

Viabilidad técnica y económica para la construcción de forjados de bajo costo en Bucaramanga utilizando viguetas de ferrocemento con sección transversal en “C”

Valentina Santamaría Angarita, Hermes Stiven Buenahora Morales

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

William Gustavo Caballero Moreno

Magister en Ingeniería Estructural y de La Construcción

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Civil

2023

Dedicatoria

A Dios, mi padre del cielo, porque ha sido mi apoyo desde muy pequeña, mi fortaleza y mi ayuda en todo, por hacer su 50% en mi vida y porque sin él no soy nada.

A mis padres, por su lucha incansable por hacerme una mujer integra, por sus consejos y acompañarme en el camino.

A mi hermana menor, porque es todo para mí y quiero ser un ejemplo a seguir en su vida.

A mi familia, por todo el apoyo que me brindaron en este largo camino.

A mi compañero de trabajo y amigo Hermes Buenahora, por su gran esfuerzo y dedicación para la elaboración de este proyecto.

Sin ustedes no habría sido posible.

Valentina Santamaría Angarita

A mi madre, su amor y apoyo incondicional siempre será mi mayor motivación.

Hermes Stiven Buenahora Morales

Agradecimientos

Al MEng. William Caballero por su compromiso y empeño como líder que representaron un apoyo incondicional en el desarrollo de cada una de las etapas de este proyecto.

A nuestro compañero y amigo Javier Monsalve Bermúdez por su colaboración en el desarrollo de la etapa práctica de este proyecto.

A la D.I. Sandra Duran por su colaboración y orientación en la elaboración de este documento.

Al MEng. Luis Tiria por su colaboración y orientación para la elaboración de los análisis de costos del proyecto.

A nuestros compañeros pertenecientes al semillero de investigación Vivienda de Interés Social VIS por su colaboración y ayuda en el desarrollo de la etapa de ensayos de laboratorio.

A todos les agradecemos por brindarnos un poco de su tiempo, conocimiento y ayuda para el desarrollo de este proyecto.

Gracias Totales.

Contenido

Introducción 11

1. Planteamiento del problema..... 13

2. Pregunta problematizadora..... 17

3. Objetivos 17

3.1 Objetivo general..... 17

3.2 Objetivos específicos 18

4. Justificación 18

5. Marco teórico 21

5.1 Ferrocemento: definición, componentes y características mecánicas..... 21

5.1.1 Definición del Ferrocemento 21

5.1.2 Componentes del ferrocemento..... 22

5.1.3 Características mecánicas del ferrocemento..... 29

5.2 Método de Diseño del Ferrocemento..... 32

5.3 Aplicaciones del ferrocemento 33

6. Construcción de las viguetas..... 34

6.1 Encofrado..... 35

6.2 Materiales..... 35

6.2.1 Cemento..... 35

6.2.2 Arena..... 35

6.2.3 Armadura de esqueleto 36

6.2.4 Armadura de difusa..... 36

6.2.5 Aditivos..... 37

6.3 Diseño de la mezcla de mortero..... 38

6.4 Proceso constructivo..... 40

7. Solicitaciones sobre la vigueta..... 43

8. Ensayos de laboratorio..... 45

8.1 Configuración del ensayo a flexión..... 45

8.2 Resultados..... 46

8.2.1 Vigueta 1..... 46

8.2.2 Vigueta 2..... 48

8.2.3 Vigueta 3..... 49

8.3 Análisis de costos..... 55

8.3.1 Costo por m² de Forjado en ferrocemento..... 55

8.3.2 Costo por m² de forjado en losa maciza y aligerada..... 57

9. Conclusiones y recomendaciones..... 58

Referencias..... 60

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Población de asentamientos y barrios precarios en los Municipios del Área Metropolitana de Bucaramanga.</i>	16
Tabla 2. <i>Granulometría requerida para la arena según el ACI 549r.</i>	22
Tabla 3. <i>Ejemplos de proporciones de mezcla de mortero según la cantidad de cemento y la resistencia a compresión.</i>	23
Tabla 4. <i>Tipos y tamaños comunes de mallas de acero usados en ferrocemento.</i>	26
Tabla 5. <i>Valores recomendados para el factor de eficiencia global de la malla de refuerzo</i>	27
Tabla 6. <i>Valores mínimos del límite elástico y el módulo de efectividad</i>	28
Tabla 7. <i>Propiedades mecánicas del ferrocemento reforzado con malla de acero convencional y matrices de mortero cemento.</i>	29
Tabla 8. <i>Tabla de resultados de mezclas de prueba.</i>	38
Tabla 9. <i>Dosificación de mezcla 1:1 Final</i>	39
Tabla 10. <i>Resultados mezcla de mortero dispuesto en viguetas.</i>	40
Tabla 11. <i>Solicitaciones de diseño.</i>	44
Tabla 12. <i>Resultados de ensayos.</i>	53
Tabla 13. <i>Momento resistido para carga aplicada en deflexión de L/240</i>	54
Tabla 14. <i>Momento resistido para carga aplicada en deflexión de L/480</i>	54
Tabla 15. <i>Análisis de precios unitarios de 1m² de forjado en ferrocemento.</i>	56

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Sección típica de Ferrocemento.</i>	21
Figura 2. <i>Estructura interna del refuerzo del elemento de ferrocemento</i>	24
Figura 3. <i>Tipos de mallas de acero.</i>	25
Figura 4. <i>Curva de Esfuerzo-Deformación del ferrocemento</i>	28
Figura 5. <i>Gráfica de resistencia a la compresión de ferrocemento</i>	31
Figura 6. <i>Grafica de Deflexión vs. Carga</i>	32
Figura 7. <i>Diagrama de deformación y esfuerzo para la vigueta de ferrocemento</i>	33
Figura 8. <i>Vigueta Tipo.</i>	34
Figura 9. <i>Grafica de Curva Granulométrica.</i>	35
Figura 10. <i>Malla hexagonal de alambre galvanizado de 1/2 pulg</i>	36
Figura 11. <i>Vigueta construida con mezcla de prueba.</i>	39
Figura 12. <i>Ensayo de cubos de mortero.</i>	40
Figura 13. <i>Armado de refuerzo.</i>	41
Figura 14. <i>Disposición del mortero.</i>	41
Figura 15. <i>Curado de la vigueta</i>	42
Figura 16. <i>Vigueta 1</i>	42
Figura 17. <i>Vigueta 2</i>	42
Figura 18. <i>Vigueta 3</i>	43
Figura 19. <i>Vigueta 4</i>	43
Figura 20. <i>Diagrama metodología de ensayo a flexión en vigas</i>	45
Figura 21. <i>Ensayo de calibración del marco de carga</i>	46
Figura 22. <i>Ensayo a flexión Vigueta 1</i>	46
Figura 23. <i>Gráfica Fuerza vs Tiempo Vigueta 1</i>	47

Figura 24. <i>Gráfica Fuerza vs Deformación Vigueta 1</i>	47
Figura 25. <i>Ensayo a flexión vigueta 2</i>	48
Figura 26. <i>Gráfica Fuerza vs Tiempo Vigueta 2</i>	48
Figura 27. <i>Gráfica de Fuerza vs Deformación Vigueta 2</i>	49
Figura 28. <i>Ensayo a flexión de la vigueta 3</i>	50
Figura 29. <i>Gráfica Fuerza vs Tiempo Vigueta 3</i>	50
Figura 30. <i>Gráfica Fuerza vs Deformación Vigueta 3</i>	51
Figura 31. <i>Gráfica comparación de Fuerza vs Tiempo</i>	51
Figura 32. <i>Gráfica comparación de Deformación vs Fuerza</i>	52
Figura 33. <i>Diagrama de momento presente en viguetas.</i>	53
Figura 34. <i>Análisis de resultados de momentos flectores</i>	55
Figura 35. <i>Comparación de costos por m² entre losa de ferrocemento, maciza y aligerada</i>	57

Resumen

Actualmente la pobreza y la migración sin control han desencadenado grandes dificultades para que muchas familias puedan acceder a una vivienda digna, esto hace que se vean obligados a construir su propia vivienda dentro de invasiones, con materiales inadecuados y sin seguir los procesos constructivos necesarios para garantizar la seguridad estructural en una edificación, generando lo que se conoce hoy en día como asentamientos informales. Cifras como las de la CEPAL indican que en Latinoamérica “1 de cada 5 habitantes reside en asentamientos informales” [1], así mismo aun cuando en Colombia se establece el acceso a la vivienda como un derecho fundamental, para el año 2011 el 31.9% de la población de Bucaramanga vivía en asentamientos informales. Gracias a esta problemática surge la idea de investigación para este proyecto, en donde por medio de la caracterización mecánica de viguetas de ferrocemento con sección transversal en C se verifique si es viable técnica y económicamente su construcción mediante el uso de materiales conseguidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga. Para esto se construyeron tres viguetas en ferrocemento según lo que establece la ACI 549r y después se caracterizaron por medio de ensayos a flexión en donde se determinó la carga máxima que soportan junto con sus deformaciones correspondientes. Además, se realizó un análisis de costos para la construcción de un forjado de ferrocemento y se comparó con unos APUs elaborados para forjados tradicionales. Finalmente, se determinó que, si son viables técnica y económicamente las viguetas elaboradas ya que superaron la carga de diseño manteniendo deformaciones admisibles, mientras que en la comparación de costos se pudo establecer que las losas construidas en ferrocemento son más económicas que las losas construidas tradicionalmente.

Palabras Clave: Ferrocemento, Forjado, Losa, Vigueta, Autoconstrucción, Vivienda, Bajo Costo.

Abstract

Currently poverty and uncontrolled migration have triggered great difficulties for many families to access decent housing, this makes them feel forced to build their own home within invasions, with inadequate materials and without following the necessary construction processes to guarantee structural safety in a building, generating what is known today as informal settlements. Figures such as those of ECLAC indicate that in Latin America "1 out of every 5 inhabitants resides in informal settlements" [1], even though in Colombia access to housing is established as a fundamental right, for the year 2011 31.9% of the population of Bucaramanga lived in informal settlements. Thanks to this problem, the research idea for this project arises, where by means of the mechanical characterization of ferrocement beams with a cross section in C, it is verified if its construction is technically and economically viable through the use of materials obtained in the Metropolitan Area. Bucaramanga. For this, three ferrocement joists were built according to the provisions of ACI 549r and later they were characterized by means of bending tests where the maximum load they support was determined along with their corresponding deformations. In addition, a cost analysis was carried out for the construction of a ferrocement slab and it was compared with some APUs made for traditional slabs. Finally, it was determined that the elaborated joists are technically and economically viable since they exceeded the design load while maintaining admissible deformations, while in the cost comparison it was possible to establish that the slabs built in ferrocement are cheaper than the slabs built traditionally.

Keywords: Ferrocement, Slab, Slab, Joist, Self-construction, Housing, Low Cost.

Introducción

Los asentamientos humanos informales o precarios “son una forma común, y frecuentemente preponderante, de emprendimientos residenciales urbanos en la mayoría de los países latinoamericanos”[2] desencadenados por factores como la pobreza, la migración y la dificultad para acceder a una vivienda digna. Este es un problema muy común actualmente alrededor del mundo, se estima que aproximadamente un tercio de la población mundial vive en asentamientos informales[1], mientras que en Colombia, para el año 2020 el Departamento Nacional de Planeación y el DANE determinaron que el 8.8% de hogares colombianos “habitan en viviendas particulares que presentan carencias habitacionales en los atributos referentes a la estructura, espacio y a la disponibilidad de servicios públicos domiciliarios y, por tanto, requieren mejoramiento o ampliación de la unidad habitacional en la cual viven”[3]. Cabe resaltar que con el paso de los años este problema ha ido aumentando debido al desplazamiento forzado de personas que viven en el campo y la llegada de migrantes.

Bucaramanga no es ajena a esta problemática, pues el 79% de los hogares presentan déficit de vivienda cuantitativo en la ciudad [4], lo cual genera problemas de orden social, urbanístico, económico, de salud y de seguridad, pues estas viviendas, desde el punto de vista de la ingeniería civil, no cuentan con los requisitos necesarios para garantizar la seguridad estructural requerida en una edificación.

Sin embargo, aun con todos los problemas que trae esta situación el gobierno aún no plantea una solución que permita ser eficiente y reducir estas cifras tan preocupantes. Es por esta razón que se plantea el ferrocemento como una alternativa a la construcción tradicional, este se caracteriza por permitir la elaboración de prefabricados de bajo costo, livianos y que pueden ser elaborados por mano de obra no calificada consiguiendo la disminución del costo final de la

vivienda, esto se llevará a cabo por medio de la caracterización mecánica y económica de viguetas elaboradas en ferrocemento para determinar si son viables en la construcción de forjados para viviendas de bajo costo.

Primero se realizará una revisión bibliográfica en la que se recolectara la información necesaria sobre el ferrocemento para entender su funcionamiento, proceso constructivo y materiales que lo componen. A partir de esto se construirán cuatro viguetas que servirán de probetas para ser ensayadas a flexión en un marco de carga y así determinar las cargas últimas que soportan junto con sus deformaciones máximas. Finalmente, se elaborará un análisis de pecios unitarios para un forjado de ferrocemento de 1m^2 y se realizará la comparación con los APUs de dos losas de 1m^2 elaboradas con el sistema tradicional, aligerada y maciza.

