenida para el agregado fino ensayado de acuerdo a la norma I.N.V 213 utilizada en los ensayos de laboratorio para la investigación:

¹⁴ Guide for the Design Construction and Repair of Ferrocemento. American Concrete Institute. ACI Committee 549.

Tabla 4. Análisis granulométrico obtenido en laboratorio.

ANALISIS GRANULOMETRICO				
Tamaño del tamiz	Peso Retenido	% Retenido	Acumulado	% Pasa Total
N°.4	186	4,87%	4,87%	95,13%
N°.8 (2.36mm)	283	7,41%	12,28%	87,72%
N°16(1.18mm)	598	15,67%	27,95%	72,05%
N°30(0.60mm)	1478	38,74%	66,69%	33,31%
N°50(0.30mm)	832	21,8%	88,49%	11,51%
N°100(0.15mm)	316	8,28%	96,77%	3,23%
FONDO	122	3,19%	99,96%	0,04%

Fuente: Propia

Como se muestra en la tabla anterior la gradación del material ensayado cumple con las especificaciones para ser usado en la elaboración del ferrocemento.

- El material que será usado para la fabricación del ferrocemento debe estar libre de materia orgánica, debe ser limpio, inerte de tal forma que no afecte las propiedades del cemento en el momento en que reacciona químicamente.

Para estimar el contenido de materia orgánica presente en el agregado fino se realizó un ensayo de colorimetría que se encuentra establecido de acuerdo a la Norma I.N.V. 212, el resultado obtenido a partir del ensayo descrito en la norma presenta una **Coloración #2**, la cual se encuentra en un rango de aceptabilidad para trabajarse en mezclas de mortero.

5.2 CEMENTO

La selección del tipo de cemento para la realización de cualquier clase de estructura demanda unos determinados lineamientos, por ello se escogen cementos con diversas características que mejoren la trabajabilidad en la mezcla y su desempeño. Para este caso no se solicita una tipología de cemento en especial ya que esta propuesta se encuentra direccionada a la caracterización de este material en un nivel globalizado, más no un elemento de requerimientos condicionados.

Por lo tanto, el cemento que se utiliza en la fabricación del ferrocemento para esta propuesta se encuentra definido como el **Cemento Portland Tipo 1** empleado cuando no se requieren las propiedades especiales que poseen los otros tipos de cemento definidos en la ASTM C150.

5.3 AGUA

Las condiciones para la construcción del ferrocemento que debe cumplir el agua a emplear no difieren de las que se encuentran especificadas para el concreto, ya que el agua debe ser limpia, fresca y debe tener un $\text{pH} \geq 7$, para minimizar el pH de la pasta de mortero. El agua no debe contener sal, aceite, azúcar, cloro o materia orgánica. Sin embargo el agua que es tratada con cloro para el consumo humano puede ser utilizada.

5.4 MALLA

Para la construcción del ferrocemento se hace uso de mallas, y existen diversidad de tamaños y materiales, para este caso se emplea la malla avícola o “gallinero”

no es considerada como estructuralmente eficiente, además de esto, la diferencia de la abertura entre la malla gallinero y la malla de abertura cuadrada diverge en el desempeño del ferrocemento por el direccionamiento de los alambres, pero son usadas con gran frecuencia para la construcción de elementos curvos ya que poseen una gran flexibilidad.

Los requerimientos solicitados por la norma ACI 549 para la evaluación de la malla que compone la matriz del ferrocemento son los siguientes:

- La malla debe estar embebida en el mortero de tal forma que se puedan hallar valores de la resistencia a la tracción de esta.
- El ancho del elemento de la malla para ser ensayado no debe ser menor a seis veces el ancho de la abertura de los huecos de esta.
- La longitud que será ensayada no debe ser menor que tres veces su ancho o seis pulgadas, se ensayara la longitud que sea más representativa.
- La muestra que se encuentra disponible para realizar el ensayo debe representar más de la mitad de la longitud total de la malla (se debe tener en cuenta la longitud de malla que se encuentra encapsulada en el mortero).

Los elementos anteriormente mencionados son utilizados para formar la matriz de ferrocemento y deben encontrarse dosificados de tal forma que cumplan una resistencia en el mortero equivalente a 5000 psi ya que este valor es el que se encuentra por norma según la ACI 549.

6. METODOLOGÍA DE TRABAJO

A continuación se muestra el procedimiento llevado a cabo para la elaboración de este proyecto.

- Revisión bibliográfica
- Caracterización del material a utilizar
- Elaboración de probetas, para realizar los diferentes ensayos al material

Para la caracterización de los materiales se realizaron los siguientes ensayos: granulometría, tiempo de fraguado, masas unitarias sueltas y compactas, peso específico, contenido de materia orgánica y consistencia normal, para ello se tomó un tiempo aproximado de dos semanas, en el laboratorio de materiales de la Universidad Pontificia Bolivariana. Seguidamente se muestra la evidencia fotográfica de los ensayos realizados.

Figura 16. Ensayo de Tiempo de fraguado.



Fuente: Propia

Figura 17. Ensayo de Masas Unitarias sueltas y compactas.



Fuente: Propia

Figura 18. Granulometría.



Fuente: Propia.

Figura 19. Peso específico del cemento.



Fuente: Propia.

Figura 20. Resultado de ensayo de Materia Orgánica.



Fuente: Propia.

Luego de caracterizar los materiales se requiere de la elaboración del diseño del mortero, la cual se planteó según la metodología empleada por Diego Sánchez Guzmán consignada en “Tecnología del Concreto y del Mortero”. A continuación se presenta el paso a paso para la dosificación de la mezcla.

6.1 DISEÑO DE MEZCLA DEL MORTERO

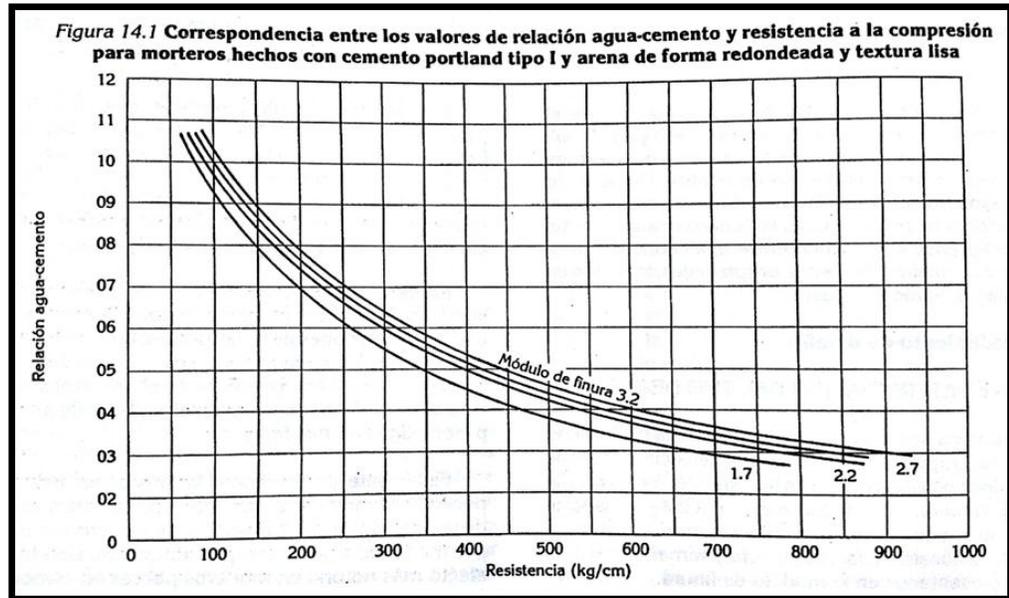
Paso 1. Determinación del tipo de arena

Se realizó el análisis granulométrico de la arena a emplear para la fabricación del mortero se determinó un módulo de finura de 2.97.

Paso 2. Determinación de la relación agua cemento

Para la resistencia deseada equivalente a $350 \text{ kg/cm}^2 = 5000 \text{ psi}$ en la gráfica 14.1 (tecnología del concreto y del mortero) se ingresa con los datos de módulo de finura y resistencia, y, de esta manera se obtuvo una relación A/C = 0.55

Figura 21. Correspondencia entre valores de resistencia y relación agua-cemento.



Fuente: Tecnología del Concreto y del Mortero

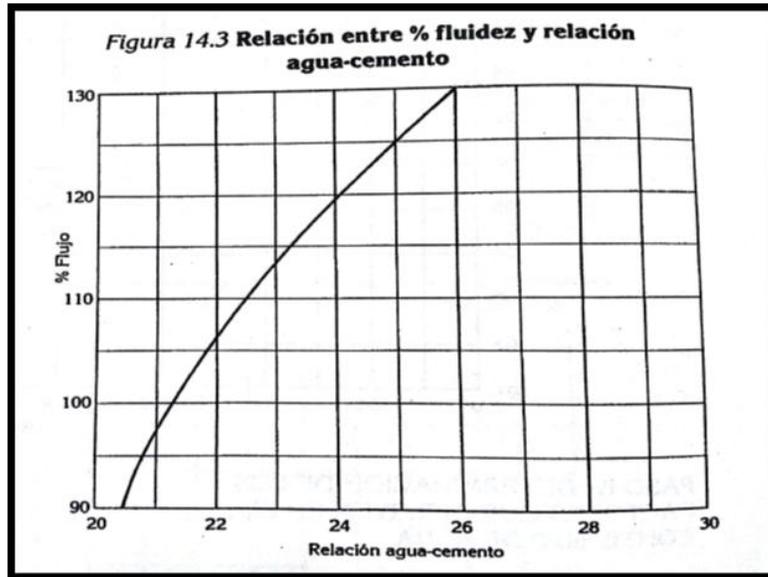
Paso 3. Selección de la consistencia

Se requiere una consistencia de término medio, que en este caso se denominaría como “Fluida” con un porcentaje de flujo equivalente a 120% - 150%

Paso 4. Determinación de los factores que influyen en el contenido de agua

Para la determinación del factor K se requiere la relación A/C determinada anteriormente para la fluidez deseada en la matriz de mortero, denominada como “Fluida”, de esta manera se entra a la gráfica 14.3 (Tecnología para el concreto y el mortero) con los valores de fluidez de 140%.

Figura 22. Relación entre % fluidez y relación agua cemento



Fuente: Tecnología del concreto y del mortero

De esta manera se obtiene un valor de $K=0.28$ y se procede a determinar “b” con los datos relacionados en la siguiente tabla:

Tabla 5. Valores de b para distintas consistencias y módulos de finura

Consistencia	Modulo de Finura	Arena de granos redondos y lisos	Arena de granos angulares y rugosos
Seca (90%)	1.7	0,3293	0,3215
	2.2	0,311	0,3028
	2.7	0,2772	0,293
	3.2	0,2394	0,2494
Plastica (110%)	1,7	0,3242	0,3238
	2,2	0,3033	0,2947
	2,7	0,2734	0,2879
	3,2	0,2368	0,2477
Fluida (130%)	1,7	0,3172	0,3216
	2,2	0,2927	0,3003
	2,7	0,2687	0,2949
	3,2	0,234	0,2629

Fuente: Tecnología del Concreto y del Mortero

Se realiza la interpolación de los valores de b de acuerdo a un módulo de finura de 2.9 y una fluidez de consistencia “Fluida”.

