

RESUMEN

DISEÑO Y ESTUDIO DE ELEMENTOS TIPO “C” SOMETIDOS A FLEXION, TRACCION Y COMPRESION FABRICADOS EN FERROCEMENTO

El ferrocemento es un material que se asemeja al hormigón armado y es económico a la vez, además de contar con otras características que lo hace un material óptimo para la construcción ya que el lugar de barras de acero, utiliza mallas de acero, que le proporcionan más flexibilidad sin perder resistencia. El estudio que aquí se expone comprende el comportamiento de estructuras de ferrocemento utilizando distintas mallas y comparándolas para ver su eficiencia.

El presente tema tiene como finalidad dar a conocer las características mecánicas que tienen los elementos tipo C fabricados en ferrocemento, para ser utilizados en la construcción de obras civiles. Para el diseño se empleará lo estipulado en “Requisitos de Reglamento y Comentario del Comité ACI-318 S-05”, “Guía para el Diseño, Construcción y Reparación del Ferrocemento”, y “Estado del Arte Publicado por el ACI”.

PALABRAS CLAVE: Ferrocemento, Elementos Tipo “C”

INDICE

CAPITULO 1	5
1.1. INTRODUCCION.	5
1.2. OBJETIVOS:	¡Error! Marcador no definido.
CAPITULO 2	7
2.1. DEFINICIONES GENERALES	7
2.2. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES;	¡Error! Marcador no definido.
2.3. FUNDAMENTOS UTILIZADOS PARA EL DISEÑO SEGÚN LA NORMATIVA ACI-549.R	37
CAPITULO 3	65
3.1. DISEÑO Y FABRICACION DE ELEMENTOS SOMETIDOS A FLEXIÓN, TRACCIÓN Y COMPRESIÓN SEGÚN LA NORMATIVA ACI- 549.R-18 Y ACI-318 PARA SECCIONES TIPO C FABRICADOS EN FERROCEMENTO.	65
CAPITULO 4	96
4.1. ANALISIS DE RESULTADOS	96
CAPITULO 5	98
5.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	98
BIBLIOGRAFÍA:	99
ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.



FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA CIVIL

**DISEÑO Y ESTUDIO DE ELEMENTOS TIPO “C” SOMETIDOS A
FLEXIÓN, TRACCIÓN Y COMPRESIÓN FABRICADOS EN
FERROCENTO.**

Tesina previa a la obtención
del Título de Ingeniero Civil

AUTORES:

Bruno Roberto Guzmán Domínguez

Israel Fernando Salcedo Alvear

DIRECTOR:

Ing. Rubén Jerves

Cuenca - Ecuador



INDICE

CAPITULO 1	5
1.1. INTRODUCCION.....	5
1.2. OBJETIVOS:	6
1.2.1. Objetivo General.....	6
1.2.2. Objetivos Específicos.....	6
CAPITULO 2	7
2.1. DEFINICIONES GENERALES.....	7
2.1.1. Descripción del Ferrocemento:.....	7
2.1.2. Ferrocemento y Hormigón Armado	9
2.1.2.1. El ferrocemento como un material compuesto laminado	9
2.1.2.2. Diferencias físicas y mecánicas con el hormigón armado	10
2.1.2.3. Similitudes entre el ferrocemento y el hormigón armado.....	11
2.1.3. Antecedente histórico y actualidad	11
2.1.4. Construcción con ferrocemento	14
2.1.4.1. Embarcaciones	15
2.1.4.2. Tanques y Techumbres.....	16
2.1.4.3. Edificios y Estructuras.....	17
2.1.4.4. Viviendas de bajo costo.....	19
2.2. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES	22
2.2.1. Componentes del ferrocemento	22
2.2.1.1. Componente dúctil: El tejido de alambre y las fibras	23
2.2.1.2. Componente frágil: Las matrices aglutinantes.....	26
2.2.2. Propiedades físicas y mecánicas del mortero	27
2.2.2.1. Propiedades en estado fresco.....	27
2.2.2.2. Propiedades en estado duro.....	28
2.2.3. Componentes del mortero y su equilibrio en la mezcla.....	31
2.2.3.1. Cemento.....	31