1. Planteamiento del problema

La declaración universal de los derechos humanos de 1948 reconoce la vivienda como un derecho fundamental de todo ser humano, sin embargo, gran parte de la población mundial no logra hacer efectivo este derecho debido a los elevados índices de pobreza y al alto precio del alquiler y venta de la vivienda en algunos países. La pobreza parece ir siempre en aumento, potenciada por las desigualdades en los tratados de la globalización económica, el aumento del desempleo, la inflación y las restricciones comerciales impuestas entre países por temas políticos.

Por otro lado, el precio de una vivienda y el de su alquiler también se ve afectado por la especulación inmobiliaria. En este proceso especulativo, el suelo y la vivienda constituyen objetos mercantiles cuyo valor responde a un lucro económico de los inversionistas, fijando de esta manera, precios de mercado al que no puede acceder gran parte de la población.

Según el alto comisionado de naciones unidas para los derechos humanos, “Los mercados de la vivienda e inmobiliarios de todo el mundo se han visto transformados por los mercados mundiales de capitales y los excesos financieros. Este es el fenómeno denominado “financiarización de la vivienda”, que se produce cuando la vivienda es tratada como una mercancía y una fuente de riqueza e inversión, en lugar de como un bien social”. [5]

En consecuencia “El 97% de las viviendas en los países desarrollados o en vías de desarrollo no son accesibles financieramente para quienes se destinaron inicialmente, es decir, la vivienda ya no es un factor de cambio sostenible que promueve la igualdad.” [6] y por tanto “En 2010, alrededor de 980 millones de hogares urbanos carecían de una vivienda decente, así como lo harán otros 600 millones entre 2010 y 2030” [6].

Además de los aspectos mencionados anteriormente, cada país o ciudad cuenta con otras variables locales que inciden en la tenencia de una vivienda digna, una de ellas es la migración de

la población del campo a la ciudad, bien sea por temas de conflictos armados, o en búsqueda de mejores posibilidades laborales.

Este difícil escenario para acceder a una vivienda ha obligado a la población más pobre a construir su propia vivienda en lugares periféricos a las ciudades dejando de lado el ordenamiento territorial de la ciudad. La construcción de estas viviendas a lo largo de décadas ha generado grandes asentamientos humanos en todo el mundo, emplazados en sitios de difíciles condiciones humanas conocidos como asentamientos ilegales o barrios precarios, también llamados “slum” en inglés.

Los asentamientos humanos informales o precarios “son una forma común, y frecuentemente preponderante, de emprendimientos residenciales urbanos en la mayoría de los países latinoamericanos” [2].

Autores como Barcena también plantean que debido a esta desigualdad aproximadamente un tercio de la población mundial vive en asentamientos informales y este porcentaje en lugar de reducirse sigue aumentando con el paso del tiempo, convirtiendo la vivienda en un factor que representa desigualdad en términos sociales y económicos. [1]

A nivel latinoamericano, la construcción de barrios precarios no es nueva, pues desde hace casi 60 años se viene presentando y ha aumentado a causa de desplazamientos forzados y migración sin control, unido a la necesidad de establecerse en un lugar y la falta de adquisición monetaria por parte de la población.

Según la CEPAL, en Latinoamérica “1 de cada 5 habitantes reside en asentamientos informales, una cifra que, según proyecciones, crecerá en los próximos años ante las mayores dificultades de acceso a la vivienda formal, aumentando el ya histórico déficit de vivienda que aqueja a la región.” [1]

En Colombia, se establece el acceso a la vivienda digna como un derecho fundamental: “El Estado fijará las condiciones necesarias para hacer efectivo este derecho y promoverá planes de vivienda de interés social, sistemas adecuados de financiación a largo plazo y formas asociativas de ejecución de estos programas de vivienda” [7]. Sin embargo, los altos niveles en Colombia impiden que gran parte de su población pueda gozar de este derecho. Aproximadamente 5.1 millones de familias se ven afectadas por este déficit de vivienda o habitacional, representando un 31.4% de los 16.25 millones de hogares evaluados en la Encuesta Nacional de Calidad de Vida de 2020. [8]

“El Gobierno Nacional de Colombia ha planteado nuevas estrategias para dar solución de vivienda a este sector de la población, sin embargo, el déficit habitacional continúa creciendo, pues siguen creándose nuevos asentamientos y los pobladores de los ya existentes aumentan.” [4]

Para el año 2020, según el Departamento Nacional de Planeación en conjunto con el DANE el 8.8% de hogares colombianos “habitan en viviendas particulares que presentan carencias habitacionales en los atributos referentes a la estructura, espacio y a la disponibilidad de servicios públicos domiciliarios y, por tanto, requieren mejoramiento o ampliación de la unidad habitacional en la cual viven” [8] y a esto se le suman un 4.2% de “hogares que requieren de una vivienda urbana para que exista una relación uno a uno entre las viviendas adecuadas y los hogares que necesitan alojamiento.” [8] todo esto se ve reflejado en los indicadores del Objetivo de Desarrollo Sostenible 11 Ciudades y comunidades sostenibles.

La situación en el área metropolitana de Bucaramanga no es distinta a la del país y el mundo. Según estudios realizados por el Instituto de Estudios urbanos (IEU), “Bucaramanga tiene un déficit de 36 mil viviendas en todos los estratos. Solamente en el estrato 1 y 2 el déficit alcanza las 13 mil viviendas.” [9]

Para el año 2011 la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga realizó un estudio donde determinó la población que habita asentamientos y barrios precarios para toda el área metropolitana de Bucaramanga obteniendo un total de 269.343 personas aproximadamente, también se identificaron 341 asentamientos y barrios informales en total dentro del AMB, a continuación, se muestra la tabla con los resultados. [4]

Tabla 1. *Población de asentamientos y barrios precarios en los Municipios del Área Metropolitana de Bucaramanga.*

Municipio	Población en asentamientos y barrios precarios	Población municipio	%	N° de asentamientos precarios	N° de barrios precarios	Total
Bucaramanga	166.890	523.04	31.9	154	32	186
Girón	46.34	152.608	30.36	66	10	76
Floridablanca	40.813	260.042	15069	45	8	53
Piedecuesta	15.3	129.532	11.81	17	9	26
Total	269.343	1.065.222	25.28	282	59	341

Adaptada de Forjados de bajo costo: análisis de la situación del Área Metropolitana de Bucaramanga. (2014)

Se estima que el 79% de los hogares que presentan déficit de vivienda cuantitativo en la ciudad de Bucaramanga se da en familias que están por debajo de la línea de la pobreza, es decir, que tienen ingresos menores a 2 SMMLV (Salarios Mínimos Mensuales Legales Vigentes). [4]

“La construcción en Colombia no ha tenido fuertes evoluciones tecnológicas tendientes a industrializar la vivienda social y hacerla accesible y masiva. Esto responde a los bajos índices de mano de obra calificada, a dinámicas políticas e históricas y a la ausencia de incentivos por parte del Estado en la aplicación de materiales alternativos a los que el sistema constructivo tradicional propone” [4]

En la actualidad existen diversos tipos de forjados de bajo costo en el mundo que podrían servir de alternativa para generar una solución a la problemática que se vive con los asentamientos informales en Bucaramanga, [4] recopiló una gran cantidad de sistemas estructurales que pueden utilizarse para construir forjados o losas de bajo costo, los cuales favorecen el proceso de autoconstrucción y reducen el precio final de la vivienda.

Las opciones estructurales hechas de ferrocemento han demostrado ser una gran alternativa constructiva debido a su ligereza, mano de obra no calificada y prefabricación. Por esta razón, la propuesta de investigación aquí presentada busca determinar el comportamiento de un elemento utilizado para construir forjados o losas en países en vías de desarrollo, con el fin de emplearlo en los programas de construcción de viviendas de bajo costo del gobierno, en donde el costo se reduce debido a factores como la mano de obra empleada por las mismas familias, las cuales a partir de una capacitación pueden aportar y construir sus viviendas. Para esto se realizará la caracterización mecánica de viguetas de ferrocemento de sección en C de manera que se verifique si es viable su construcción mediante el uso de materiales conseguidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga.

2. Pregunta problematizadora

¿Qué tan eficiente es el uso de prefabricados de ferrocemento contruidos mediante métodos de autoconstrucción y con materiales disponibles en el Área Metropolitana de Bucaramanga para el desarrollo de viviendas de interés social?

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Caracterizar mecánica y económicamente viguetas hechas de ferrocemento con secciones transversales en forma de C que puedan ser implementadas en la construcción de forjados para viviendas de bajo costo de Bucaramanga y su Área Metropolitana.

3.2 Objetivos específicos

Identificar los principales métodos de diseño, construcción y ensayo de viguetas de ferrocemento utilizados a nivel mundial.

Analizar el comportamiento del elemento de ferrocemento a partir de los ensayos en el laboratorio.

Comparar el costo por metro cuadrado de losa hecha a partir de las viguetas de ferrocemento, con respecto a losas fabricadas con sistemas de construcción tradicionales.

4. Justificación

La necesidad de una vivienda y los altos niveles de pobreza mantenidos durante décadas han generado la aparición de asentamientos humanos informales en las periferias de las ciudades colombianas. En Colombia, este problema se ha visto intensificado por el desplazamiento forzado de la población rural a las ciudades y por la llegada de migrantes en busca de mejores oportunidades de vida.

Las características precarias de estos asentamientos humanos son bien conocidas, se encuentran emplazados en terrenos de compleja topografía en condiciones de alto riesgo por inundaciones o deslizamientos de tierra, no cuentan con la prestación de servicios públicos, ni vías de acceso, carecen también de sistema de transporte y de cualquier tipo de desarrollo urbanístico, así mismo, sus viviendas carecen de seguridad estructural.

Durante décadas, este problema ha sido estudiado y cada gobierno ha generado programas de vivienda encaminados a reducir su déficit. La medición hecha por el DANE para el año 2021, registra un déficit de vivienda cuantitativo y cualitativo de 7,5% y 23,5%, respectivamente [3].

Con el paso de los años, los residentes del asentamiento modifican su vivienda aumentando su área y número de plantas, también cambian sus materiales iniciales (plástico, lonas, madera y zinc) por otros más duraderos como el ladrillo y el hormigón, además, construyen vías de acceso y sistemas de almacenamiento de agua potable. Todos estos cambios consolidan el asentamiento y permiten que sus habitantes soliciten ante las autoridades municipales su reconocimiento como un barrio legal. Este procedimiento de legalización se realiza según lo establecido en la ley 2044 de 2020.

Los gobiernos municipales también adelantan procesos de reubicación de los asentamientos localizados en zonas de alto riesgo y emprenden acciones de mejoramiento de los barrios con el ánimo de reducir el déficit cualitativo de vivienda.

El déficit de vivienda genera problemas en las ciudades de orden social, urbanístico, económico, de salud y de seguridad, entre otros. Desde el punto de vista de la ingeniería civil, preocupa la seguridad estructural de las edificaciones construidas sin tener en cuenta los requisitos mínimos de seguridad estructural, situación que las hace muy vulnerables ante los efectos de un sismo.

A pesar de la magnitud del problema, el país no cuenta con instituciones técnicas destinadas a desarrollar o transferir elementos o sistemas constructivos que puedan ser utilizados por los gobiernos locales en los procesos de reubicación de los asentamientos y en el mejoramiento de los barrios. Desde el punto de vista técnico, estos sistemas estructurales deberían desarrollarse teniendo en cuenta las condiciones sociales y económicas del problema, capacitando a la población para aprovechar su mano de obra de manera eficiente y segura.

A nivel mundial se encuentran diferentes sistemas estructurales para la construcción de forjados o losas de bajo costo que han sido estudiados e implementados como lo indica [4] en su trabajo, mostrando que existen alternativas de prefabricados de ferrocemento que podrían ser utilizadas en Bucaramanga, sin embargo, las condiciones particulares del entorno requieren que la implementación de estas alternativas esté respaldada por ensayos de laboratorio que demuestren su respectiva seguridad estructural.

Teniendo en cuenta la falta de desarrollo de elementos estructurales de bajo costo que faciliten la reducción del déficit de vivienda en Bucaramanga y su área metropolitana, esta investigación plantea estudiar mecánicamente viguetas hechas de ferrocemento con sección transversal en forma de “C” estableciendo su viabilidad técnica y económica en el contexto regional.

El conocimiento adquirido con este proyecto permitirá determinar información esencial con respecto al análisis, diseño y construcción de este tipo de forjado en Bucaramanga, permitiendo su desarrollo de forma fácil, segura y económica a través de la autoconstrucción, posibilitando su aplicación en proyectos de vivienda de interés social realizados por el gobierno local.