M. F.	b
2,7	0,2687
2,9	x
3,2	0,234

$$0,5 \rightarrow 0,0347$$

$$0,2 \rightarrow y$$

$$y = 0.01388$$

$$b = 0,2678 - 0.01388$$

$$b = 0,2548$$

Se obtuvo un valor de b=0.25 (para arena de granos lisos y redondos)

Paso 5. Determinación de la proporción

Con los valores hallados anteriormente se procede a la aplicación de la fórmula que se encuentra descrita a continuación:

$$n = \frac{\ln A_C - \ln(k)}{b}$$

Remplazando:

$$n = \frac{\ln 0.55 - \ln(0.28)}{0.2578}$$

$$n = 2.64$$

Paso 6. Calculo del contenido de cemento

Se tiene la expresión:

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{G_c} + \frac{n}{G_a} + \frac{A}{C}}$$

Remplazando:

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{3.019} + \frac{2.64}{2.52} + 0.55}$$

$$C = 518.4 \text{ Kg/cm}^3$$

Paso 7. Determinación del contenido de agua

Se tiene la siguiente expresión:

$$A = \frac{A}{C} * C \quad A = 0.55 * 518.4 \quad A = 285.1/m^3$$

Paso 8. Determinación del contenido de arena

$$a = n * C \quad a = 2.64 * 518.4 \quad a = 1368.58 \text{ kg/m}^3$$

Tabla 6. Cantidades determinadas para 1 metro cubico de mortero.

CONTENIDO DE MATERIALES PARA 1 m ³ MORTERO			
Material	Peso seco (Kg)	Peso específico g/cm3	Volumen (1)
Cemento	518.4	3.019	171.712
Arena	1368.58	2.52	543.086
Agua	285.1	1	285.1
TOTAL	2115.31		1000

Fuente: Propia.

Con el diseño realizado y teniendo en cuenta la tabla N° 6, se inicia la elaboración de cilindros mortero de 3" x 6" para ser ensayados a compresión como lo indica la ACI 549 y se muestra en las figuras 23 y 24.

Figura 23. Número de muestras a realizar



Fuente: Propia.

Figura 24. Mezcla obtenida para la realización de los cilindros.



Fuente: Propia.

A continuación se realizan los especímenes que serán utilizados para el ensayo a tracción, tienen diferentes dimensiones según la abertura del hueco de la malla a utilizar, siguiendo las especificaciones de la ACI 549, para éstas muestras se utilizó malla hexagonal de $\frac{1}{2}$ " y de $\frac{3}{4}$ " más conocidas como malla pajarito y malla gallinero respectivamente, estas mallas fueron embebidas totalmente en mortero y encapsuladas solo en sus extremos, como se ilustra en las figuras 27 y 28, son las dos metodologías que muestra la norma.

Figura 25. Elaboración de mezcla.



Fuente: Propia.

Figura 26. Probetas con malla $\frac{3}{4}$ " , para prueba a tracción.



Fuente: Propia.

Figura 27. Malla encapsulada en sus extremidades.



Fuente: Propia.

Figura 28. Malla encapsulada en su totalidad.



Fuente: Propia

Figura 29. Probetas Malla ½" Pajarito.



Fuente: Propia

Para realizar el ensayo a flexión del ferrocemento, se elaboraron vigas de 15x15x50.cm, estas dimensiones fueron adaptadas debido a la instrumentación que se encuentra en el laboratorio de materiales, y además se fabricaron platinas de 2.5x15x50 cm, teniendo en cuenta los espesores que son recomendados para secciones de ferrocemento. Ambos registros de proceso constructivo se encuentran ilustrados en las figuras 30 a 34.

Figura 30. Mezcla para la elaboración de vigas.



Fuente: Propia

Figura 31. Construcción de vigas.



Fuente: Propia

Figura 32. Elaboración de vigas con las respectivas capas de malla



Fuente: Propia

Figura 33. Vigas con capas de malla.



Fuente: Propia.

Figura 34. Platina de 15x50x2.5 con diferentes capas de malla.



Fuente: Propia.

Se elaboraron paneles de 15x7x24 para ser ensayadas a compresión con diferentes capas de mallas, distribuyendo equitativamente los espaciamientos dentro de las formaletas.

Se construyeron nueve paneles para cada abertura de malla como se muestra en las figuras 35 y 36.

Figura 35. Formaleta de 15*7*24, con las capas respectivas de malla.



Fuente: Propia.

Figura 36. Probetas fundidas.



Fuente: Propia.

El tiempo de Curado¹⁵ que se da a las estructuras de ferrocemento es de vital importancia para lograr una buena hidratación en el cemento en sus fases de endurecimiento; el propósito del curado es conservar saturado el mortero, hasta que el espacio originalmente lleno de agua en la pasta de cemento fresco, se haya llenado al grado deseado por los productos de hidratación del cemento: el curado se puede lograr aplicando diferentes métodos como son: el curado por humedad, con membrana impermeable y con vapor, cabe destacar que el curado por humedad, se hace por un espacio de 10 a 14 días consecutivos.

¹⁵ Óp., Cit. Pág. 11

A continuación se presenta un cuadro resumen (tabla 7) donde se encuentran la cantidad de probetas realizadas destinadas para la evaluación de resistencia a compresión, flexión y tracción del ferrocemento.

Tabla 7. Cantidad de especímenes realizadas

ENSAYO	Malla 1/2"				Malla 3/4"			
	Vigas		Paneles	Laminas	Vigas		Paneles	Laminas
	15*15	15x2.5	7.5x15	7.5x2.5	15x15	15x2.5	7.5x15	11.5x2.5
Flexión	9	9			9	6		
Compresión			9				9	
Tracción				12				12

Fuente: Propia.

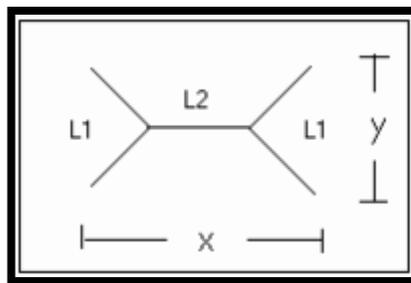
7. ANÁLISIS DE DATOS

Como primera medida es necesario establecer el porcentaje de acero con el que fue construido cada espécimen para ser ensayado a flexión, compresión y tracción. Esta determinación se obtiene mediante el Volumen de Fracción¹⁶ indica la cantidad de acero que se encuentra en una sección de ferrocemento. Como sigue a continuación:

$$V_f = 25 * \pi * d^2 * n * \frac{4L1 + 2L2}{x * y * t} \quad (\%)$$

Dónde:

Figura 37. Dimensiones requeridas para malla hexagonal.



Fuente. Fundamentos para la aplicación del Ferrocemento

d^2 : Diámetro del alambre de la malla en cm

L1: Longitud total del alambre el extremo en cm

L2: Longitud del alambre intermedio en cm

x: Separación horizontal entre alambres en cm

Y: separación vertical entre alambres en cm

¹⁶ Fundamentos para la aplicación del Ferrocemento., Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente., Lima. 2000. P 15

n: Numero de capas de malla

t: espesor de la sección en cm

Tracción: Especímenes de 2 capas

Volumen de fracción calculado

$$Vf = 25 * \pi * 0.89^2 * 2capas * \frac{4 * 0.91 + 2 * 1.09}{2.05 * 0.95 * 2.5}$$

$$Vf = 1.49\%$$

Volumen de fracción calculado para todos los especímenes construidos.

Malla de 1/2"

Tabla 8. Volumen de fracción según número de capas (%)

Ensayo	Espesor del espécimen	Volumen de fracción según número de capas		
		2	4	6
Compresión	7,5	0,0099	0,0198	0,0297
Tracción	2,5	0,0149	0,0297	0,0446
Flexión	2,5	0,0149	0,0297	0,0446
	15	0,0081	0,0163	0,0244

Fuente: Propia

Malla de 3/4"

Tabla 9. Volumen de fracción según número de capas (%)

Ensayo	Espesor del espécimen	Volumen de fracción según número de capas		
		2	4	6
Compresión	7,5	0,0062	0,0123	0,0185
Tracción	2,5	0,0093	0,0185	0,0278
Flexión	2,5	0,0093	0,0185	0,0278
	15	0,0062	0,0123	0,0185

Fuente: Propia

Además del volumen de fracción existe otro parámetro que se determina en secciones de ferrocemento en busca de obtener un control sobre el comportamiento del material llamado Superficie Específica (S_r)¹⁷ se mide como el área de refuerzo en contacto con el mortero dividida por el volumen total del ferrocemento. En este caso se emplea la siguiente expresión para el cálculo.

$$S_r = \frac{4 * V_f}{\emptyset}$$

Dónde:

Volumen de fracción del ferrocemento: V_f

Diámetro del alambre de la malla: \emptyset

Es así, como se obtiene la superficie específica para las probetas fabricadas como sigue:

Tracción: Especímenes de 2 capas malla 1/2"

$$S_r = \frac{4 * 0,0149}{0.89}$$

$$S_r = 0,066 \text{ mm}^2 \text{ mm}^3$$

En la siguiente tabla se registran los resultados obtenidos para la totalidad de las muestras:

¹⁷ MASO SOLES Jordi., Calculo Diseño y Ejecución de tanques de Ferrocemento., Universidad Politécnica de Cataluña. España., 2004., Pág. 53

Malla 1/2"

Tabla 10. Superficie específica según el volumen de fracción ($\frac{mm^2}{mm^3}$)

Ensayo	Espesor del espécimen	Superficie específica según el volumen de fracción ($\frac{mm^2}{mm^3}$)		
		2	4	6
Compresión	7,5	0,04456	0,08913	0,13369
Tracción	2,5	0,06685	0,13369	0,20054
Flexión	2,5	0,06685	0,13369	0,20054
	15	0,03654	0,07308	0,10963

Fuente. Propia.

Malla 3/4"

Tabla 11. Superficie específica según el volumen de fracción ($\frac{mm^2}{mm^3}$)

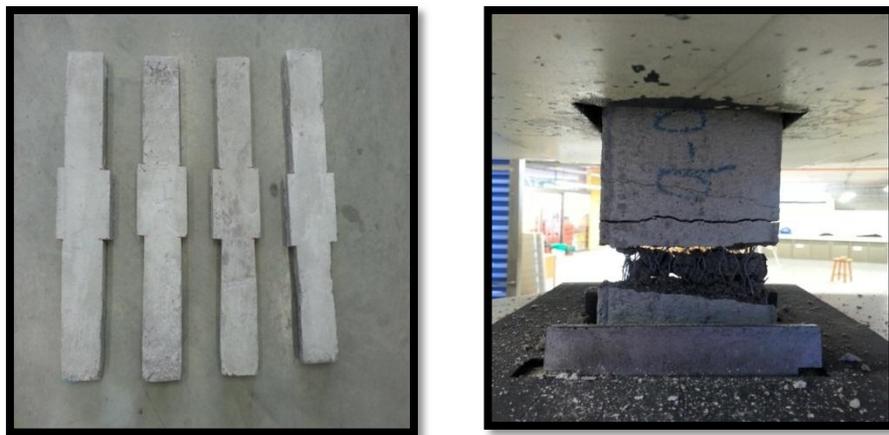
Ensayo	Espesor del espécimen	Superficie específica según el volumen de fracción ($\frac{mm^2}{mm^3}$)		
		2	4	6
Compresión	7,5	0,02774	0,05549	0,08323
Tracción	2,5	0,04162	0,08323	0,12485
Flexión	2,5	0,04162	0,08323	0,12485
	15	0,02774	0,05549	0,08323

Fuente. Propia.

7.1 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DEL FERROCEMENTO

La resistencia a tracción¹⁸ del ferrocemento es independiente del espesor del elemento y equivale a la resistencia última de los alambres de refuerzo. El mortero no aporta a la resistencia a tracción debido a que es un material frágil. El desempeño de este material es expresado en términos de carga mayormente que en términos del esfuerzo a tracción. Para la valoración de la resistencia a tracción de la malla, se elaboraron y ensayaron especímenes como se muestran en la figura 38

Figura 38. Especímenes ensayados a tracción



Fuente: Propia.

Generalmente la resistencia a tracción del ferrocemento utilizando la malla de refuerzo de metal sea soldada, expandida o tejida en su orientación normal corresponde a la capacidad de carga de tracción del refuerzo; es decir, al producto de la carga ultima por el área efectiva del acero en la dirección considerada.

¹⁸ GUZMAN DOMINGUEZ Bruno Roberto y SALCEDO ALVEAR Israel Fernando., Diseño y estudio de elementos tipo "C" sometidos a Flexión, Tracción y Compresión fabricado en Ferrocemento., Universidad de Cuenca., Ecuador., P 56.

- Área efectiva de acero A_s

$$A_s = \sum_{i=1}^n A_{si}$$

Dónde:

A_{si} = Área de sección transversal efectiva de refuerzo por capa de malla en la dirección considerada.

$$A_{si} = \eta * V_{fi} * A_c$$

η = Factor de eficiencia global

V_{fi} = Volumen de fracción de refuerzo por capa de malla.

A_c = Área de sección transversal del ferrocemento.

- Capacidad de carga a la tracción

$$R_t = A_s * R_u$$

R_t = Capacidad de carga

A_s = Área efectiva de acero

R_u = Carga ultima a tracción.

Tracción: Especímenes 2 capas malla 1/2"

Tabla 12. Factor de eficiencia.

Recomended design values of the global efficiency factor of mesh reinforcement η_0 for uniaxial tension or bending (from ACI 549)						
		Woven square wire mesh	Welded square wire mesh	Hexagonal wire mesh	Expanded metal lath	Longitudinal bars
Global Efficiency factor η_0	Longitudinal direction η_0	0,5	0,5	0,45	0,65	1
	Transverse direction η_T	0,5	0,5	0,3	0,2	0
	$A_T \theta=45^\circ$ η_e	0,35	0,35	0,3	0,3	0,7

Fuente. ACI 549

Para este caso se debe tener en cuenta un factor de eficiencia global indicado por la tabla N° 12 $\eta=0,45$ dado para la malla utilizada

Además se tiene un Volumen de Fracción de 1,49%, la Carga Máxima soportada $R_t = 1734,38$ N y un Área de 2000 mm²

$$A_{si} = 0,45 * \frac{1,49}{100} * 2000$$

$$A_s = \sum_{i=1}^2 A_{si} \quad A_s = 6,66 * 2 = 13,32 \text{ mm}^2$$

$$R_t = 1734,38 * 13,32 = 23101,9 \text{ N} * \text{mm}^2$$

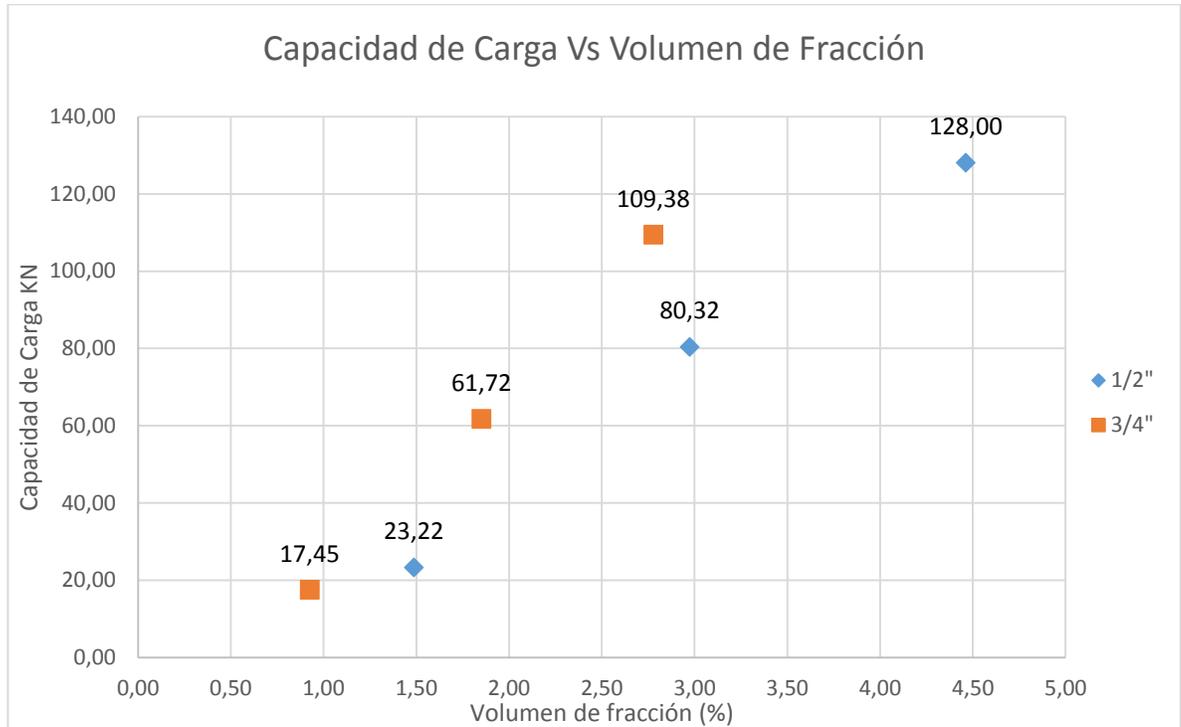
La siguiente tabla presenta los resultados de capacidad de carga para cada espécimen.

Tabla 13. Cálculos realizados a láminas de 0,08x0,50x0,025 (m) a tracción.

LAMINAS 0,08*0,50*0,025							
Número de capas de malla	Abertura	Carga (N)	Esfuerzo N/mm ²	Media	Desviación	Capacidad de Carga KN	Resistencia N/mm ²
2	1/2"	1500	0,75	0,81	0,08	23,21	150,70
		1734,38	0,87				174,24
		Muestra fallida	Muestra fallida				Muestra fallida
	3/4"	2000	1,00	1,02	0,03	17,44	267,90
		2093,75	1,05				280,46
		Muestra fallida	Muestra fallida				Muestra fallida
4	1/2"	2687,5	1,34	1,36	0,10	80,31	135,00
		2546,88	1,27				127,93
		2671,88	1,34				134,21
		3000	1,50				150,70
	3/4"	3515,63	1,76	1,42	0,45	61,72	235,46
		3703,13	1,85				248,02
		2140,63	1,07				143,37
		1968,75	0,98				131,86
6	1/2"	2859,38	1,43	1,30	0,26	128,00	95,75
		2078,13	1,04				69,59
		2281,25	1,14				76,39
		3187,5	1,59				106,74
	3/4"	2421,88	1,21	1,64	0,42	109,38	108,14
		3390,63	1,70				151,39
		4375	2,19				195,35
		2921,88	1,46				130,46

Fuente. Propia.

Figura 39. Capacidad de Carga vs Volumen de fracción (%) de especímenes a tracción.



Fuente. Propia.

Analizando el comportamiento de la capacidad de carga obtenida por los especímenes se observa un mejor desempeño para la malla de abertura de $\frac{1}{2}$ " tomando los valores de carga máxima para este tipo de abertura se tiene una diferencia del orden de 14,75% comparada con las cuantías de capacidad de carga registradas para la abertura de $\frac{3}{4}$ " debido a su mayor contenido de acero.

Como es de esperarse la capacidad de carga de la malla aumenta en función del número de capas de mallas, obteniendo un comportamiento de forma lineal para los dos tipos de malla trabajados en el proyecto. Cabe resaltar que durante la ejecución del ensayo se deben tener en cuenta el tiempo de curado de los especímenes como ésta se encuentra embebida en el mortero al obtener un

tiempo de curado más prolongado no permite que la malla trabaje de manera correcta debido a la rigidez que ella adquiere, como se ve en la figura 40

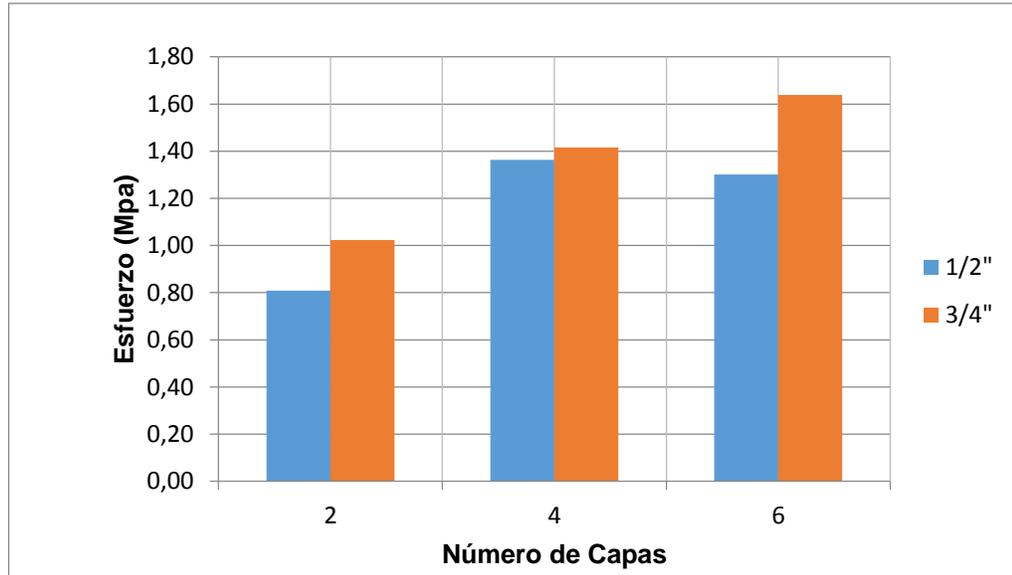
Figura 40. Evidencia de malla rigidizada.