También se desea realizar un aporte técnico y social dirigido a la generación de alternativas constructivas de calidad para la población vulnerable de los asentamientos informales, contribuyendo directamente al desarrollo de la agenda 2030 con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 11 “Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles” teniendo como principal meta asegurar el acceso de todas las personas a vivienda y servicios básicos adecuados, seguros, asequibles y mejorar los barrios marginales.

5. Marco teórico

5.1 Ferrocemento: definición, componentes y características mecánicas

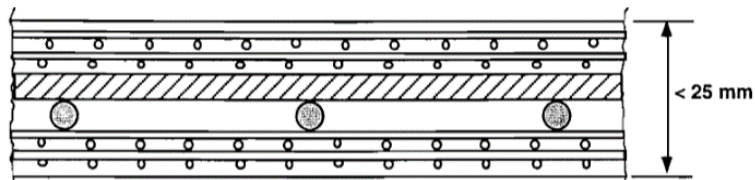
5.1.1 Definición del Ferrocemento

El ferrocemento se considera la primera invención de hormigón reforzado en el mundo. Consiste en un compuesto delgado hecho con una matriz de mortero a base de cemento, reforzado con una o varias mallas de alambres de pequeño diámetro [10]. Según el ACI 549R (1980), el ferrocemento es una pared delgada de concreto reforzado construido de cemento hidráulico reforzado con una malla de alambre muy espaciada de diámetros pequeños y eventualmente barras de acero de armazón.[11]

Este material se utiliza para construir elementos estructurales con paredes de pequeño espesor (20-30mm). Sus principales aplicaciones a lo largo de la historia están relacionadas con la construcción de botes y elementos estructurales para forjados o losas de viviendas de bajo costo. Una de las principales ventajas de los elementos estructurales construidos con ferrocemento radica en su bajo peso comparado con el hormigón armado y la facilidad de su prefabricación utilizando mano de obra no calificada.

La figura 1 muestra una sección transversal típica de ferrocemento, se observan diferentes mallas de acero embebidas en una capa de mortero de 25 mm de espesor.

Figura 1. Sección típica de Ferrocemento.



Tomado de Ferrocement and laminated composites (Naaman, 2000)

5.1.2 Componentes del ferrocemento

5.1.2.1 Cemento. La guía ACI 549.1R-93 recomienda que las características físicas y químicas del cemento cumplan con la norma ASTM C150, o la ASTM C595 o su equivalente.[11]

5.1.2.2 Arena. La arena es uno de los principales constituyentes del ferrocemento, su granulometría influye de manera decisiva en la trabajabilidad del mortero. La tabla 2 muestra la granulometría recomendada por la guía ACI 549.1 R-93 para obtener una mezcla mortero con buena manejabilidad y lograr su adecuada disposición dentro de la malla de acero.[11]

Tabla 2. *Granulometría requerida para la arena según el ACI 549r*

Sieve size, U.S. standard square mesh	Percent passing by weight
No. 8 (2.36 mm)	80-100
No. 16 (1.18 mm)	50-85
No. 30 (0.60 mm)	25-60
No. 50 (0.30 mm)	10-30
No. 100 (0.15 mm)	2-10

Tomado del ACI 549 1 R-93

5.1.2.3 Agua. Según Gamboa & Navarro el agua para la construcción de elementos de ferrocemento debe ser limpia y fresca con un ph mayor o igual a 7 para minimizar el ph de la pasta del mortero.[12]

5.1.2.4 Mortero. El mortero constituye la matriz aglomerante del ferrocemento, está hecho de la mezcla de cemento portland, agregados finos y agua. La manejabilidad y el tiempo de fraguado son dos propiedades fundamentales de la mezcla, por ello, en algunas ocasiones se agregan aditivos al mortero para modificar dichas propiedades.

La guía ACI 549.1R-93 recomienda utilizar una dosificación en peso arena-cemento de 1.5 a 2.5 y una relación en peso agua-cemento entre 0.3 y 0.5[11]. Cuanto mayor sea el contenido de

arena, mayor será el contenido de agua necesario en la mezcla para mantener la misma trabajabilidad. En cuanto a la resistencia a compresión a los 28 días, la guía recomienda una resistencia mínima de 35 Mpa.

Naaman estableció unos valores para las proporciones correspondientes a la mezcla de mortero dependiendo de la cantidad de cemento y de la resistencia a compresión que se desea alcanzar. La tabla 3 muestra estos valores.

Tabla 3. *Ejemplos de proporciones de mezcla de mortero según la cantidad de cemento y la resistencia a compresión*

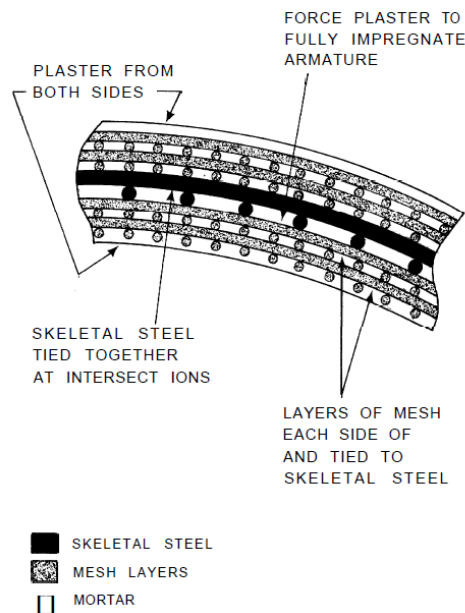
Cement	Sand	Water	Fly Ash	Microsilica	HRWRA or SP	Comp. Strength Mpa
1	3	0.5			yes	49
1	3	0.4			yes	47
1	2.5	0.6			no	39
1	2	0.55			no	52
1	2	0.5			yes	54
1	2	0.5			no	58
1	2	0.5			no	45
1	2	0.5	0.15		yes	52
1	2	0.4			yes	58
1	2	0.4			yes	50
1	2	0.4			yes	49
1	2	0.4		0.10	yes	55
1	2	0.4	0.30		yes	50
1	1.5	0.4			yes	60
1	1.5	0.4			yes	54
1	1.5	0.45	0.2		yes	41
1	1	0.4			no	43
1	1	0.35	0.2		yes	61
1	1	0.45			no	42
1	1	0.45			no	49
1	1	0.5			no	62
1	0.8	0.5	0.2		no	57
1	1	0.36			yes	71
1	0.6	0.47			yes	56
1	0.6	0.3		0.15	yes	88
1	0.5	0.25	0.2		yes	70
1	0.2	0.3	0.2		yes	77
1	0.2	0.24	0.2		yes	100

Nota: La sigla HRWRA or SP hace referencia a la cantidad de agentes reductores de agua de alto rango o superplastificantes necesaria en la mezcla para que se alcance la fuerza a compresión establecida en la tabla, las cuales fueron determinadas por medio de ensayos de

laboratorio con los respectivos cilindros. Tomado de Ferrocement and laminated composites (Naaman, 2000)

5.1.2.5 Refuerzo. Al igual que en el hormigón armado, el refuerzo utilizado para el ferrocemento consiste en mallas y barras de acero, sin embargo, debido al pequeño espesor de los elementos de ferrocemento, el diámetro de las barras no suele ser superior a 10 mm. Las barras de acero se utilizan para dar la forma deseada al elemento estructural (esqueleto), además ofrecen la rigidez necesaria para la construcción del elemento, sobre dichas barras se disponen las mallas (figura 2). El aporte a la resistencia a la flexión de las barras de acero suele no tenerse en cuenta si éstas se ubican en el eje neutro de la sección transversal.

Figura 2. Estructura interna del refuerzo del elemento de ferrocemento

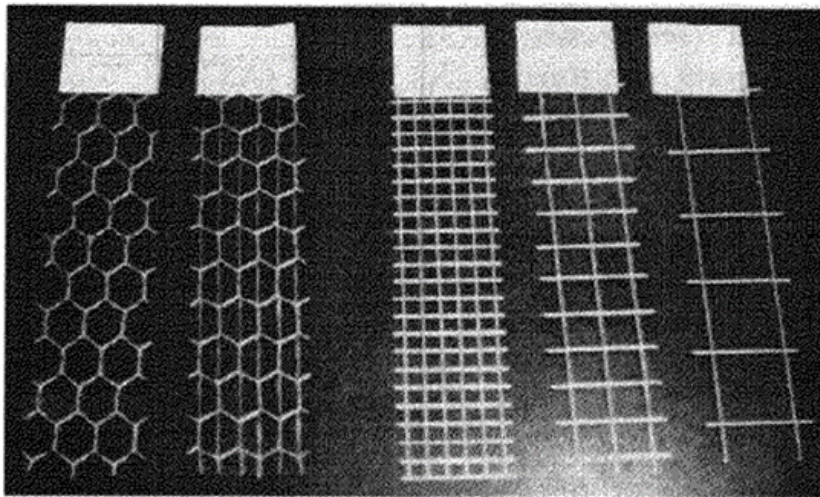


Tomado de Ferrocement and laminated composites (Naaman, 2000)

Las mallas de refuerzo están hechas de alambres tejidos, trenzados o soldados, y deben ser bastante flexibles para adaptarse a la forma del elemento estructural. Las mallas que generalmente se utilizan como refuerzo son: (a) *Malla hexagonal*, es de fácil manejo y se forma por el trenzado

de alambres galvanizados estirados en frío; (b) *Malla entrelazada cuadrada*, es una malla tejida en la que los alambres están simplemente entrelazados formando una malla cuadrada o rectangular; (c) *Malla Electrosoldada*, está formada por alambres rectilíneos de acero dispuestos en forma de cuadrados o rectángulos; y finalmente, (d) *Malla de metal expandido*, se forma cortando una hoja delgada de metal desplegado para hacer aberturas en forma de diamante. (Campoverde, 2010)

Figura 3. Tipos de mallas de acero.



Tomado de Ferrocement: A Modern Technology with its Application in Water Resource Department (WRD) (Khandelwal; Deshmukh, 2016)

La armadura difusa (mallas) es la encargada de captar la retracción del mortero, ayuda a que las fisuras demoren en aparecer, posee diámetros pequeños y es de fácil manipulación para que se pueda colocar cubriendo todo el cuerpo de la armadura [13].

En la tabla 4 [10] muestra los tipos de mallas que se utilizan comúnmente para construir elementos en ferrocemento teniendo en cuenta su forma, calibre, espaciamiento y diámetro.

Tabla 4. *Tipos y tamaños comunes de mallas de acero usados en ferrocemento*

Type	Shape	Form	Designation, gage o gauge*	Wire spacing		Wire diameter or sheet thickness	
				in	mm	in	mm
Wire Mesh	Square	Woven or Welded	3/4 x 1/4 No. 16	0.75	19.0	0.0630	1.60
			2 x 2 No. 19	0.50	13.0	0.0410	1.00
		Welded	3 x 3 No. 22	0.33	8.5	0.0286	0.72
			4 x 4 No. 23	0.25	6.4	0.0250	0.64
		Welded	1 x 1 No. 14	1.00	25.0	0.0800	2.00
Wire Mesh	Rectangular	Welded	2 x 1 No. 14	2 x 1	50 x 25	0.0800	2.00
Wire Mesh	Hexagonal	Twisted	1 No. 18	1.00	25.0	0.0475	1.20
			1 No. 20	1.00	25.0	0.0348	0.88
			1/2 No. 22	1/2	13.0	0.0286	0.72
Expanded Metal Mesh	Diamond	Slit and drawn	3.4 lb/yd			0.0230	0.58
			Gage No. 18			0.0400	1.00
			Gage No. 20			0.0300	0.76

Tomado de Ferrocement and laminated composites (Naaman, 2000)

Según [10] existen tres propiedades importantes que sirven para predecir la respuesta del ferrocemento ensayado en tensión y flexión de la malla de refuerzo las cuales son la resistencia a la fluencia, el módulo de elasticidad y el factor de eficiencia de la malla.

Por otro lado, [10] define el módulo de elasticidad como una medida del cambio en el esfuerzo debido al cambio en la deformación entre dos puntos, gracias a la respuesta de tensión-deformación por el esfuerzo a tracción de un material y se encuentra expresado en la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Donde $\Delta\sigma$ representa el cambio en el esfuerzo y $\Delta\varepsilon$ el cambio en la deformación.

Naaman [10] también menciona que en términos generales se puede conseguir hallar el valor del módulo de elasticidad seleccionando dos puntos en la curva de esfuerzo-deformación. Finalmente, [10] determina el factor de eficiencia de la malla, η_0 , como un parámetro esencial para el diseño de los miembros del elemento de ferrocemento a tensión y a flexión ya que sirve para calcular el área de refuerzo, el cual depende de la dirección en la que la se consideró que trabajaría la carga. En la tabla 5 se presentan los valores recomendados según [10] para el factor de eficiencia dependiendo del tipo de malla y la dirección en que trabaje.

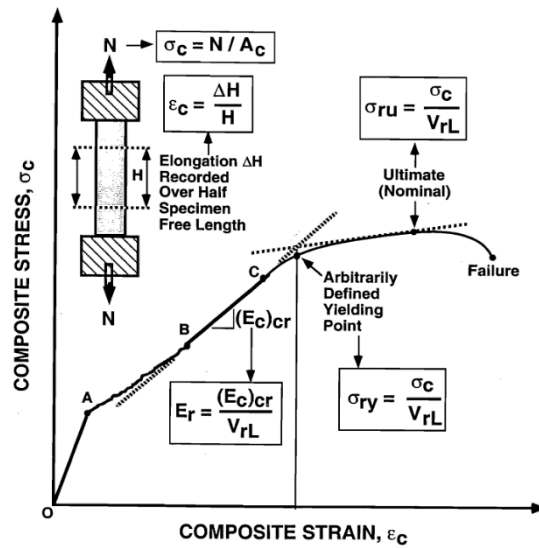
Tabla 5. Valores recomendados para el factor de eficiencia global de la malla de refuerzo

		Woven Square Wire Mesh	Welded Square Wire Mesh	Hexagonal Wire Mesh	Expanded Metal Lath	Logitudinal Bars
Global Efficiency Factor η_0	Longitudinal direction η_L	0.50	0.50	0.45	0.65	1
	Transverse direction η_T	0.50	0.50	0.30	0.20	0
	At $\theta = 45^\circ$ η_θ	0.35	0.35	0.30	0.30	0.70

Tomado de Ferrocement and laminated composites (Naaman, 2000)

La malla tiene una influencia importante en la resistencia a tracción y es por esto que para valorarla se deben elaborar especímenes y ensayarlos a tracción, según lo que se establece en el ensayo del ACI 549r. Por medio de este ensayo se obtiene la gráfica de esfuerzo-deformación con la cual se pueden calcular los valores de las propiedades mencionadas anteriormente como se muestra en la figura 4.

Figura 4. Curva de Esfuerzo-Deformación del ferrocemento.



Nota: En la gráfica 1 σ_{ru} representa la resistencia última, σ_{ry} es la resistencia a la fluencia y el módulo de elasticidad es E_r . Tomado de Ferrocement and laminated composites (Naaman, 2000)

A continuación, [10] recomienda unos valores mínimos para el límite elástico, el módulo efectivo de las mallas y las barras de acero, los cuales se pueden encontrar en la tabla 6 y son los que se hayan por medio de los ensayos tracción del refuerzo.

Tabla 6. Valores mínimos del límite elástico y el módulo de efectividad

		Woven square mesh	Welded square mesh	Hexagonal mesh	Expanded metal lath	Longitudinal bars
Yield Strength σ_{ry}	Mpa	450	450	310	310	414
	(ksi)	(65)	(65)	(45)	(45)	(60)
Effective Modulus E_r	(E_r)L, Gpa	138	200	104	138	200
	(10^3 ksi)	(20)	(29)	(15)	(29)	(29)
	(E_r)T, Gpa	165	200	69	69	-
	(10^3 ksi)	(24)	(29)	(10)	(10)	-

Tomado de Ferrocement and laminated composites (Naaman, 2000)

5.1.3 Características mecánicas del ferrocemento

Naaman [10] define los valores aproximados de las propiedades mecánicas para elementos de ferrocemento reforzados con mallas de acero convencional y matrices de mortero cemento en la tabla 5.

Tabla 7. *Propiedades mecánicas del ferrocemento reforzado con malla de acero convencional y matrices de mortero cemento.*

Ultimate Tensile Strength	Up to 35 Mpa
Modulus of Rupture	up to 70 Mpa (equivalent elastic bending strength)
Compressive Strength	80 to 100 percent of mortar matrix strength
Ultimate Tensile Strain	up to the tensile strain of the reinforcement
Crack Widths	Up to 100 times smaller than in reinforced concrete for same composite tensile stress as low as 1/100 mm were observed at working stresses

Tomado de Ferrocement and laminated composites (Naaman, 2000)

A continuación, se hará la definición de varias características mecánicas de los elementos contruidos en ferrocemento.

5.1.3.2 Fracción de volumen. Naaman [10] define la fracción de volumen de refuerzo como la relación de volumen de refuerzo y el volumen del material compuesto.

$$V_r = \frac{V_{reinforcement}}{V_{composite}}$$

Donde V_r representa la fracción de volumen, $V_{reinforcement}$ es el volumen del refuerzo y $V_{composite}$ es el volumen del compuesto.

Para calcular el volumen de refuerzo en mallas cuadradas y rectangulares [10] utiliza la siguiente ecuación:

$$V_r = \frac{N\pi d w^2}{4h} \left[\frac{1}{DL} + \frac{1}{DT} \right]$$

Donde N representa el número de capas de la malla, dw es el diámetro de la malla de alambre, DL es la distancia de centro a centro entre el alambre longitudinalmente, DT es la distancia de centro a centro entre el alambre transversalmente y h es el espesor del elemento de ferrocemento.

Por otro lado, para cualquier tipo de malla [10] utiliza la siguiente ecuación:

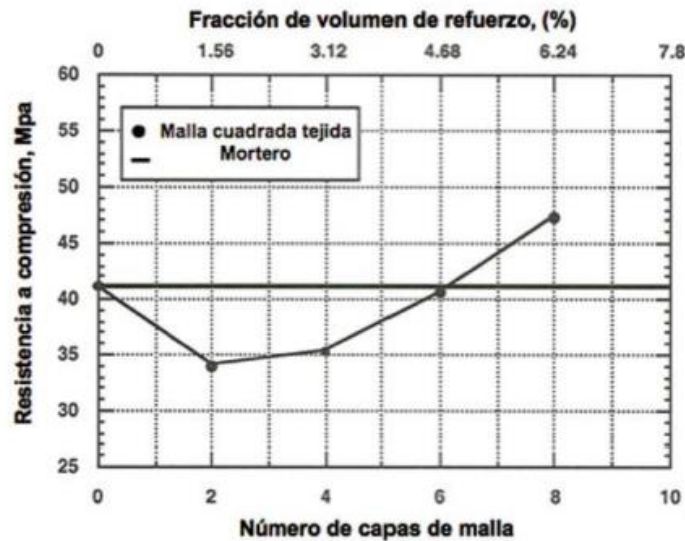
$$Vr = \frac{N Wr}{h \gamma r}$$

Donde N representa el número de capas de la malla, Wr es la unidad de medida del refuerzo de la malla, γr es la densidad del material de refuerzo en kg/m^3 o en lb/ft^3 y h es el espesor del elemento de ferrocemento.

5.1.3.3 Superficie específica de refuerzo Según [10] la superficie específica de refuerzo es el área total de la superficie lateral de refuerzo dividido en el volumen del compuesto, eso es el área superficial de refuerzo adherido por unidad de volumen del elemento.

$$Sr = \frac{\text{Superficie total del área adherida al refuerzo}}{\text{Volumen del elemento}}$$

5.1.3.4 Resistencia a compresión. Este comportamiento está caracterizado por el módulo de elasticidad del ferrocemento a compresión. Cuando el refuerzo es colocado únicamente en un plano, los efectos en la relación carga/deformación son mínimos y el módulo de elasticidad asociado a la compresión es igual al del mortero, mientras que, si el refuerzo es colocado en forma perimetral, la relación carga/deformación es curvilínea, con un módulo tangente inicial que incrementa gradualmente con la fracción del volumen de refuerzo. Los valores del módulo de elasticidad para especímenes de ferrocemento reforzados con malla soldada son ligeramente altos comparados con los reforzados con malla de metal expandido.

Figura 5. Gráfica de resistencia a la compresión de ferrocemento.

Tomado de Ferrocement and laminated composites (Naaman, 2000)

La resistencia a la compresión del ferrocemento depende de la matriz cementante del mortero, y de otros parámetros que la puede afectar, como las características del elemento que se encontrara en servicio, las proporciones de mezcla que se tomen en cuenta para hacer el diseño del mortero, el direccionamiento de mallas, entre otras [12].

La tabla 3 muestra proporciones de mezclas de mortero y su respectiva resistencia a compresión. Para valorar la resistencia a compresión se siguen los parámetros establecidos en [11] y se realiza el ensayo de cilindros a compresión según la NTC 220.

5.1.3.5 Comportamiento a flexión. La resistencia a flexión refleja la influencia combinada de los factores que gobiernan la resistencia a tracción y a compresión, se caracteriza por la relación de momento – curvatura para la cual se han propuesto varios métodos que permitan determinarla, los cuales pueden ser trazar una curva de segundo orden para la relación de esfuerzo-deformación del mortero a compresión y una relación bilineal para el esfuerzo a tracción, sin embargo, estos dos métodos de curva no han sido verificados experimentalmente [11].

En la siguiente figura se evidencia el comportamiento a flexión del ferrocemento.

Figura 6. *Grafica de Deflexión vs. Carga*

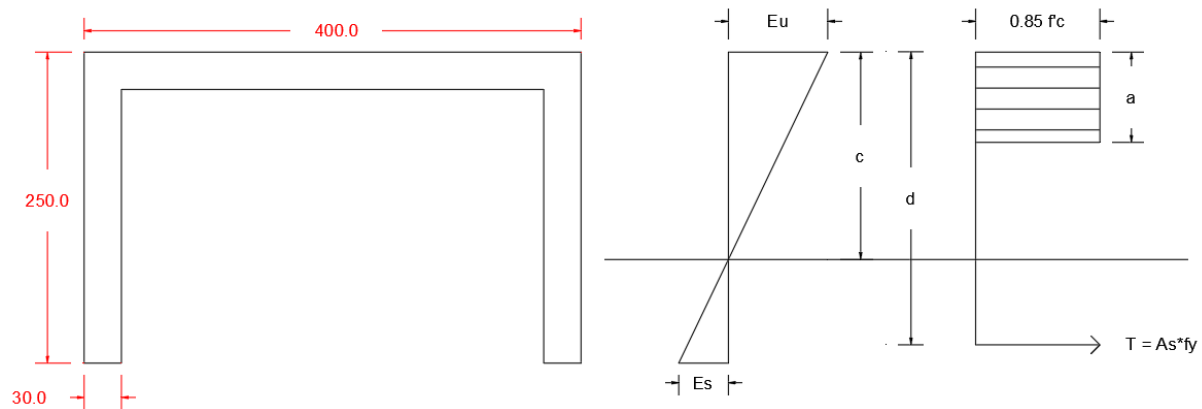


Tomado de Ferrocement and laminated composites (Naaman, 2000)

5.2 Método de Diseño del Ferrocemento

Existen distintos métodos de diseño para el ferrocemento, entre estos se destaca la metodología usada por el ACI 549r adoptada de igual forma por autores como Mesa, Munera & Oesch, en la cual se establece una analogía con la teoría del hormigón armado, más conocida como teoría de Whitney [14].

En la siguiente figura “se muestra la distribución del esfuerzo a tracción, esta supone que en la resistencia de momento nominal debe ser lineal y un bloque de esfuerzo rectangular que será utilizado para calcular la fuerza a compresión resultante que actúa sobre el hormigón”[11]. Con base en este diagrama se desarrolla el método de diseño para los elementos de ferrocemento.

Figura 7. Diagrama de deformación y esfuerzo para la vigueta de ferrocemento.

5.3 Aplicaciones del ferrocemento

Según [15] las aplicaciones constructivas del ferrocemento son extensas y variadas: bóvedas delgadas en Rusia, aplicaciones arquitectónicas en Estados Unidos, viviendas en la India, sur oeste asiático, Cuba y México, botes pesqueros en China, Nueva Zelandia, techos, tanques y silos para granos en Argentina, África y Tailandia, entre muchos otros. En Colombia se han presentado aplicaciones del ferrocemento, tales como tanques de fermentación de café, tanques de agua, losas y viviendas prefabricadas de bajo costo.

Malpica [15] comenta además que el ferrocemento se ha usado durante años en la elaboración de viviendas de interés social de bajo costo en distintos países alrededor del mundo, siendo Chile, México y Cuba los que más llaman la atención por su interés particular por generar viviendas de bajo costo que permitan suplir el déficit de viviendas dignas.

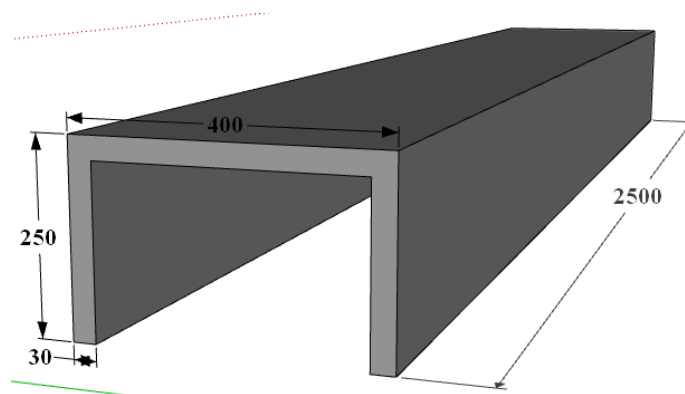
Entre los principales autores que han desarrollado estudios que aportan al desarrollo de vivienda de interés social en Colombia tenemos a Mesa, Munera y Oesch [14] quienes en su obra “Prefabricados de ferrocemento para losas autoconstruibles” caracterizaron diversas secciones transversales de viguetas determinando la mejor tipología para la construcción de forjados

incluyendo además distintos tipos de malla de refuerzo y entre otros materiales provenientes de Medellín, lugar dónde se realizó el estudio. Así mismo [4] en su tesis de maestría “forjados de bajo costo: análisis de la situación del Área Metropolitana de Bucaramanga” describen la necesidad de viviendas dignas para población de bajos recursos y realiza una revisión bibliográfica de los sistemas estructurales utilizados para construir forjados de bajo costo de ferrocemento mediante métodos de autoconstrucción.