Fuente: Propia

Para lograr que el ensayo se elabore correctamente la malla hexagonal debe ser totalmente embebida en mortero, porque este tipo de malla se caracteriza por su flexibilidad y sus bajos diámetros, de tal forma que se logre el reporte de carga máxima soportada a tracción.

Figura 41. Esfuerzo vs Volumen de fracción (%) de especímenes a tracción.



Fuente. Propia.

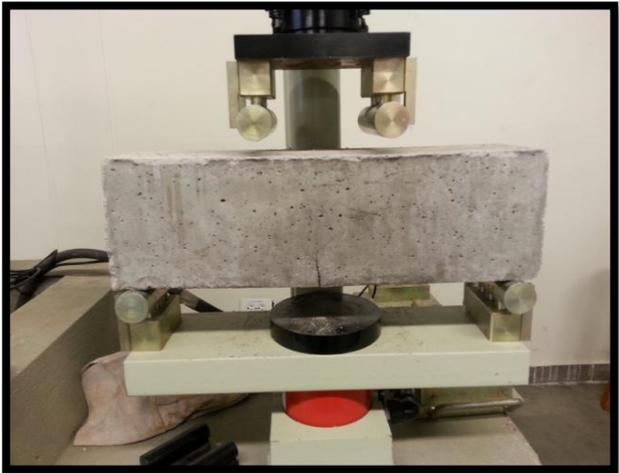
A pesar que la capacidad de carga es mayor para la malla de $\frac{1}{2}$ " presenta esfuerzos de valores bajos comparados con la malla de abertura de $\frac{3}{4}$ ", ya que la aparición de grietas en los especímenes de $\frac{1}{2}$ " se tienen en tiempos más tempranos por su alto contenido de acero, lo que ocasiona deformaciones en el elemento de ferrocemento de mayores dimensiones.

7.2 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

El procedimiento de análisis para obtener la resistencia última a flexión del ferrocemento se aplica de la misma forma cómo se estudian las vigas de concreto, esta metodología se encuentra más adelante y calcula el módulo de rotura de las probetas realizadas en el laboratorio. A continuación, se determinará la resistencia a la flexión esperada para los especímenes de acuerdo con los lineamientos que se encuentran consignados en la ACI 549, mediante la ejecución del ensayo a

flexión apoyando los especímenes a un tercio de luz de la longitud, como se muestra a continuación:

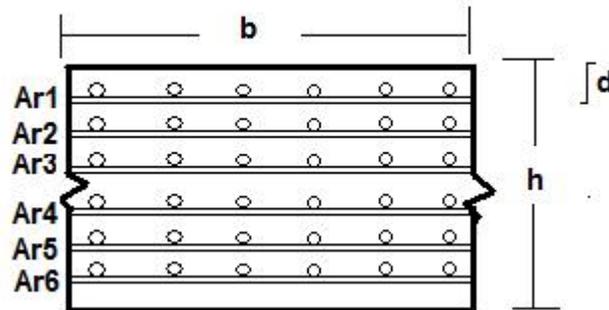
Figura 42. Muestra de láminas y vigas en ensayo a flexión.



Fuente: Propia.

Para los cálculos de resistencia a la flexión se tiene en cuenta la sección transversal del espécimen mostrado en la figura 43.

Figura 43. Sección transversal del espécimen.



Fuente propia.

Como primera medida se debe obtener el momento nominal de las secciones de ferrocemento como sigue a continuación:

Flexión: Especímenes de 6 capas de $\frac{1}{2}$ "

N: 6 capas

V_f : 4.46%

f'_c = 5000 psi

b = 6"

h = 1"

d_b = 0,035" (diámetro del alambre de la malla)

d'' = 0,05" (película transparente entre el mortero y la última capa de malla)

1. Se seleccionan los valores recomendados para f_y , E_r y η .

f_y = 45 Ksi

E_r = 15000 Ksi

η = 0,45

2. Se calcula β_1 , V_{fi} y A_{si}

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 * \frac{5000 \text{ psi} - 4000 \text{ psi}}{100 \text{ psi}} \rightarrow \beta_1 = 0,80$$

$$V_{fi} = \frac{V_f}{N} \rightarrow \frac{4,46\%}{6} = 0,74\%$$

$$A_{si} = \eta * V_{fi} * A_c \rightarrow A_{si} = 0,45 * \frac{0,74\%}{100} * 6 * 1 = 0,01998 \text{ pulg}^2$$

3. Cálculo de la profundidad de cada capa de refuerzo.

S: distancia existente entre cada capa de reforzamiento

$$s = \frac{h - 2 * d'' + d_b}{N - 1}$$

$$s = \frac{1" - 2 * 0,05" + 0,035}{6 - 1}$$

$$s = 0,173"$$

De esta manera se procede al cálculo de todas las distancias de malla como sigue:

$$d1 = d'' + \frac{1}{2} d_b \rightarrow d1 = 0,05 + \frac{0,035}{2} \rightarrow d1 = 0,0675 \text{ pulg.}$$

$$d2 = d1 + s \rightarrow d2 = 0,0675 + 0,173 \rightarrow d2 = 0,2405 \text{ pulg.}$$

$$d3 = 0,2405 + 0,173 \rightarrow d3 = 0,4135 \text{ pulg.}$$

$$d4 = 0,4135 + 0,173 \rightarrow d4 = 0,5865 \text{ pulg.}$$

$$d5 = 0,5865 + 0,173 \rightarrow d5 = 0,7595 \text{ pulg.}$$

$$d6 = 0,7595 + 0,173 \rightarrow d6 = 0,9325 \text{ pulg.}$$

4. Se determina la distancia desde la fibra que se encuentra a compresión hasta el eje neutro de la sección (c) mediante ensayo y error, de tal manera que la sumatoria de momentos entre las fibras de compresión y tracción de la viga sea igual a cero.

El valor seleccionado para $c = 0,172$ después de realizar suficientes iteraciones para aproximar la sumatoria de momentos a cero.

Entonces:

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_r} \rightarrow \epsilon_y = \frac{45 \text{ ksi}}{15000 \text{ ksi}} = 0,003$$

$$\epsilon_{cu} = 0,003 \text{ Tensión de compresión, valor recomendado por la ACI}$$

$$\epsilon_{s1} = \frac{d1 - c}{c} * \epsilon_{cu} \rightarrow \epsilon_{s1} = \frac{0,079 - 0,172}{0,172} * 0,003 \rightarrow \epsilon_{s1} = -0,001822$$

El signo negativo significa que la fibra se encuentra a compresión, y, debe ser multiplicada por el modulo efectivo de la malla hexagonal siendo 45 ksi, sugerido por el comité 549. 1R-93 de la ACI, ya que no supera el valor de ϵ_y , de esta manera se tiene que:

$$\epsilon_{s1} = 0,00182267 * 15000 = 27,34 \text{ ksi compresión}$$

De esta forma se calculan los demás valores de ϵ_s para cada capa de la sección de ferrocemento, se tiene en cuenta que para los valores que sean mayores a ϵ_y se asume un valor de ϵ_{si} igual a $f_y = 45$ ksi.

$$\epsilon_{s2} = \frac{0,2405 - 0,172}{0,172} * 0,003 = 0,001194 * 15000 = 17,921 \text{ ksi tracción}$$

$$\epsilon_{s3} = \frac{0,4135 - 0,172}{0,172} * 0,003 = 0,004212 \approx f_y = 45 \text{ ksi}$$

$$\epsilon_{s4} = \frac{0,5865 - 0,172}{0,172} * 0,003 = 0,007229 \approx f_y = 45 \text{ ksi}$$

$$\epsilon_{s5} = \frac{0,7595 - 0,172}{0,172} * 0,003 = 0,01024 \approx f_y = 45 \text{ ksi}$$

$$\epsilon_{s6} = \frac{0,9325 - 0,172}{0,172} * 0,003 = 0,01326 \approx f_y = 45 \text{ ksi}$$

Ahora se calculan los momentos a compresión y a tracción.

$$C = 0,85 * f'_c * b * \beta_1 * c$$

$$C = 0,85 * 5000 * 6 * 0,8 * 0,172 = 3508,8 \text{ lb}$$

Como la primera fibra se encuentra a compresión se debe utilizar la siguiente expresión:

$$C_{s1} = f_{s1} - 0,85 * f'_c * A_{s1} * 10^3$$

$$C_{s1} = 27,34 - 0,85 * 5000 * 0,01998 * 10^3 = 436,4186 \text{ lb}$$

$$T_{si} = f_{si} * A_{si}$$

$$T_{s2} = 17,921 * 0,01998 * 1000 = 359,687 \text{ lb}$$

$$T_{s3} = 45 * 0,01998 * 1000 = 903,15$$

Es así como se obtiene los valores de las demás fibras ya que se asume el valor de f_y de 45 ksi por lo tanto se tiene que:

$$T_{s3} = T_{s4} = T_{s5} = T_{s6}$$

Para corroborar el valor de c seleccionado se realiza la sumatoria de momentos, verificando que el valor resultante sea cero.

$$T = C = 0?$$

$$3508,8 + 463,418 - 359,68 - 4 * 903,15 = -0,07 \approx 0$$

5. Por último se calcula la capacidad de momento nominal

$$M_n = \sum_{i=1}^n C_{si} \sigma_{T_{si}} d_i - \frac{\beta_1 * c}{2}$$

$$\begin{aligned} M_n = & 463,418 \text{ lb} * 0,0675 - 0,0688 + 359,68 \text{ lb} * 0,2405 - 0,0688 \\ & + 903,15 \text{ lb} * 0,4135 - 0,0688 + 903,15 \text{ lb} * 0,5865 - 0,0688 \\ & + 903,15 \text{ lb} * 0,7595 - 0,0688 + 903,15 \text{ lb} * 0,9325 - 0,0688 \end{aligned}$$

$$M_n = 2243,88 \text{ lb} - \text{pulg}$$

Después de determinar el momento nominal a flexión para la sección de ferrocemento se toma la fórmula de la flexión, asume que el elemento compuesto se comporta como un material lineal elástico para el rango de carga contemplado, y, que las secciones planas permanecen de esta manera después de haber ejecutado el ensayo. Para el caso del ferrocemento se supone que el material se comporta de una forma lineal elástica antes de la aparición de la primera grieta. Y es calculado como sigue:

$$\sigma_m = \frac{M * y}{I_{tr \text{ uncracked}}}$$

Donde

M: Momento externo aplicado

y: Distancia vertical desde la fibra de la que se está desarrollando la tensión calculada hasta el centroide de la sección.

I_{tr} : Momento de inercia de la sección no agrietada.