6. Construcción de las viguetas.

En el marco de esta investigación se construyeron 4 viguetas de ferrocemento de 2.5 m de longitud con sección transversal en forma de C, con ancho, altura y espesor de 400mm, 250 mm y 30 mm respectivamente.

Figura 8. *Vigueta Tipo.*



A continuación, se comentan los aspectos principales relacionados con la construcción de las viguetas.

6.1 Encofrado.

El encofrado se elaboró utilizando madera, sus dimensiones permitían construir las viguetas según la forma y dimensiones planteadas. Se tuvo especial cuidado durante su construcción para asegurar su rectitud, resistencia y estanqueidad. Las caras internas del encofrado fueron revestidas con plástico para facilitar el desmoldado y mejorar el acabado de las viguetas (figura 9).

6.2 Materiales

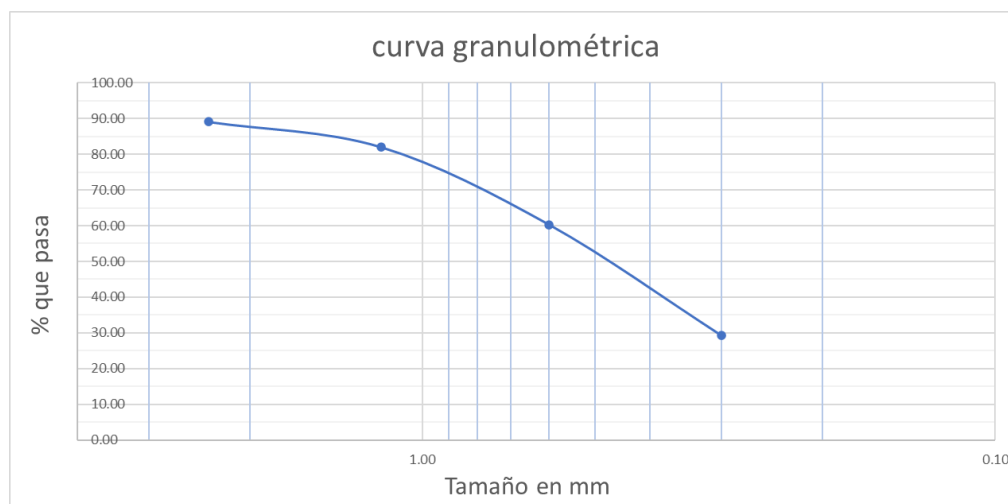
6.2.1 Cemento

Como se había mencionado anteriormente para los elementos de ferrocemento el cemento no requiere ser especializado, para este caso se utilizó cemento portland tipo 1 de uso general de la marca CEMEX.

6.2.2 Arena

La arena utilizada para la mezcla fue tamizada entre las aberturas comprendidas para el tamiz N° 8 (2.36 mm) y el tamiz N° 50 (0.3 mm), siguiendo las recomendaciones dadas por el ACI 549-R (ver tabla 2). La siguiente figura muestran las características granulométricas de la arena.

Figura 9. *Grafica de Curva Granulométrica.*



Finalmente, utilizó la arena que pasó por el tamiz No. 16 (1.18 mm).

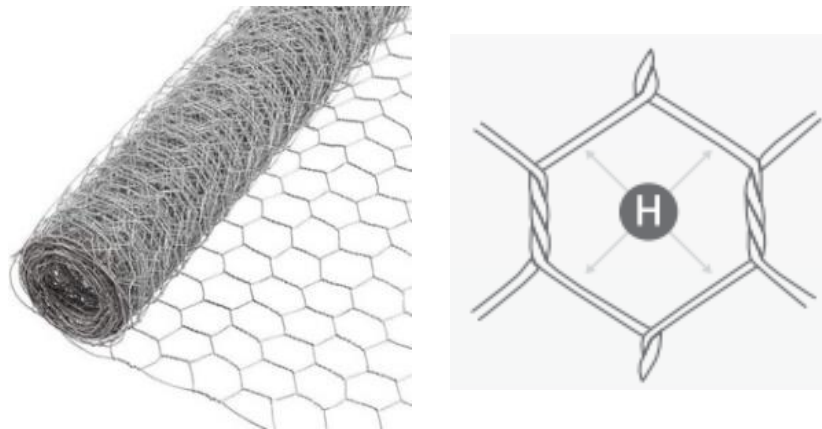
6.2.3 Armadura de esqueleto

Esta armadura permite dar la forma deseada al elemento de ferrocemento, proporciona suficiente rigidez para que dicha forma se mantenga durante el proceso constructivo y sobre ella se dispone la armadura difusa (malla hexagonal). En este caso para la construcción de las viguetas se utilizó una armadura de esqueleto compuesta 8 barras No. 2 (1/4") dispuestas longitudinalmente, transversalmente se añadieron 4 barras de 4 mm de diámetro. (Ver figura 13)

6.2.4 Armadura de difusa.

La armadura difusa de las viguetas consta de dos capas de malla de alambre galvanizado tejido (tipo gallinero) de ½ pulgada de abertura (H) y 0.56mm de diámetro. (figura 10). Para ficha técnica de la malla revisar apéndice A.

Figura 10. Malla hexagonal de alambre galvanizado de 1/2 pulg



Fuente: Tomado de Ficha técnica malla hexagonal ALMASA.

El volumen de refuerzo dispuesto a través de las dos capas de malla de alambre se calculó utilizando la siguiente expresión dada por Naaman:

$$Vr = \frac{N \cdot Wr}{h \cdot Yr}$$

Donde W_r es el peso unitario de la malla de refuerzo (kg/m^2 o kN/m^2), Y_r representa la densidad del acero (kg/m^3 o kN/m^3), h es el espesor del elemento y N es el número de capas de la malla.

$$V_r = \frac{2 \cdot 0.342 \text{ kg/m}^2}{0.03 \text{ m} \cdot 7850 \text{ kg/m}^3} \cdot 100 = 0.29\%$$

Se obtuvo un volumen de refuerzo del 0.29% utilizando dos capas de malla, sin embargo, Naaman plantea que la fracción de volumen del refuerzo máxima que se puede utilizar es de hasta el 8%, por lo tanto, la utilizada dentro de la realización de este proyecto está bastante por debajo del límite.

$$8\% = \frac{N \cdot 0.342 \text{ kg/m}^2}{0.03 \text{ m} \cdot 7850 \text{ kg/m}^3} \cdot 100$$

$$N = \frac{8\% \cdot 0.03 \text{ m} \cdot 7850 \text{ kg/m}^3}{0.342 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot 100} = 55 \text{ capas de mallas}$$

Por otro lado, se utilizó la misma fórmula para determinar la cantidad de malla necesaria para alcanzar el porcentaje máximo de 8%, siendo de 55 capas de malla.

6.2.5 Aditivos

El aditivo químico utilizado corresponde a un fluidificante para mezclas “SIKAFLUID” de la marca SIKA, este actúa como plastificante de la mezcla permitiendo una mayor fluidez e incrementando el asentamiento y además como reductor de agua incrementando la resistencia. Para ficha técnica del aditivo utilizado revisar apéndice B.

6.3 Diseño de la mezcla de mortero

Según el comité ACI 549r, la mezcla de mortero utilizada para la elaboración de elementos de ferrocemento debe tener una resistencia mínima a compresión de 35MPa [11] y una fluidez adecuada para atravesar de manera uniforme las aberturas de la malla difusa.

En esta investigación, la fluidez del mortero utilizado para construir las viguetas se encontró a través de ensayo y error. Para ello, se ensayaron 4 tipos de mezclas variando la relación arena-cemento y agua-cemento, hasta encontrar una mezcla con adecuada fluidez y resistencia a compresión.

La siguiente tabla muestra las relaciones empleadas para cada mezcla, su resistencia a compresión y la cantidad de aditivo fluidificante utilizado.

Tabla 8. *Tabla de resultados de mezclas de prueba.*

Mezcla	Relación Cemento - Arena	Relación Agua- Cemento	SIKA SET L (%)	SIKAFLUID (%)	Resistencia a compresión (Mpa)
1	1:2	0,53	3	0	24.79
2	1:2	0,53	3	0.5	21.00
3	1:2	0,53	3	1	18.96
4	1:1	0.39	3	1	37.72

Nota: Los porcentajes de aditivos se tomaron de acuerdo con la cantidad de cemento usado en la mezcla de mortero medido en peso (kilogramos).

La fluidez de las tres primeras mezclas no permitió su fácil disposición dentro del encofrado y sólo atravesaron algunas aberturas de las dos capas de armadura difusa dispuestas en

las viguetas, sin importar la vibración mecánica que se indujera a la mezcla. La figura 11 muestra el aspecto final de una vigueta construida con este tipo de mezclas.

Figura 11. *Vigueta construida con mezcla de*



La mezcla 4 se preparó modificando la relación arena-cemento de 1:2 a 1:1 y reduciendo la relación agua/cemento a 0.39, estas modificaciones permitieron obtener una mezcla suficientemente fluida y resistente. La tabla 9 muestra las cantidades empleadas para la mezcla utilizada en la construcción de las viguetas.

Tabla 9. *Dosificación de mezcla 1:1*

Material	Unidad	Cantidad
Cemento	Kg	65.00
Arena	Kg	65.00
Agua	L	22.75
SIKAFLUID	Kg	0.65
SIKASET L	Kg	1.95

Nota: A partir de estas cantidades se obtiene el volumen de mortero necesario (0.0063m³) para construir cada vigueta.

La mezcla utilizada para la construcción de cada vigueta fue ensayada a compresión empleando probetas cúbicas de 5 cm de lado. (figura 12), según la norma NTC 220.

Figura 12. *Ensayo de cubos de mortero.*

La tabla 10 muestra la resistencia a compresión de la mezcla de mortero empleada para la construcción de cada vigueta.

Tabla 10. *Resultados mezcla de mortero dispuesto en viguetas.*

Vigueta	Mezcla	Resistencia a compresión por edad (Mpa)		
		14 días	21 días	28 días
1	1:1	42.60	44.80	46.72
2	1:1	42.35	44.38	48.76
3	1:1	34.84	42.18	42.55
4	1:1	49.73	51.83	53.58

6.4 Proceso constructivo.

El proceso constructivo de las viguetas inicia con la elaboración de la armadura de esqueleto y la armadura difusa, para ello se cortaron y amarraron barras de acero según se muestra la siguiente figura. A continuación, se fue fijando con alambre las dos capas de mallas hexagonal sobre la armadura de esqueleto.

Figura 13. Armado de refuerzo.



Posteriormente, se dispuso aceite mineral sobre el plástico que recubría las paredes del encofrado para facilitar el desmoldado de la vigueta.

Antes de colocar la armadura dentro del encofrado, se aplicó una capa de mortero de 1 cm aproximadamente de altura para asegurar el recubrimiento inferior de la armadura. A continuación, se dispuso la armadura dentro del encofrado y se fue agregando manualmente el mortero compactándolo con el uso de una varilla y una porra de goma.

Una vez fraguado el mortero, se aplicó agua constantemente sobre las viguetas, al tercer día fueron desencofradas y forradas con plástico para asegurar su correcto curado.

Figura 14. Disposición del mortero.



Figura 15. *Curado de la vigueta*



A continuación, se muestra cada una de las viguetas construidas

Figura 16. *Vigueta 1.*



Figura 17. *Vigueta 2.*



Figura 18. *Vigueta 3.***Figura 19.** *Vigueta 4.*

7. Solicitaciones sobre la vigueta.

Para dar cumplimiento a uno de los objetivos de esta investigación, es fundamental obtener información sobre las fuerzas internas que se generan en la vigueta de ferrocemento cuando se utiliza en aplicaciones residenciales. Esto permitirá verificar si la resistencia a la flexión de la vigueta, determinada experimentalmente, supera el momento flector generado por las cargas típicas en un entorno residencial.

El valor del momento que solicitaría a la vigueta de ferrocemento, si es empleada en una vivienda, se ha calculado utilizando los valores de cargas permanentes y de uso presentadas en la tabla 11. Estos valores de carga son recomendados por la norma NSR -10.

Tabla 11. *Solicitaciones de diseño.*

Sección	Carga muerta		Carga de uso	Total cargas de servicio	Carga Mayorada 1.2D+1.6L	Mu	Carga Mayorada 1.5D+2L	Mu
	Peso propio	P y A						
	KN/m	KN/m	KN/m	KN/m	KN/m	KN·m	KN/m	KN·m
C	0.62	1.80	2.00	4.42	6.11	4.77	7.63	5.96

Nota: P y A corresponde al valor de carga para particiones y acabados y Mu es el valor de momento último.