Es así como se procede a determinar el momento de inercia¹⁹ para el espécimen de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$I_{tr \text{ uncracked}} = \frac{b * h^3}{12} + n - 1 \quad A_{si} \left(\frac{h}{2} - d_i \right)^2$$

Donde:

b: ancho de la sección de ferrocemento

h: espesor de la sección de ferrocemento

A_{si} : área efectiva de acero por cada capa de malla

d_i :Distancia desde la fibra a compresión hasta el eje neutro de la sección

Remplazando:

$$\begin{aligned} I_{tr} = & \frac{6 * 1}{12}^3 + (13,7 - 1)(0,02007 * \frac{1}{2} - 0,0675)^2 + (0,02007 * \frac{1}{2} - 0,2405)^2 \\ & + (0,02007 * \frac{1}{2} - 0,4135)^2 + (0,02007 * \frac{1}{2} - 0,5865)^2 + (0,02007 \\ & * \frac{1}{2} - 0,7595)^2 + (0,02007 * (\frac{1}{2} - 0,9325))^2 \end{aligned}$$

$$I_{tr} = 0,6334 \text{ pulg}^4$$

Ahora se tienen los parámetros clave que permiten obtener σ_m , se debe tener en cuenta que la distancia vertical nombrada en la ecuación se toma como la distancia empleada para el cálculo del momento nominal a flexión (c)

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{2243,8 * 0,172}{0,6334} \\ \sigma &= 609,32 \text{ lb pulg}^2 \end{aligned}$$

¹⁹ NAAMAN Antonie E. Ferrocement & Laminated Cementitious Composites. Techno Press 3000, 1st edition, 2000. P. 126

$$\sigma = 609,32 \frac{lb}{pulg^2} * \frac{4,44 N}{1 Lb} * \frac{1 pulg^2}{645,16} = 4,19 Mpa$$

El anterior valor servirá como punto de referencia para los productos que se encontrarán a partir de los especímenes elaborados y fallados en el laboratorio. De acuerdo a la metodología de análisis convencional del concreto para ensayos a flexión en especímenes tipo viga se emplea la ecuación de módulo de rotura, y así, se permite una comparación entre las expectativas de desempeño del material y las cuantías logradas.

$$MR = \frac{P * L}{b * h^2}$$

Dónde:

P: Carga ultima soportada por el elemento.

L: Distancia entre los apoyos de la carga

b: ancho de la sección transversal del elemento.

h: altura de la sección transversal del elemento.

Flexión: Especímenes 2 capas malla ½". (Vigas 0,15*0,15*0,5)

$$MR = \frac{1966 * 150}{150 * 25^2} = 3,15 N \text{ mm}^2$$

Utilizando este procedimiento se realizó el cálculo del Módulo de Rotura de todos los especímenes sometidos a flexión.

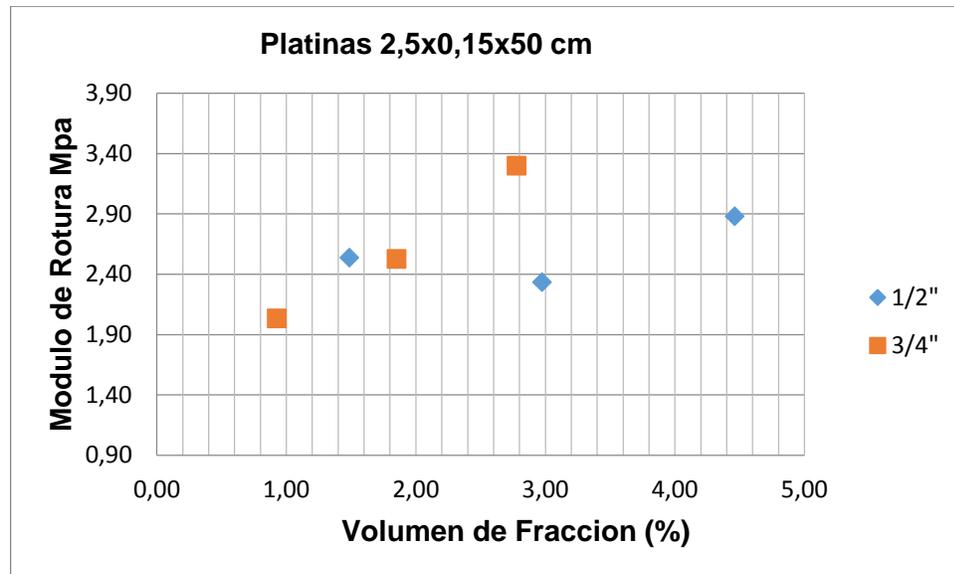
Dónde:

Tabla 14. Cálculos realizados a Platinas 0,25*0,15 a Flexión.

PLATINAS 0,25x0,15x0,50 (m)					
Numero de capas de mallas	Abertura	Carga (KN)	Módulo de Rotura(MPa)	Media Mpa	Desviación
2	1/2"	1,571	2,51	2,54	0,02
		1,595	2,55		
		1,589	2,54		
	3/4"	1,150	1,84	2,03	0,35
		1,138	1,82		
		1,521	2,43		
4	1/2"	1,368	2,19	2,33	0,23
		1,621	2,59		
		1,385	2,22		
	3/4"	1,566	2,51	2,53	0,45
		1,863	2,98		
		1,306	2,09		
6	1/2"	1,849	2,96	2,88	0,31
		1,583	2,53		
		1,966	3,15		
	3/4"	2,035	3,26	3,30	0,13
		1,998	3,20		
		2,150	3,44		

Fuente. Propia.

Figura 44. Módulo de rotura vs Volumen de fracción (%) de especímenes a flexión.



Fuente. Propia.

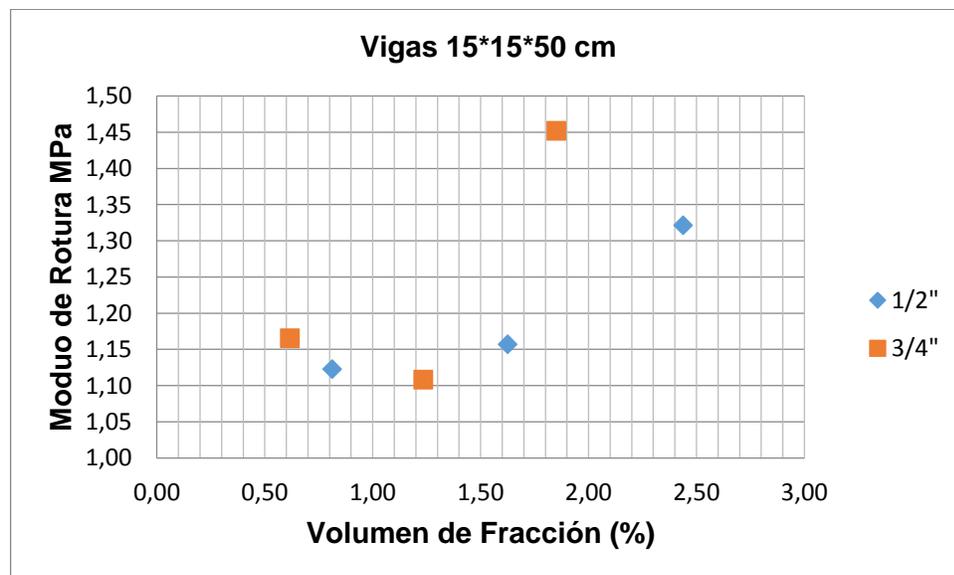
Tabla 15. Cálculos realizados a vigas 0,15*0,15 a Flexión.

VIGAS 0,15x0,15 m					
Número de capas de malla	Abertura	Carga (KN)	Módulo de Rotura (KN)	Media	Desviación
2	1/2"	25,355	112,69	112,26	1,44
		25,523	113,44		
		24,897	110,65		
	3/4"	27,83	123,69	116,55	6,63
		25,963	115,39		
		24,879	110,57		
4	1/2"	26,379	117,24	115,69	4,50
		24,89	110,62		
		26,823	119,21		
	3/4"	22,833	101,48	110,84	8,19
		26,252	116,68		
		25,733	114,37		

6	1/2"	34,615	153,84	132,14	18,81
		27,469	122,08		
		27,113	120,50		
	3/4"	31,239	138,84	145,19	14,61
		36,427	161,90		
		30,334	134,82		

Fuente. Propia.

Figura 45. Módulo de rotura vs Volumen de fracción (%) de especímenes a flexión.



Fuente. Propia.

Al hacer una comparación entre las gráficas mostradas anteriormente se muestra el comportamiento que tienen las vigas y las platinas, es notable que a pesar que las vigas tengan un mayor espesor su rendimiento no es el esperado, esto se debe a que su volumen de fracción es menor al que se obtiene con las láminas de las dimensiones que caracterizan el ferrocemento, lo cual quiere decir, que el contenido de acero en las estructuras de ferrocemento otorgan un factor determinante para el direccionamiento de su comportamiento en conjunto.

A pesar de que el volumen de fracción posee un mayor porcentaje para las mallas de abertura de 1/2" no se cumplen las expectativas de esfuerzo ultimo para los especímenes elaborados con este tipo de mallas, en cambio se reportan mayores valores con las probetas que se construyeron con la malla de abertura de 3/4", y, se ve representado en las gráficas de estos elementos, lo cual confirma que al tener un reforzamiento mayor la aparición de grietas se hace de una forma más rápida durante la ejecución del ensayo. Aunque no se logra obtener una uniformidad en los resultados con la malla de abertura de 3/4". Aunado a esto se observa un comportamiento similar en las gráficas de abertura de 1/2", y, como se esperaba se llegaron a cuantías más altas en proporción al número de mallas que se encontraban en los especímenes en los dos tipos de malla trabajada.

Tabla 16. Comparación Modulo de rotura y esfuerzo teórico.

Platinas 0,025x0,15x0,50 m			
Numero de Capas	Abertura	Módulo de Rotura Mpa	Esfuerzo Teórico Mpa
2	1/2"	2,54	1,01
	3/4"	2,03	0,41
4	1/2"	2,33	2,17
	3/4"	2,53	1,01
6	1/2"	2,88	2,22
	3/4"	3,30	4,19

Fuente. Propia.

Al comparar los valores experimentales con los teóricos obtenidos según la metodología de cálculo de la ACI 549 se visualiza una diferencia cuantitativa entre los datos de la misma tipología de especímenes, las razones por las cuales se presentan estas divergencias son numerosas, como las suposiciones de resistencia a la compresión del mortero, ya que se encuentra sobrevalorado por el lado de la seguridad para un diseño de mezcla, que difícilmente puede lograr el

alcance propuesto por la bibliografía sin necesidad de algún tipo de aditivo para mejorar su desempeño, desconociendo si este agente podría tener repercusiones en el comportamiento de la malla, además se debe tener en cuenta que los datos de resistencia a la tracción del alambre que compone la malla no llegara a tener los resultados que se garantiza por parte del proveedor, ya que el tejido de la malla no permite que los alambres se encuentren paralelos a la carga, y el diámetro del alambre trabajado es menor a los que se encuentran referenciados en la normativa. Estos dos factores son solicitados para los cálculos del aproximamiento teórico del esfuerzo desarrollado a flexión y se encuentra afectando las cuantías requeridas para este tipo de ensayo, también cabe destacar que la clase de malla adaptada para el proyecto, reporta datos que proyecta una gran dispersión impidiendo caracterizar los resultados que se adquieren con malla hexagonal.