Por otra parte, según [16] existen deflexiones máximas permitidas para los elementos estructurales que conforman las losas de sistemas de entresijos o cubiertas, estos se pueden encontrar en la tabla C.9.5(b) – “Deflexión máxima calculada”. Para este caso se tuvieron en cuenta las deflexiones máximas calculada para L/240 considerando que existen elementos no estructurales susceptibles a sufrir daño debido a deflexiones muy grandes.

$$\text{Límite de deflexión} = \frac{2500\text{mm}}{240} = 5.21\text{mm}$$

Sin embargo, también existe el caso en el cual considera que existen elementos no estructurales no susceptibles a sufrir daño debido a deflexiones muy grandes, siendo la deflexión máxima calculada como L/480.

$$\text{Límite de deflexión} = \frac{2500\text{mm}}{480} = 10.42\text{mm}$$

Teniendo en cuenta lo anterior, se debe limitar la carga resistida por las vigas al momento en el que alcanzan estas deflexiones, de esta forma se cumple con los estados límites de servicio, siendo la carga mínima requerida la sollicitación por servicio que se encuentra en la tabla de sollicitaciones de diseño.

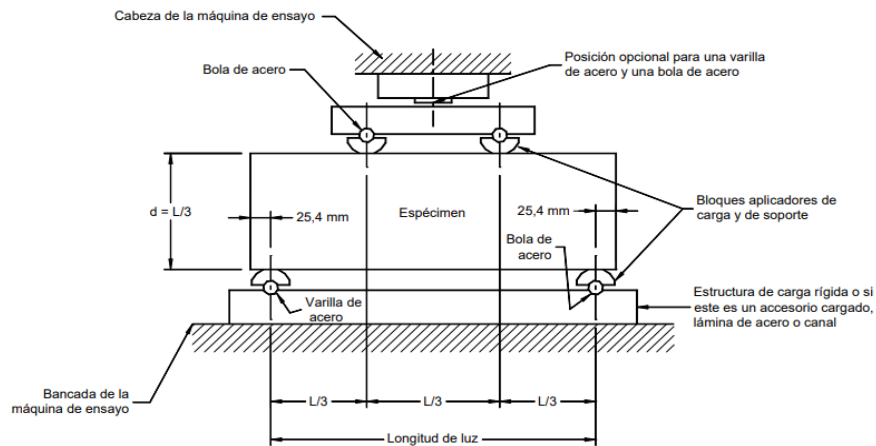
8. Ensayos de laboratorio

8.1 Configuración del ensayo a flexión.

Las viguetas fueron construidas y ensayadas a flexión en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás.

Cada vigueta se ensayó a flexión aplicándose una carga puntual al inicio y final de su tercio central estando sus extremos apoyados sobre un rodillo de acero (ver figura 20). La velocidad de aplicación de la carga fue de $0.025 \text{ kN}\cdot\text{s}$

Figura 20. Diagrama metodología de ensayo a flexión en vigas.



Tomado de NTC-2871 Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión.

Las deformaciones verticales presentadas por la vigueta durante proceso de carga fueron medidas utilizando un transductor lineal de desplazamiento dispuesto bajo la vigueta (LVDT).

Antes de realizar el ensayo a flexión sobre las viguetas de ferrocemento, se ensayaron a flexión tres vigas de hormigón para verificar el perfecto funcionamiento del marco de carga.

Figura 21. *Ensayo de calibración del marco de carga.*



8.2 Resultados

8.2.1 Vigueta 1

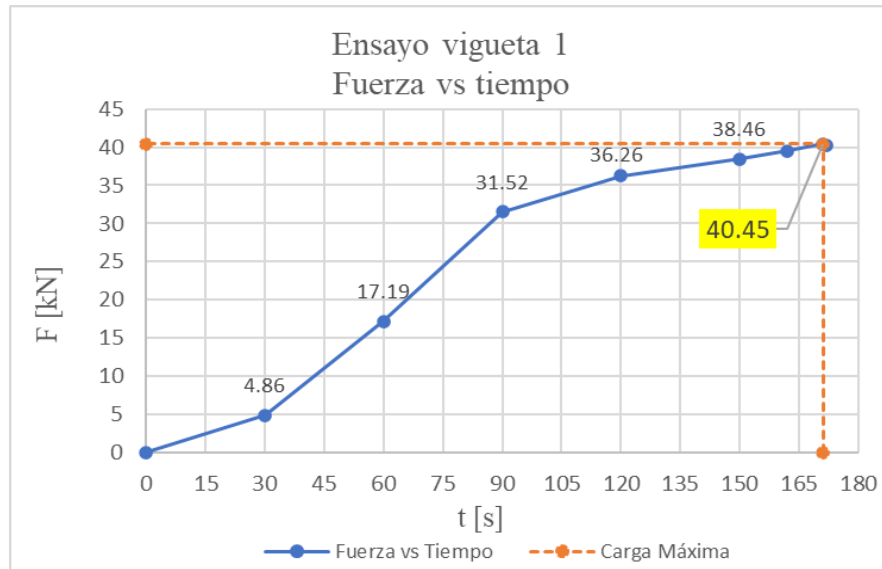
La figura 22 muestra el ensayo a flexión realizado para la vigueta 1 y su forma de fallo.

Figura 22. *Ensayo a flexión Vigueta 1.*



El tipo de fisuras presentadas por la vigueta durante el ensayo demuestra que su fallo se produjo por flexión.

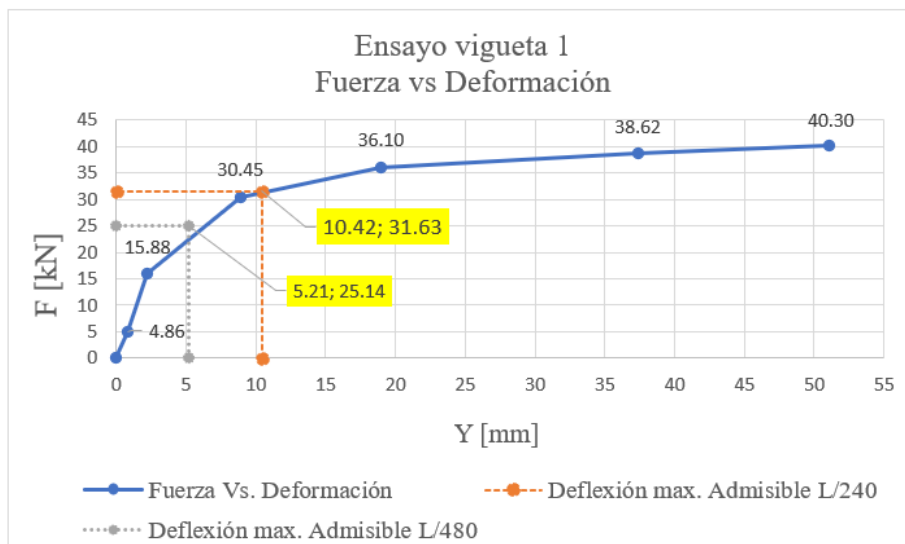
Figura 23. Gráfica Fuerza vs Tiempo Vigüeta 1



Nota: La gráfica resumen los resultados del ensayo a flexión obtenidos para la vigüeta 1.

Se observa que la carga máxima aplicada fue de 40.45 KN.

Figura 24. Gráfica Fuerza vs Deformación Vigüeta 1



Nota: En esta gráfica se observan las deformaciones límites calculadas con L/240 y L/480

y la carga aplicada en el elemento para cada una de ellas. Para ambos límites se cumple que la

carga última es menor a las cargas en que se alcanzan estas deformaciones admisibles cumpliendo con el estado límite de servicio.

8.2.2 Vigueta 2

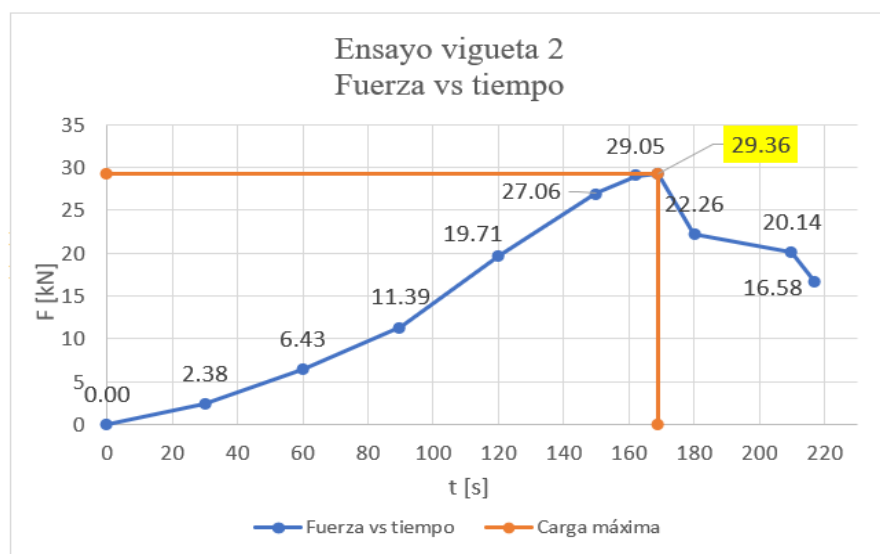
En la figura 25 se muestra el ensayo a flexión realizado para la vigueta 2 y la forma en que esta falló.

Figura 25. Ensayo a flexión vigueta 2.



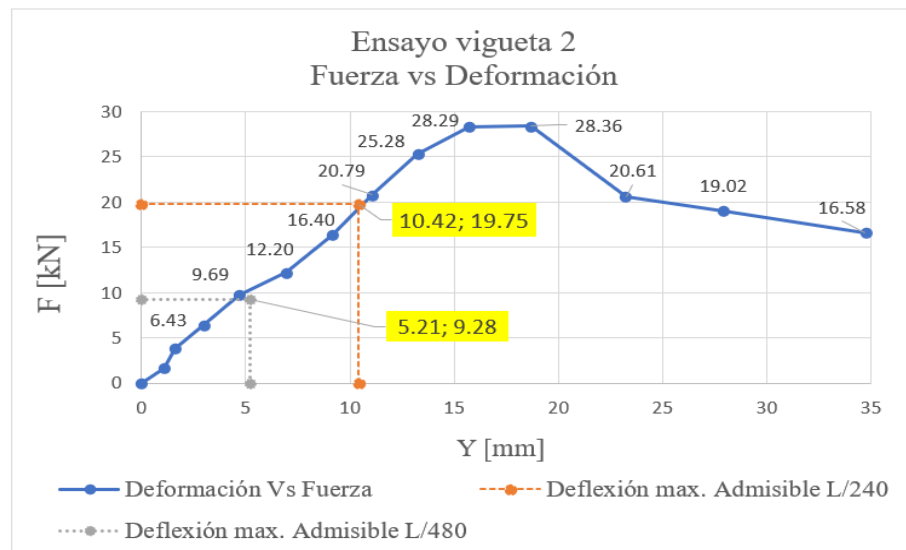
Nota: Según la fisura presente en la vigueta se analiza como una falla por esfuerzos de cortante teniendo en cuenta la propagación de la fisura a 45° partiendo desde el apoyo, por lo que la vigueta no alcanzó su resistencia final por flexión.

Figura 26. Gráfica Fuerza vs Tiempo Vigueta 2



Nota: En la gráfica se resumen los resultados del ensayo a flexión obtenidos para la vigueta 2. El fallo a cortante de esta vigueta evitó que ésta alcanzara su resistencia a flexión, el valor de carga alcanzado fue de 29.23 Kn, valor que corresponde a un 72% de la resistencia a flexión de la vigueta 1.

Figura 27. Gráfica de Fuerza vs Deformación Vigueta 2



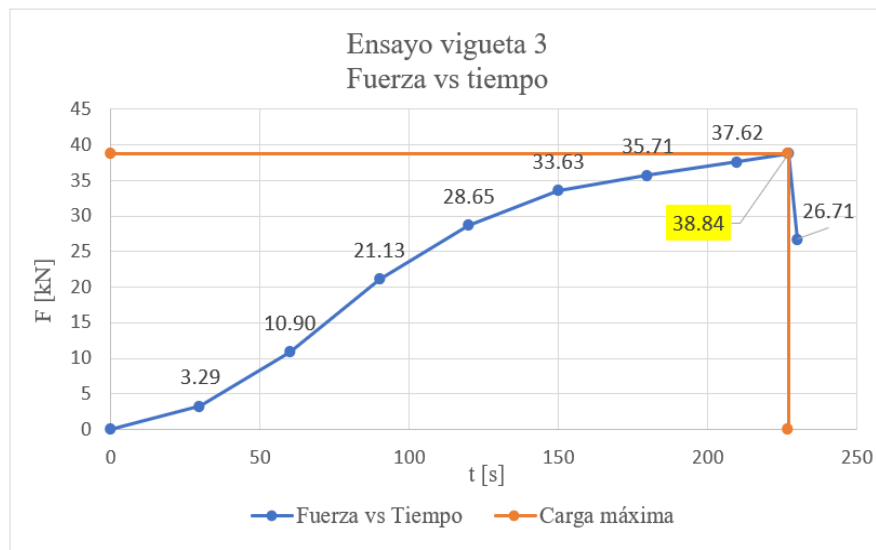
Nota: Para la revisión de los estados límites de servicio las deformaciones admisibles se calcularon con L/240 y L/480. Sin embargo, para la deformación de L/480 no alcanza a cumplir con que la carga sea mayor a la carga de diseño, mientras que para la deformación de L/240 sí se evidencia que supera la carga de diseño, por ende, cumple.

8.2.3 Vigueta 3

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos para el ensayo de la vigueta 3, en la figura 28 se puede observar el momento en que el elemento falló.

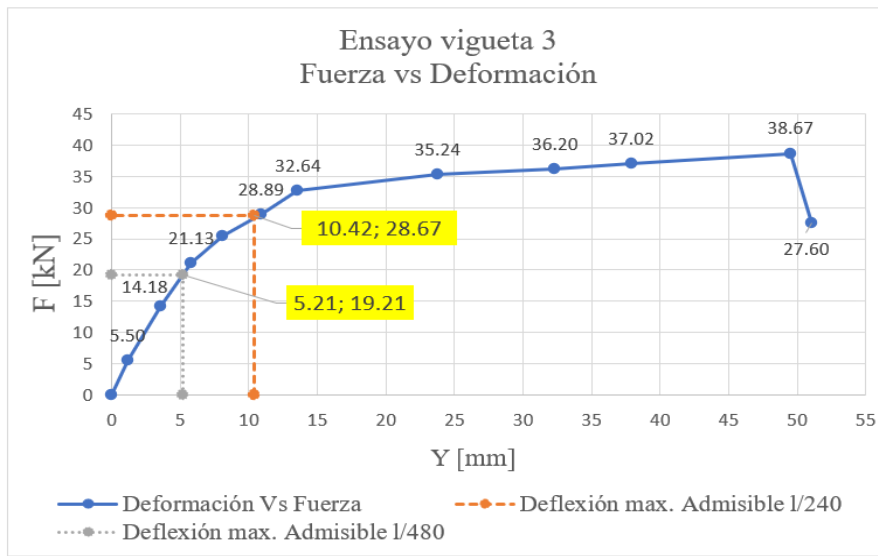
Figura 28. Ensayo a flexión de la vigueta 3.

Nota: Al igual que con el espécimen número 1, la vigueta 3 falló por esfuerzos de flexión mostrando fisuras propias de este.

Figura 29. Gráfica Fuerza vs Tiempo Vigueta 3

Nota: En la gráfica se resumen los resultados del ensayo a flexión obtenidos para la vigueta 3. La vigueta 3 alcanzó una carga máxima de 38.84 kN.

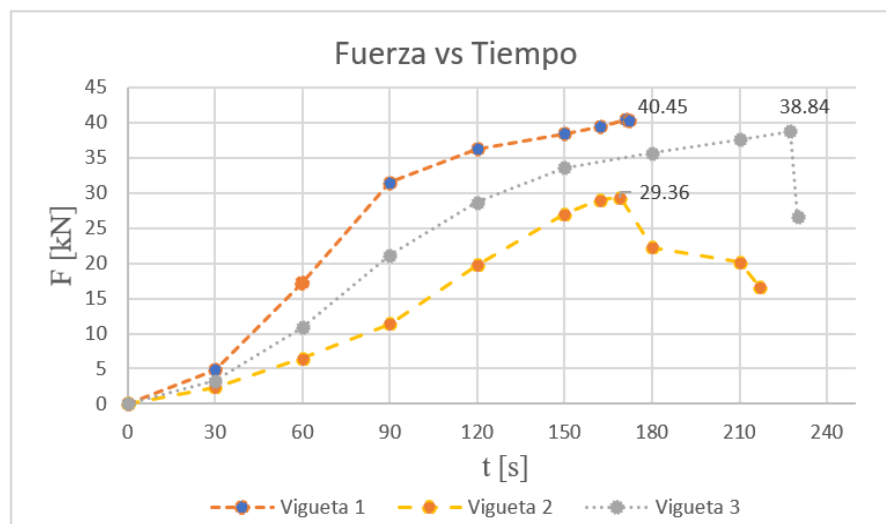
Figura 30. Gráfica Fuerza vs Deformación Vigüeta 3



Nota: En esta gráfica se observan las deformaciones admisibles teniendo en cuenta la carga aplicada en el elemento, las cuales se calcularon con L/240 y L/480. Para ambos casos la carga en la que se obtienen las deformaciones es menor que la carga de diseño, por tanto, cumple con los estados límites de servicio.

La figura 31 muestra la gráfica de Fuerza vs Tiempo para las tres vigüetas ensayadas, en ella se puede comparar la carga que soportaron las tres a medida que transcurría el tiempo del ensayo.

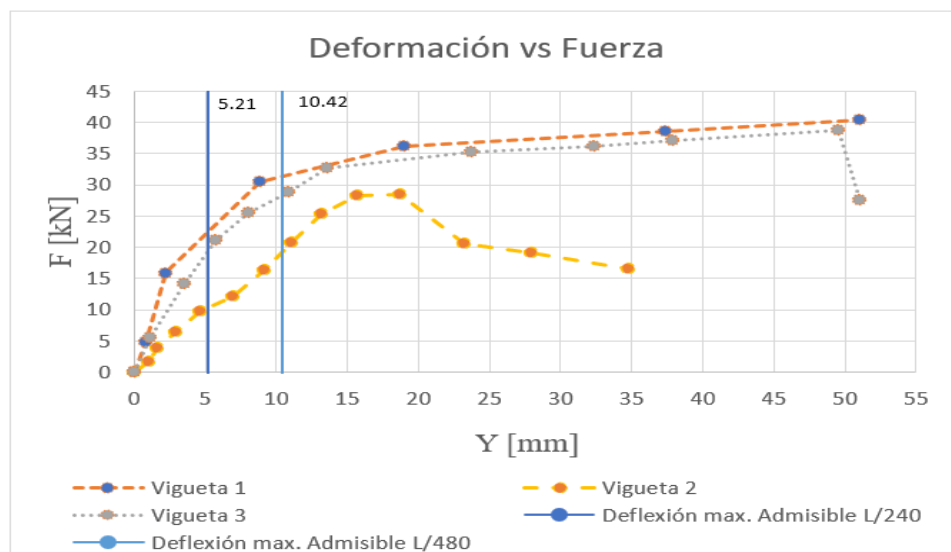
Figura 31. Gráfica comparación de Fuerza vs Tiempo



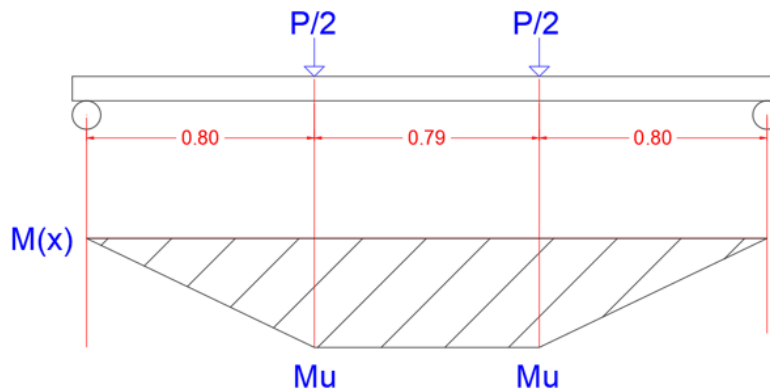
Nota: Como se puede observar en la gráfica la vigueta 1 fue la que más carga soportó a comparación de las otras dos viguetas durante todo el tiempo del ensayo. Por otro lado, la vigueta 2 fue la que menos carga soportó y a su vez falló más rápido que las otras. Finalmente, la vigueta 3 soportó cargas intermedias respecto a las otras dos viguetas y además fue la que más tardó en fallar.

En la figura 32 se encuentra la gráfica de Deformación vs Fuerza para los tres especímenes ensayados, con sus respectivas deformaciones y las cargas correspondientes, además se dejaron marcados los puntos en los que se alcanzaban las deformaciones admisibles de $L/240$ y $L/480$.

Figura 32. Gráfica comparación de Deformación vs Fuerza



Nota: La vigueta 1 fue la que mayor carga alcanzó para ambas deformaciones admisibles y la vigueta 3 obtuvo valores cercanos a esta. Por otro lado, la vigueta 2 fue la que alcanzó las cargas más pequeñas para ambas deformaciones calculadas.

Figura 33. Diagrama de momento presente en viguetas.

Partiendo del análisis del diagrama de momento presente en la viga de acuerdo con las cargas, se procede a calcular del momento último de las viguetas, de manera simplificada se puede calcular multiplicando la carga P/2 por la longitud a la que es aplicada de la siguiente forma.

$$M_u [kN \cdot m] = \frac{P [kN]}{2} \cdot 0.8 [m]$$

Finalmente, los resultados obtenidos de carga final se pueden observar en la siguiente tabla; en la cual además se muestra el momento final calculado de acuerdo con la carga resistida por cada una de las viguetas.

Tabla 12. Resultados de ensayos

Vigueta	Carga máxima aplicada	Momento resistido [kN·m]	Tipo de falla
1	40.45	16.18	flexión
2	29.36	11.74	cortante
3	38.84	15.54	flexión

Considerando ahora que el momento último que debían resistir era de 5.96 kN·m se puede observar que los momentos calculados a partir de los datos de ensayo están por encima de este

valor, sin embargo, esto sería sin tener en cuenta las deflexiones máximas permitidas, ya que las cargas utilizadas se alcanzaron en promedio a deformaciones de 50mm.

Teniendo en cuenta lo anterior se debe limitar el momento resistido al que se generaron con las cargas aplicadas cuando la vigueta presentaba deflexiones iguales a los límites calculados para $L/240$ y $L/480$.

Tabla 13. *Momento resistido para carga aplicada en deflexión de $L/240$*

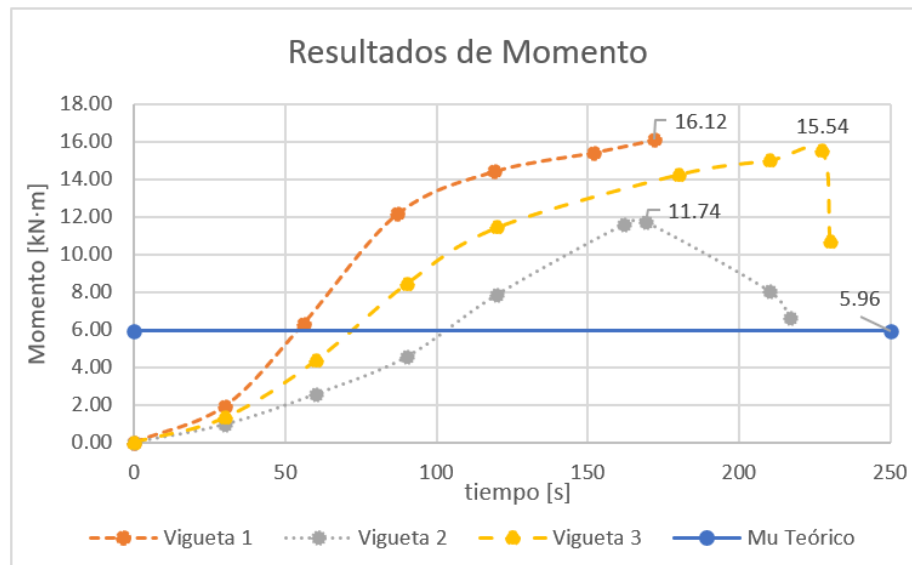
Vigueta	Carga máxima	Momento
	aplicada [kN]	resistido [kN·m]
1	31.63	12.65
2	19.75	7.90
3	28.67	11.47

Nota: Con estos valores obtenidos de momento se puede evidenciar que las viguetas cumplen con el momento obtenido a partir de las solicitaciones manteniéndose dentro del rango de las deflexiones admisibles de $L/240$ (10.42mm).

Tabla 14. *Momento resistido para carga aplicada en deflexión de $L/480$*

Vigueta	Carga máxima	Momento
	aplicada [kN]	resistido [Kn·m]
1	25.14	10.06
2	9.28	3.71
3	19.21	7.68

Nota: A diferencia de los resultados anteriores, para una deflexión admisible de $L/480$ (5.21mm) la vigueta 2 no cumple con las solicitaciones dentro del rango del estado límite de servicio, esto es debido a que no falló por flexión.

Figura 34. *Análisis de resultados de momentos flectores.*

Nota: En este se puede observar que el comportamiento de las viguetas 1 y 3 que fallaron a flexión fue similar en cuanto al momento final resistido y la progresión de este, mientras que para la vigueta 2 que falló por cortante, el momento resistido fue notablemente menor.

8.3 Análisis de costos

Con el fin de realizar un análisis que permita determinar la viabilidad económica de la construcción en ferrocemento se comparó con dos tipos de forjados tradicionales utilizados en Colombia como lo es la losa maciza y losa aligerada. Esto se realizó teniendo en cuenta características similares de resistencia entre los forjados.