7.3 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Las estructuras de ferrocemento, al igual que en otras estructuras basadas en materiales frágiles, se evalúan de acuerdo a la resistencia a compresión ya que este es el parámetro más utilizado para calificar el comportamiento del material ante toda clase de solicitaciones. La resistencia a la compresión²⁰ del ferrocemento se encuentra dependiente de la matriz cementante del mortero, y además se ve afectada por numerosos parámetros, como; las características del elemento que se encontrara en servicio, ya que los especímenes prismáticos generalmente presentan una gran dispersión en los resultados que se pueden obtener de los ensayos a compresión practicados, las proporciones de mezcla que se toman en cuenta en el diseño de mortero, el direccionamiento de las mallas; ya que las mallas que se encuentran longitudinalmente en el sentido de la carga posee un desempeño mucho menor, además de la orientación misma dentro del

²⁰ Óp. Cit., P. 57

elemento de ferrocemento, se recomienda que para evitar estas disminuciones en la resistencia a la compresión del compuesto las mallas deben ser colocadas con el mayor tensionamiento posible para así poder evitar el pandeo que se ocasiona en las fibras de refuerzo.

Teóricamente se establece una resistencia a la compresión del ferrocemento en un rango de 30 a 70 MPa, aunque se debe tener en cuenta la variabilidad de los parámetros mencionados anteriormente que no permiten obtener unos valores guía de forma generalizada. Además cabe resaltar que el volumen de fracción también representa un factor muy importante, ya que según Naaman si la cantidad de acero en el elemento de ferrocemento aumenta su resistencia a la compresión lo hará también y en algunas ocasiones superando la resistencia a la compresión de la matriz de mortero. Cuando no existen valores experimentales para determinar la resistencia a la compresión se asume un valor equivalente al 85% de la resistencia a la compresión del mortero, pero es común para propósitos de diseño asumir una resistencia de iguales valores entre el ferrocemento y el mortero.

La Resistencia es calculada teniendo en cuenta los valores de cargas obtenidos, en el ensayo realizado, esta carga es dividida por el área transversal del panel como se muestra: Compresión: Especímenes de 2 capas de ½”

$$R = \frac{\text{Carga (KN)}}{\text{Área transversal}}$$

$$R = \frac{214,55 \text{ KN}}{75 * 240 \text{ mm}} = 11,92 \text{ KN}$$

Dónde:

R= Resistencia última a compresión.

C= Carga última

A= Área transversal de la sección de ferrocemento.

Figura 46. Paneles y cilindros en ensayo a compresión.



Fuente: Propia.

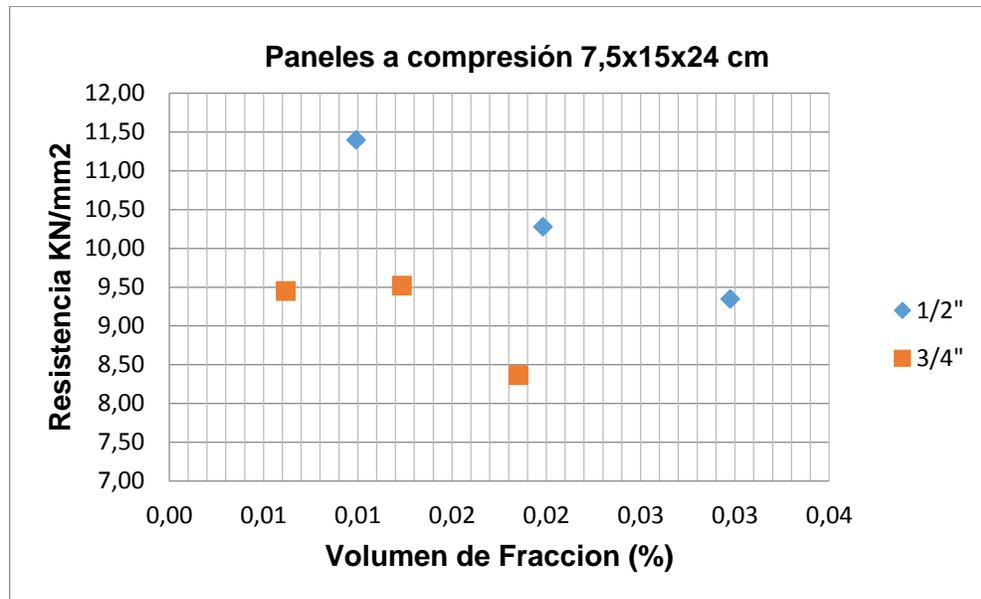
De esta manera se realiza el cálculo para los paneles construidos con diferentes números de capas de malla y cilindros de 3"x6".

Tabla 17. Cálculos realizados a Paneles a compresión 7,5*15*24.

Paneles a compresión 7,5x15x24 cm					
Número de capas	Abertura	Carga (KN)	Resistencia N/mm ²	Media	Desviación
2	1/2"	214,55	11,92	11,39	0,98
		216,06	12,00		
		184,69	10,26		
	3/4"	182,22	10,12	9,45	0,59
		165,31	9,18		
		162,61	9,03		
4	1/2"	199,54	11,09	10,27	0,83
		169,73	9,43		
		185,53	10,31		
	3/4"	173,53	9,64	9,51	0,26
		165,79	9,21		
		174,47	9,69		
6	1/2"	201,3	11,18	9,34	1,64
		158,25	8,79		
		144,98	8,05		
	3/4"	153,32	8,52	8,37	0,87
		164,63	9,15		
		133,79	7,43		

Fuente. Propia.

Figura 47. Resistencia vs Volumen de fracción (%) de especímenes a compresión.



Fuente. Propia.

Los especímenes fabricados de ferrocemento para ser ensayados a compresión se fallaron de tal manera que las fibras de refuerzo se encontraban de forma longitudinal en toda la extensión de elemento, es así, como la falla que se reportaba en todos los paneles elaborados tenía un agrietamiento en las partes que se encontraban las mallas de refuerzo, ocasionando una disminución en la resistencia a compresión del ferrocemento de acuerdo al aumento del número de mallas como se puede visualizar en los datos promedio obtenidos en laboratorio.

Además del contenido de mallas en los especímenes también se observa una diferencia cuantitativa en los valores obtenidos por los dos tipos de malla trabajados, ya que a pesar de que en los proyectos revisados en la bibliografía se manejan mallas de aberturas entre 1" y 1 ¼" para realizar los elementos que se citaron con anterioridad, se reportan mejores valores de desempeño para las aberturas de ½" que las de ¾" alcanzado diferencias de 0,7 MPa a 1,9 MPa para el mismo contenido de mallas.

La siguiente tabla reporta los valores obtenidos en laboratorio para los cilindros elaborados de 3"x6"

Tabla 18. Cálculos realizados a cilindros a compresión con diseño de mortero de 5000 psi.

CILINDROS		
Espécimen	Carga (KN)	Esfuerzo N/mm ²
1	59,77	13,11
2	55,54	12,18
3	67,86	14,88
4	68,62	15,05
5	57,55	12,62
6	64,89	14,23
7	73,09	16,03
8	77,10	16,91
9	81,84	17,95
10	60,90	13,35
11	76,90	16,86
12	48,40	10,61
13	68,34	14,99
14	84,72	18,58
15	52,86	11,59
16	50,10	10,99
17	83,18	18,24
18	66,76	14,64
19	101,74	22,31
20	53,83	11,80
21	67,54	14,81
22	68,34	14,99
23	70,05	15,36
24	84,28	18,48

Fuente. Propia.

Cabe resaltar que los cilindros se construyeron con un mortero ordinario, es decir no se tuvo en cuenta la adición de algún componente para lograr una resistencia a la compresión equivalente de 5000 psi ya que no se relaciona alguna información sobre los efectos secundarios de estos aditivos que puedan afectar el comportamiento del reforzamiento dentro del compuesto de ferrocemento.

A nivel comparativo en el ensayo a compresión entre los paneles de ferrocemento y los cilindros de mortero se evidencia una disminución equivalente al 20% respectivamente, obtenido mediante un promedio en las cuantías alcanzadas para cada tipo de espécimen.

8. CONCLUSIONES

A continuación se presenta un cuadro resumen de las características encontradas en los materiales empleados en el proyecto, y hallados en el área metropolitana.

Malla de Refuerzo	Diámetro de alambre	0.78 y 0.89mm calibre No 22 y No 20 respectivamente
	Tipo de junta	Tejida Electro soldada Ondulada
	Tipo de abertura	Hexagonal Cuadrada Circular Diamante
	Tamaño de abertura	1/2" 3/4" 1" 1 1/4"
Diseño de mezcla	Cemento	Cualquier tipo dependiendo de los requerimientos
	Relación agua cemento	0.35 - 0.55 por peso
	Resistencia de diseño	5000 psi
	Tiempo de Curado	10 - 14 días
	Relación cemento arena	1:2 por peso
Propiedades mecánicas del Ferrocemento	Resistencia a Tracción	Por encima de 70 MPa
	Resistencia a Compresión	Representa el 80% de la resistencia a la compresión del mortero
	Resistencia a Flexión	Incrementa de acuerdo al aumento del volumen de fracción
Propiedades físicas del Ferrocemento	Color	Gris
	Dureza	Alta resistencia al impacto
	Espesor	Máximo 1"

- La resistencia del ferrocemento es variable en términos de número capas, abertura y orientación de la malla, ya que el alto contenido de acero en el ferrocemento puede alcanzar valores más significativos en el desempeño del material pero al mismo tiempo ocasiona deformaciones que son más representativas visualmente, esto ocurre cuando hay presencia de mallas de pequeñas aberturas. Además la orientación de las mallas embebidas en el mortero proporcionan un factor determinante ya que no trabaja de una manera idónea el conjunto mortero-malla, al encontrarse ubicado en forma de ángulo impidiendo que se establezcan mayor número de alambres paralelos a la carga, lo que conlleva a resultados más bajos en su resistencia.
- Los materiales empleados para la fabricación de la matriz de mortero del ferrocemento no poseen una marcada diferencia con las características que deben cumplir los compuestos para la construcción de elementos estructurales convencionales, ya que los requerimientos solicitados por norma son similares a los que se emplean en el concreto, exceptuando la malla de reforzamiento porque esta diverge en la forma en la que se encuentra, ya sea cuadrada, de metal expandido, soldada, hexagonal, electro soldada, tejida, acerada entre otras, también en los diámetros del alambre que se menciona en la guía de ferrocemento de la ACI se establecen diámetros mayores de alambre, encontrando un aumento de 16,55% en tamaño comparando los alambres de la malla que es de popular uso en la ciudad y los que se encuentran referenciados en a ACI 549, además las aleaciones de las cuales está conformada el acero de la malla no garantizan que correspondan en las mismas proporciones a las empleadas por la norma.
- Es viable manejar espesores en elementos de ferrocemento que no sean mayores a una pulgada, ya que como se evidenció en el comportamiento de los especímenes sometidos a flexión se demostraron resultados eficientes a los elementos que tenían una relación de espesor-altura equivalente a $R= 1/20$

afectando directamente el volumen de fracción, el cual, es una de las variables determinantes del desempeño que pueda lograr el ferrocemento.