8.3.1 Costo por m^2 de Forjado en ferrocemento

Para realizar el análisis de precios unitarios de las viguetas de ferrocemento, el precio de los materiales que se tuvieron en cuenta de acuerdo a valores promedio de materiales consultados a distintos proveedores en el Área Metropolitana de Bucaramanga; por otro lado, los costos generados por mano de obra no fueron tenidos en cuenta considerando que el objetivo del presente proyecto es reducir los costos asociados a mano de obra que puede ser reemplazada por las mismas familias ya que no se requiere de mano de obra especializada para la construcción de estos

prefabricados, sin embargo si se consideró el valor generado por el factor prestacional inherente a cada uno de los empleos.

A continuación, se presenta el Análisis de precios unitarios de 1m² de losa construida con viguetas de ferrocemento con sección transversal en C.

Tabla 15. Análisis de precios unitarios de 1m² de forjado en ferrocemento.

Análisis de precios unitarios: forjado en ferrocemento						Unidad: m ²	
Materiales							
	Descripción		Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Parcial	
	Cemento bulto x 50kg		und	1.30	\$ 27,000.00	\$ 35,100.00	
	Arena fina que pasa por el tamiz 1.18mm		m ³	0.06	\$ 160,000.00	\$ 9,600.00	
	Agua		m ³	0.02	\$ 3.00	\$ 0.07	
	oro en barras corrugadas, Grado 60 (fy=4200 kg/cm ²), Φ 1		kg	5.25	\$ 4,745.65	\$ 24,914.66	
	oro en barras corrugadas, Grado 60 (fy=4200 kg/cm ²), Φ 4:		kg	1.00	\$ 4,125.00	\$ 4,125.00	
	Malla pajarito 1/2" x 0.9m de ancho		m	5.00	\$ 5,000.00	\$ 25,000.00	
	Alambre negro #17 chipa x1kg		kg	0.30	\$ 11,900.00	\$ 3,570.00	
	SikaFluid X 25Kg		Kg	0.65	\$ 250,000.00	\$ 6,500.00	
	Madera encofrado		und	0.10	\$ 313,208	\$ 31,321	
Subtotal materiales:						\$	140,130.53
Equipo							
	Descripción		unidad	rendimiento	Valor Unitario	Valor Parcial	
	mezcladora 1.5 bultos		d	0.0625	\$ 90,000.00	\$ 5,625.00	
	Vibrador eléctrico		d	0.0625	\$ 50,000.00	\$ 3,125.00	
Subtotal equipo:						\$	8,750.00
Mano de obra							
	Descripción	cant	rendimiento	Jornal	P.S.	Jornal + Pres	Valor Parcial
	Ayudantes	1	2.5	\$ 38,667.00	54.50%	\$ 21,073.52	\$ 8,429.41
	Oficial	1	2.5	\$ 49,680.00	54.50%	\$ 27,075.60	\$ 10,830.24
Subtotal mano de obra:						\$	10,830.24
Herramienta menor							
	Descripción		unidad	rendimiento	Valor Unitario	Valor Parcial	
	Herramienta menor		%	3	\$ 140,130.53	\$ 4,203.92	
Subtotal herramienta menor:						\$	4,203.92
Acarreos y transporte							
	Descripción		unidad	cantidad	Tarifa	Valor Parcial	
	Acarreos y transporte		%	15	\$ 148,881	\$ 22,332.08	
Subtotal acarreos y transporte:						\$	22,332.08
Total Costos directos						\$	208,578.85

Nota: En este podemos observar que los ítems más costosos por valor unitario corresponden al aditivo SIKAFUID y a la madera para el encofrado, sin embargo, teniendo en

cuenta el rendimiento de estos su precio disminuye haciendo que sea rentable; por otro lado, los costos de equipos se tomaron teniendo en cuenta precios actuales del mercado, además ninguno de los valores de materiales y equipos incluye transporte, este se tomó como un 15% de la sumatoria del subtotal de estos dos ítems.

8.3.2 Costo por m² de forjado en losa maciza y aligerada

Figura 35. Comparación de costos por m² entre losa de ferrocemento, maciza y aligerada.



Nota: El análisis de precios unitarios de las losas maciza y aligerada se encuentra en el apéndice C anexo a este documento. Fuente: elaboración propia.

Para la losa maciza las características técnicas fueron tomadas de [17] corresponden a las de una losa de concreto armado con $f'c= 21$ MPa, horizontal, con altura libre de planta de hasta 3 m, canto 15 cm, tamaño máximo del agregado 12,5 mm, manejabilidad blanda, preparado en obra, y fundido con medios manuales, acero Grado 60 ($f_y=420$ MPa) con una cuantía aproximada de 21 kg/m²; montaje y desmontaje de sistema de encofrado continuo, con acabado para revestir.

Por otro lado, para la losa aligerada las características técnicas fueron tomadas de [18] siendo esta una estructura de concreto armado con $f'c=21$ MPa, tamaño máximo del agregado 12,5

mm, manejabilidad blanda, preparado en obra y fundido con medios manuales, con un volumen total de concreto en losa y vigas de $0,139 \text{ m}^3/\text{m}^2$, el acero es Grado 60 ($f_y=420\text{MPa}$) en zona de nervios, zunchos y vigas, con una cuantía total de $15 \text{ kg}/\text{m}^2$, constituida por: losa armada en una dirección horizontal, de canto $25 = 20+5 \text{ cm}$; montaje y desmontaje de sistema de encofrado continuo, con acabado para revestir, formado por: superficie encofrante de tableros de madera tratada, nervio "in situ" de 12 cm de ancho, intereje 72 cm ; casetón de guadua de $60 \times 50 \times 20 \text{ cm}$, para nervios "in situ"; capa de compresión de 5 cm de espesor con armadura de malla electrosoldada tipo XX 50, $25 \times 25 \text{ cm}$ y $\emptyset 4-4 \text{ mm}$.

9. Conclusiones y recomendaciones

Con respecto al primer objetivo del presente trabajo podemos concluir que la fuente más confiable para el proceso del diseño de elementos de ferrocemento es la norma ACI 549r, sin embargo en lo que refiere al tema del proceso constructivo existen referentes como Munera, Meza y Oesch que explican detalladamente la manera correcta en la que se debe ejecutar la construcción de las viguetas de ferrocemento haciendo que este sea adecuado para el proceso de autoconstrucción al que se buscaba llegar, permitiendo que las viguetas sean construidas por mano de obra no calificada como las familias beneficiadas.

De igual forma, cabe aclarar que en el caso de llevarse en desarrollo un proceso de autoconstrucción como este, es necesario brindarle al personal la información clara y precisa de todos los aspectos técnicos y de diseño necesarios, además de realizar un estricto seguimiento y control que garantice el desarrollo de los procesos de la forma indicada y también que velando por la seguridad e integridad de las personas que se encuentran realizando la labor.

Por otro lado, como resultado de los ensayos a flexión realizados en las viguetas 1, 2 y 3 se obtuvieron resistencias últimas a momento de 16.18 kN·m, 11.74 kN·m y 15.54 kN·m respectivamente, superando en un 100% el momento de 5.96 kN·m calculado a partir del análisis de cargas para las cuales fueron diseñadas las viguetas. Examinando el tipo de falla que se presentó se pudo determinar que las viguetas 1 y 3 fallaron por flexión mientras que la vigueta 2 por cortante resistiendo una carga por debajo a la de las anteriormente mencionadas.

Aunque las viguetas mostraban fisuras, grietas y deformaciones considerables no se observó una tendencia al colapso inmediato, esto es gracias al refuerzo de malla que permite que el ferrocemento pueda soportar grandes cargas y deformaciones sin fallar de forma frágil. Sin embargo, en la carga máxima el elemento sobrepasó su zona elástica quedando con deformaciones remanentes por pandeo.

La resistencia final de las viguetas superó el valor definido como mínimo permitiendo evidenciar que estas cumplen adecuadamente las solicitaciones de uso normal de una edificación residencial, no obstante, teniendo en cuenta que la resistencia fue muy superior a la esperada se recomienda optimizar la cantidad de acero dispuesto con el fin de reducir costos.

Respecto al análisis de costos, después de realizar los APUs correspondientes a la losa aligerada y maciza se pudo definir que para la construcción de 1 m² de ambos tipos de forjados el costo fue similar, sin embargo, la losa aligerada resultó ser mil pesos más costosa que la losa maciza siendo una de \$257.499,12 pesos y la otra de \$256.259,21 pesos respectivamente. Por tanto, se determinó que el forjado elaborado en ferrocemento es más económico que las otras dos opciones de forjado, ya que el valor para 1 m² fue de 208.578,85 pesos.

Finalmente, teniendo en cuenta todos los aspectos que ya se mencionaron con base en los resultados de los ensayos hechos en el laboratorio y los análisis de costos de cada tipo de losa, se

determinó que este tipo de forjados son viables técnica y económicamente al construirse con materiales que se encuentran en el Área Metropolitana de Bucaramanga.

Referencias

- [1] NACIONES UNIDAS CEPAL, “Las ciudades y la vivienda brindan una oportunidad para transformar el modelo de desarrollo de América Latina y el Caribe hacia uno más inclusivo, igualitario y sostenible,” *cepal.org*, 2021. <https://www.cepal.org/es/noticias/ciudades-la-vivienda-brindan-oportunidad-transformar-modelo-desarrollo-america-latina>.
- [2] E. Fernandes, *Regularización de asentamientos informales en América Latina. Informe sobre Enfoque en Políticas de Suelo*. Lincoln Institute of Land Policy., 2011.
- [3] Departamento Administrativo Nacional De Estadística, “Boletín Técnico: Déficit Habitacional CNPV 2018,” *Dep. Adm. Nac. Estad.*, p. 20, 2018, [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/deficit-habitacional/deficit-hab-2020-boletin.pdf>.
- [4] W. Caballero, “Ingeniería Estructural Y De La Construcción Forjados De Bajo Costo :,” 2014, [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/114069/4/TFM conjunta.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [5] Naciones Unidas, “El derecho humano a una vivienda adecuada.” *ohchr.org*, [Online]. Available: <https://www.ohchr.org/es/special-procedures/sr-housing/human-right-adequate-housing>.
- [6] E. Velásquez, “Vivienda: inviable para la mayoría,” *ONU HABITAD*, 2020. <https://onuhabitat.org.mx/index.php/vivienda-inviable-para-la-mayoria>.
- [7] Asamblea Constituyente de Colombia de 1991, “Constitución Política 1 de 1991 Asamblea

- Nacional Constituyente, Art. 51.” 1991, [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4125>.
- [8] Departamento Administrativo Nacional De Estadística, “ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles,” *Objetivos de Desarrollo Sostenible*, 2019. <https://ods.dnp.gov.co/es/objetivos/ciudades-y-comunidades-sostenibles>.
- [9] Instituto de Estudios Urbanos, “Déficit, segregación y asentamientos, principales problemas de Bucaramanga en materia de vivienda.” Sitio web del Instituto de Estudios Urbanos IEU. Universidad Nacional de Colombia., 2013, [Online]. Available: http://ieu.unal.edu.co/en/simposio-internacional-derecho-a-la-ciudad/certificados-de-asistencia/18-noticias/730-deficit_segregacion_asentamientos_bucaramanga#:~:text=Certificados de Asistencia-,Déficit%2C segregación y asentamientos%2C principales problem.
- [10] A. E. Naaman, “Ferrocement and laminated cementitious composites: by Antoine E. Naaman, 2000,” *Materials and Structures*, vol. 33, no. 2. pp. CO3–CO3, 2000.
- [11] American Concrete Institute, “Guide for the Design, Construction, and Repair of Ferrocement,” 1988.
- [12] M. Gamboa, Ángela; Navarro, “Caracterización físico - mecánica del ferrocemento,” Universidad Pontificia Bolivariana Bucaramanga, Colombia, 2012.
- [13] R. Uribe, “Diseño, fabricación y ensayo de vigas con perfil doble ‘t’ de ferrocemento,” Universidad Austral de Chile, 2004.
- [14] C. Mesa, A. Munera, and R. Oesch, *Prefabricado de ferrocemento para losas autoconstruibles*, 1st ed. Medellín: Universidad de Medellín, 1984.
- [15] P. R. Malpica, “Análisis de factibilidad técnica y económica de viviendas sismoresistentes en ferrocemento,” Universidad Nacional de Colombia, 2017.

- [16] A. C. de I. S. AIS, “NCR10 - Título C: Concreto estructural,” *Reglam. Colomb. Construcción Sismo Resist. Nsr-10*, p. 590, 2010.
- [17] Generadordeprecios.info, “Precio en Colombia de m² de Losa maciza. Generador de precios de la construcción. CYPE Ingenieros, S.A.,” 2023.
<http://www.colombia.generadordeprecios.info>.
- [18] Generadordeprecios.info, “Precio en Colombia de m² de Losa aligerada con casetón recuperable. Generador de precios de la construcción. CYPE Ingenieros, S.A.,” 2023.
<http://www.colombia.generadordeprecios.info>.