- El tiempo de curado para las láminas fabricadas y ensayadas a tracción de la malla debe ser de máximo siete (7) días, puesto que si el mortero adquiere una resistencia significativa no permite una trabajabilidad necesaria a la malla impidiendo desempeñarse de forma idónea durante la ejecución del ensayo, y de este modo no se obtienen los valores reales de capacidad de carga de la malla.
- El mejor tipo de malla a trabajarse en el ferrocemento podría determinarse como la malla de abertura de $\frac{3}{4}$ " para este proyecto de investigación, debido a que el alto contenido de acero en las secciones de fabricadas ocasiona un fisuración en los elementos de ferrocemento, pues se utilizan mallas con aberturas muy pequeñas, por ello las mallas de mayor abertura son ideales para trabajar, porque presentan un volumen de fracción moderado y alcanzan a tener la suficiente flexibilidad para emplearse de forma correcta en un proceso constructivo.

9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda ampliar el campo muestral del laboratorio, porque se podría llegar a obtener unos resultados que sean confortables de acuerdo a los lineamientos de la ACI, porque durante el desarrollo del proyecto, fue necesario realizar adaptaciones a los especímenes elaborados en ferrocemento, que cumplieran con los requerimientos de la normatividad y se ajustaran a las dimensiones de la instrumentación con la que se opera en el laboratorio.
- Se propone realizar un estudio con mayor profundización para los materiales que se emplean en la fabricación del ferrocemento de tal manera que se permita establecer una metodología de diseño y construcción aplicable para Colombia.
- Se recomienda realizar estudios donde se implemente el ferrocemento como elemento estructural y se evalúe de acuerdo a las cargas de servicio para las que se encuentra diseñado.
- Se sugiere adoptar al diseño de mezcla aditivos que permitan llegar a obtener la resistencia a compresión equivalente a 5000 PSI analizando las posibles repercusiones que pueda tener la implementación de este agente en la malla de reforzamiento.

BIBLIOGRAFÍA

BEDOYA RUIZ Daniel Alveiro., Estudio de resistencia y vulnerabilidad sísmicas: aplicación a casas de Ferrocemento. Universidad de Medellín., Medellín., Colombia., Pág. 34

BEDOYA RUIZ Daniel., ÁLVAREZ BETANCUR David., Comportamiento de viviendas de ferrocemento bajo cargas cíclicas. Revista de Ingenierías. Universidad de Medellín, Vol 8, num 15. Julio-Diciembre, 2009 Pág. 39

Byrne, J.G., and Wright, W. "An investigation of Ferro-cement using Expanded Metal" Concrete and construction engineering. Londres. 1961. Pag. 5

EL FERROCEMENTO: Una opción Tecnológica para la construcción de tanques de almacenamiento de agua Lima Julio 2007 Pág. 7

FUNDAMENTOS PARA LA APLICACIÓN DEL FERROCEMENTO., Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente., Lima. 2000. P 15

GUERRERO ZUÑIGA Aydeé Patricia., GONZÁLEZ SALCEDO Luis Octavio., Conceptos Generales sobre Ferrocemento., Palmira., 2008., Pág. 8

GUÍA DE CONSTRUCCIÓN PARA ESTRUCTURAS DE FERROCEMENTO., Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente., Lima., 2003. Pág. 4

Guide for the Design Construction and Repair of Ferrocemento. American Concrete Institute. ACI Committee 549.

GUZMÁN DOMÍNGUEZ Bruno Roberto y SALCEDO ALVEAR Israel Fernando.,
Diseño y estudio de elementos tipo “C” sometidos a Flexión, Tracción y
Compresión fabricado en Ferrocemento., Universidad de Cuenca., Ecuador., P 56.

INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. CEMENTO. DEFINICIONES. Norma
Tecnica Colombiana. Pag. 1

MASO SOLES Jordi., Calculo Diseño y Ejecución de tanques de Ferrocemento.,
Universidad Politécnica de Cataluña. España., 2004., Pág. 53

NAAMAN Antonie E. Ferrocement & Laminated Cementitious Composites. Techno
Press 3000, 1st edition, 2000. P. 126

SALEME Horacio, MÉNDEZ MUÑOZ José, COMOGLIO Susana. Ferrocemento un
material apropiado en nuestro medio. Universidad de Tucuman. Octubre 2012.
Pag. 20.

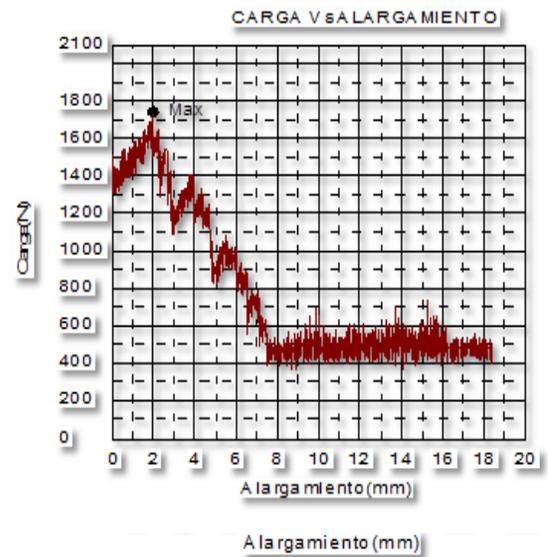
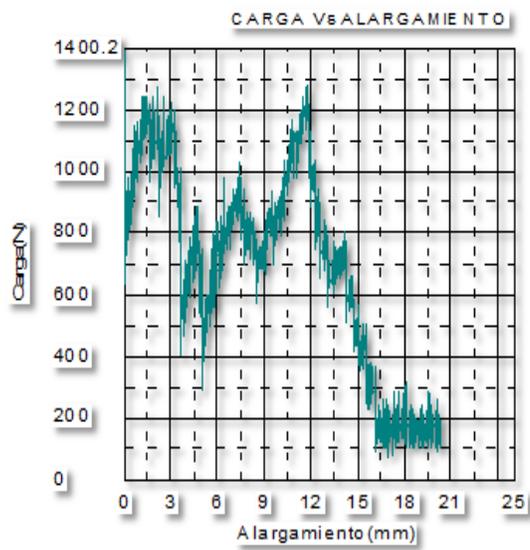
SANTIBAÑEZ BARRIENTOS Lisette Marlene., Construcción de Vivienda Social de
Altura en Ferrocemento. Universidad Austral de Chile. Chile., 2004., Pág. 13

WHANG Benjamin. Comparison study of aluminium, ferrocement, and fiber-
reinforced plastic for small craft in Korea. December 1972. Pag.5

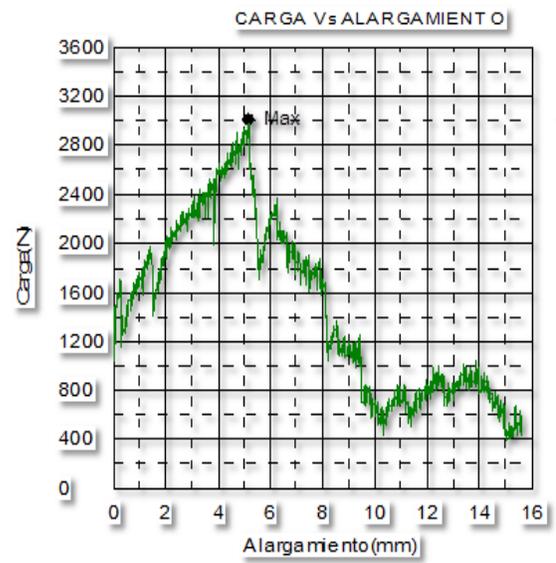
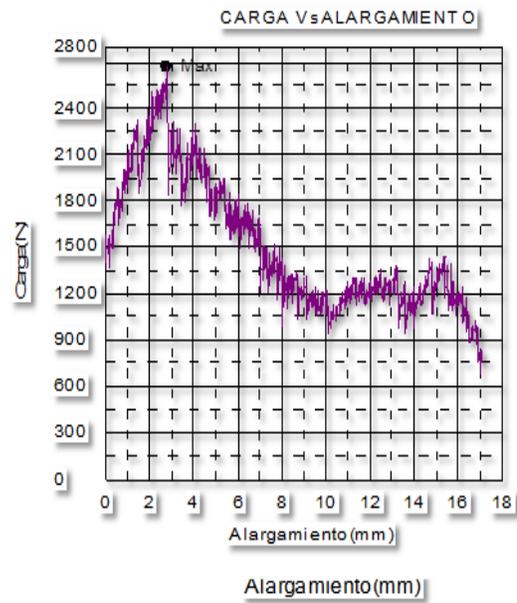
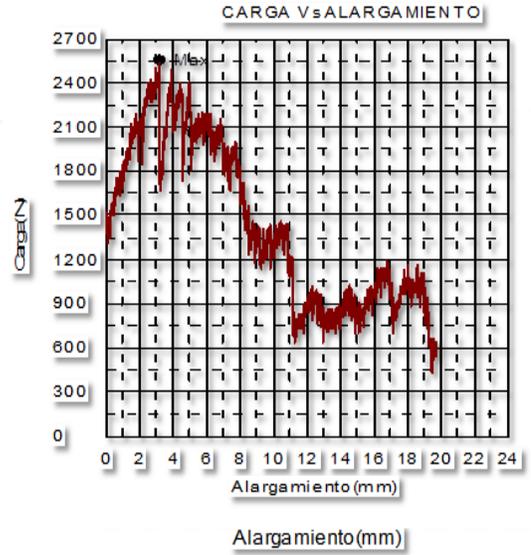
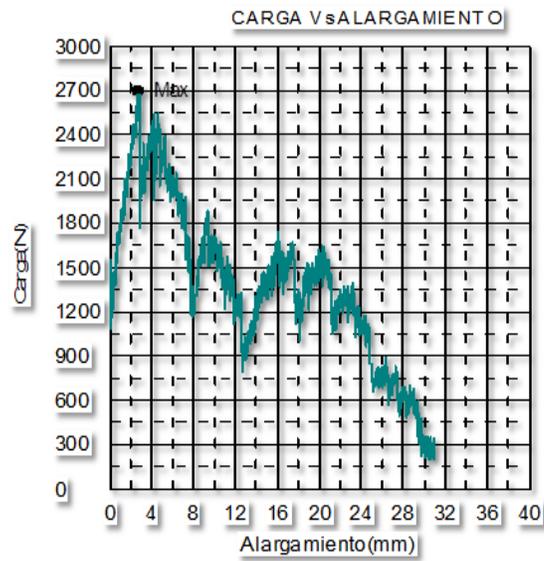
ANEXOS

Anexo A. Ensayo a tracción con malla pajarito 1/2" con diferentes capas.

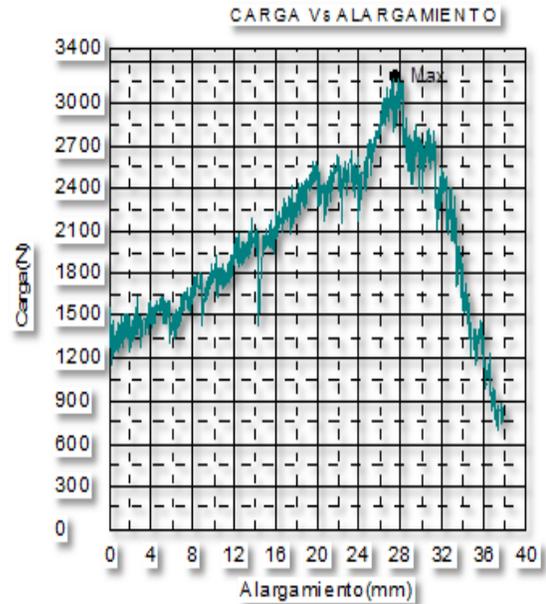
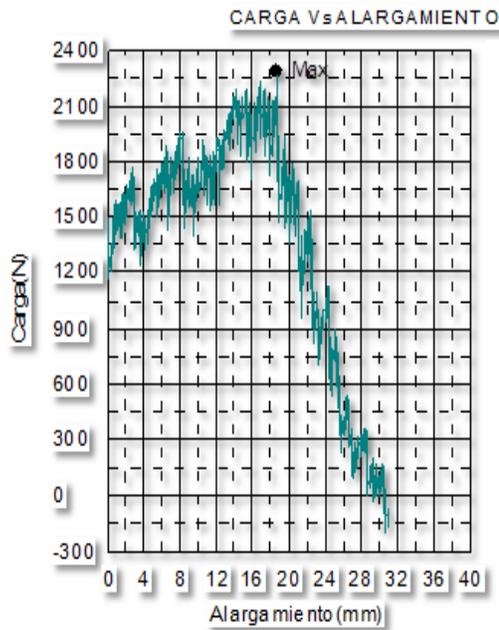
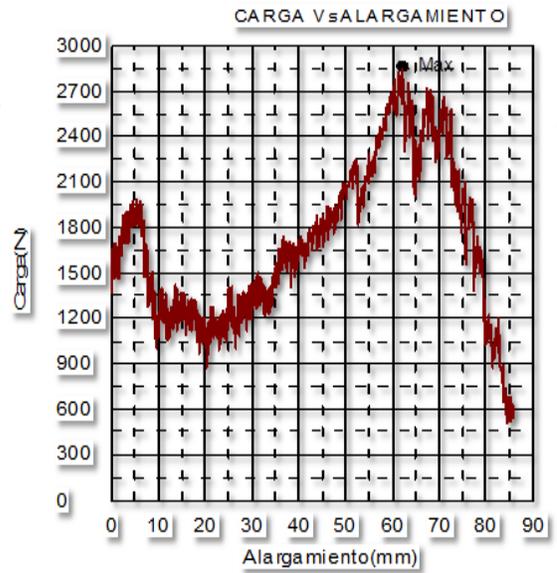
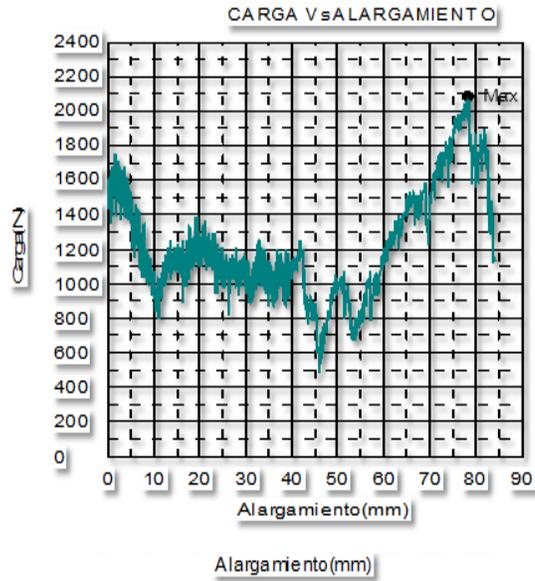
DOS CAPAS



CUATRO CAPAS

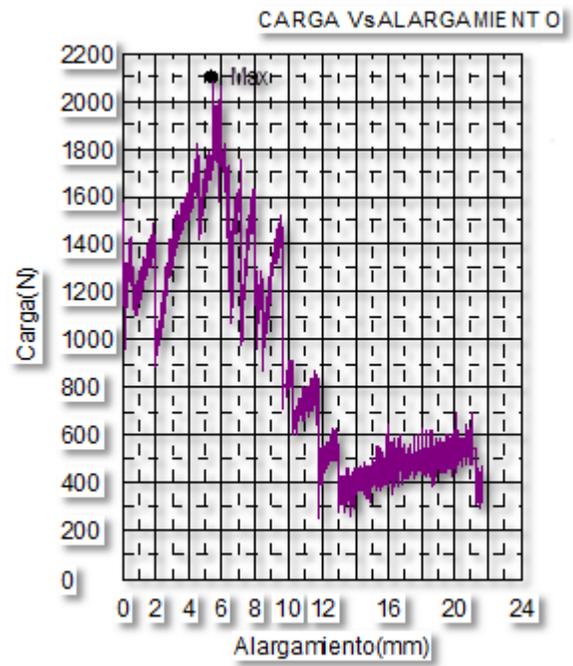
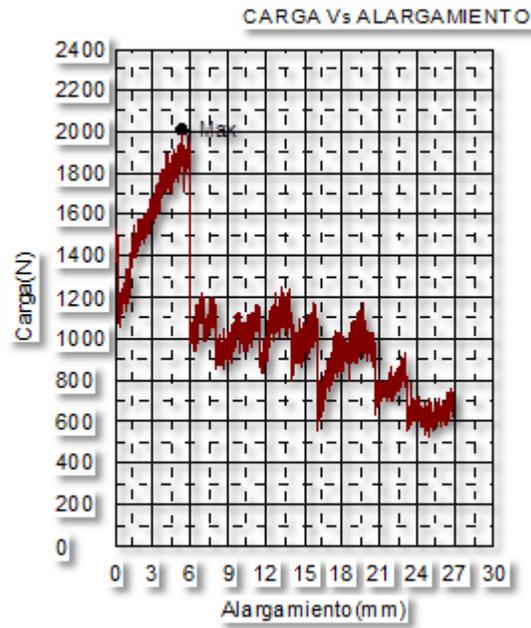


SEIS CAPAS

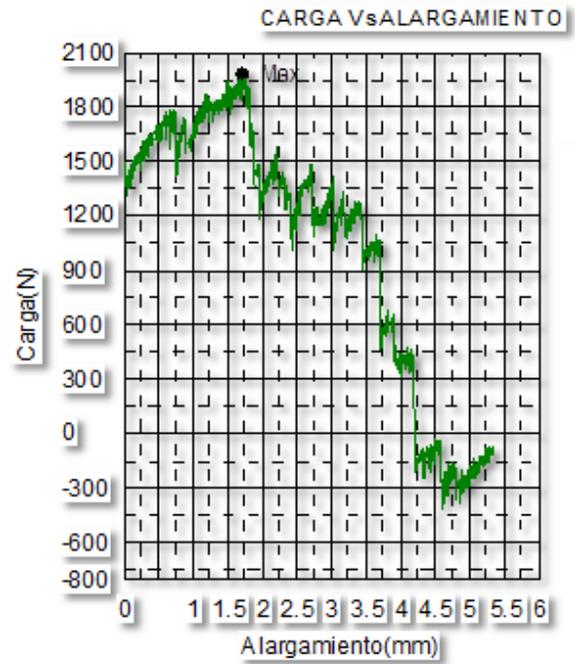
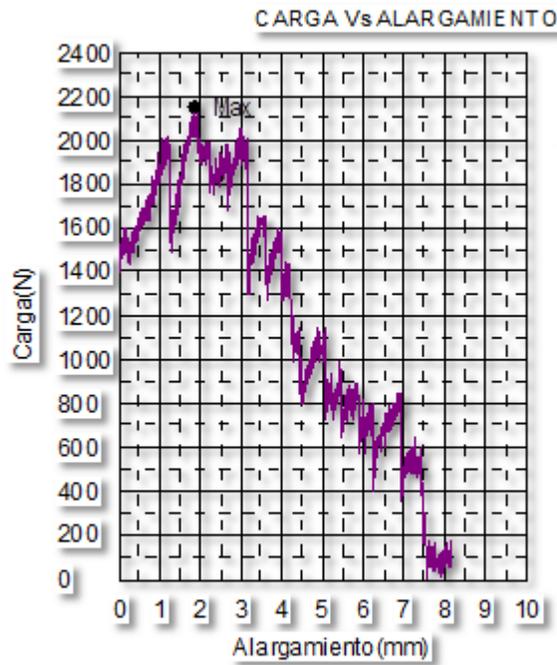
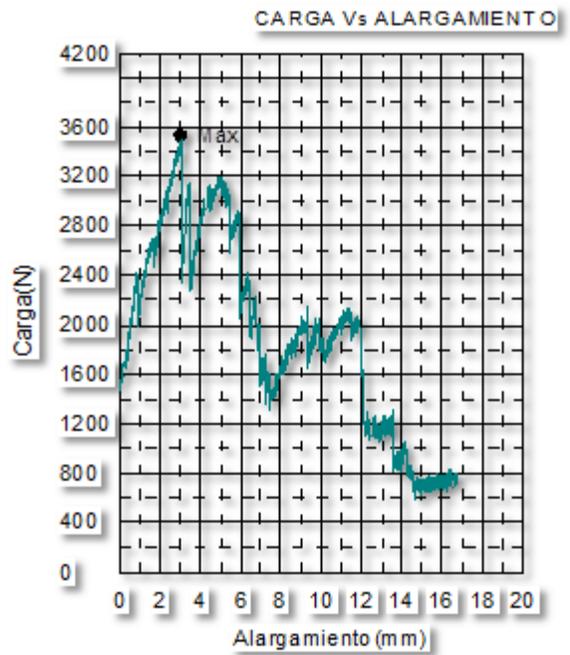
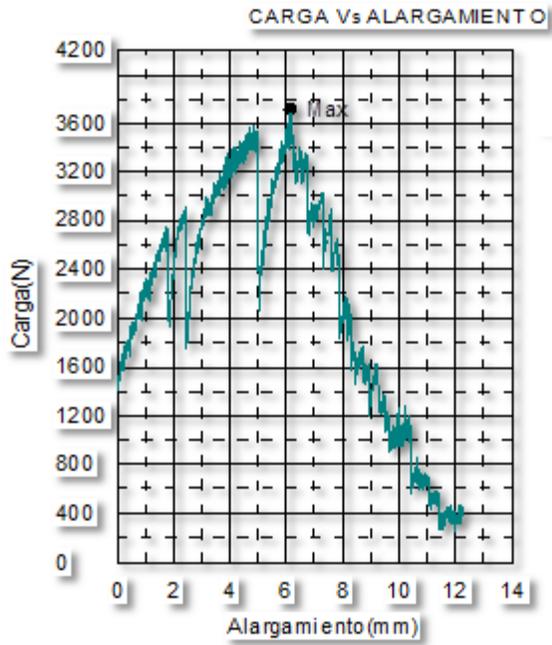


Anexo B. Ensayo a tracción con malla gallinero 3/4" con diferentes capas.

DOS CAPAS



CUATRO CAPAS



SEIS CAPAS