UNIVERSIDAD DE CUENCA

2.2.3.2.	Agregados finos inertes.....	32
2.2.3.3.	Agua.....	35
2.3.	FUNDAMENTOS UTILIZADOS PARA EL DISEÑO SEGÚN LA NORMATIVA ACI-549.R.....	37
2.3.1.	Parámetros mecánicos para el diseño estructural	37
2.3.1.1.	Fracción de volumen de refuerzo y de mortero	38
2.3.1.2.	Área efectiva de refuerzo	40
2.3.1.3.	Superficie específica de refuerzo.....	42
2.3.1.4.	Propiedades del compuesto	43
2.3.2.	Comportamiento carga–deformación bajo carga estática.....	43
2.3.2.1.	Elasticidad y comportamiento carga–deformación en tracción	43
2.3.2.2.	Comportamiento carga–deformación en compresión	51
2.3.2.3.	Comportamiento carga–deformación en flexión	52
2.3.3.	Resistencia ultima bajo carga estática.....	56
2.3.3.1.	Resistencia última a tracción	56
2.3.3.2.	Resistencia última a compresión	57
2.3.3.3.	Resistencia última a flexión.....	57
2.3.3.4.	Resistencia última a cortante y punzonamiento	59
2.3.4.	Comportamiento bajo cargas repetitivas	61
2.3.4.1.	Flexión bajo carga de fatiga.....	61
2.3.4.2.	Comportamiento bajo cargas cíclicas	63
CAPITULO 3	.....	65
3.1.	DISEÑO Y FABRICACION DE ELEMENTOS SOMETIDOS A FLEXIÓN, TRACCIÓN Y COMPRESIÓN SEGÚN LA NORMATIVA ACI-549.R-18 Y ACI-318 PARA SECCIONES TIPO C FABRICADOS EN FERROCEMENTO.....	65
3.1.1.	DISEÑO DE ELEMENTO TIPO DE FERROCEMENTO.....	65
3.1.2.	MATERIALES UTILIZADOS:.....	76
3.1.1.1.	Cemento portland tipo 1:	76
3.1.1.2.	Mallas fabricadas por la industria Ideal - Alambrec:	76
3.1.2.1.	Arena.....	78
3.1.2.2.	Madera para encofrado.	78
3.1.3.	Procedimiento para la fabricación de las secciones:.....	79
3.1.3.1.	Armado de los cofres.....	79

AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

3.1.3.2.	Confección de la armadura.....	79
3.1.1.3.	Mortero:.....	81
3.1.4.	Diseño de mortero:.....	86
3.1.4.1.	Resistencia Requerida.....	86
3.1.4.2.	Aditivo y Asentamiento.....	86
3.1.4.3.	Datos del Árido.....	86
3.1.4.4.	ENSAYOS A LA COMPRESION DEL MORTERO.....	89
3.1.4.5.	Fundición de secciones tipo C:.....	92
3.1.4.6.	Desencofrado:.....	94
CAPITULO 4	.....	95
4.1.	ANALISIS DE RESULTADOS.....	95
4.1.1.	ENSAYOS A COMPRESION:.....	95
4.1.2.	ENSAYOS A FLEXION:.....	96
CAPITULO 5	.....	97
5.1.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	97
BIBLIOGRAFÍA:	.....	99
ANEXOS	.....	100



CAPITULO 1

1.1. INTRODUCCION.

Desde que el hombre apareció en la tierra –como cazador y recolector– hasta nuestros tiempos, ha buscado y construido un refugio para vivir y la naturaleza se lo ha proporcionado, pero a la vez ella misma, de forma aleatoria, se lo ha arrebatado. De ese aprendizaje, que aún no acaba, surge la creación que lo lleva a edificar todo tipo de refugios proyectados hacia el sol. La vivienda se convierte entonces en una necesidad básica del hombre.

Explorar, ver, oler y reventar pedazos de naturaleza, quizá fueron los primeros ensayos en la historia. Mezclar tierra y agua, cohesionar, endurecer, dar forma geométrica y quebrar materiales diversos, ha sido un juego didáctico habitacional, aunque una de las mejores enseñanzas son el legado natural de los sismos en las zonas donde este fenómeno tiene cortos periodos de retorno.

Los países en desarrollo (Ecuador, uno de ellos), presentan una mayor demanda de obras civiles en la mayor parte de su territorio que no se han llevado a cabo por distintos motivos, ya sean estos siendo el más importante el económico debido al alto costo de los materiales. Además, no abundan los estudios e investigaciones que busquen soluciones idóneas, con materiales autóctonos de bajo costo, con tecnologías sostenibles y buendesempeño estructural.

Hoy en día en el sector de construcción del país el material que tienen mayor demanda es el hormigón armado, debido a que es resistente, durable, de facilidad constructiva, pero con el aumento de los costos de los componentes que conforman este material la construcción informal se ve afectada, por lo que se encontrar otro material que cuente con características semejantes a las del hormigón armado pero a la vez económico.

El ferrocemento es un material que se asemeja al hormigón armado y es económico a la vez, además de contar con otras características que lo hace un material óptimo para la construcción ya que el lugar de barras de acero, utiliza mallas de acero, que le proporcionan más flexibilidad sin perder resistencia. El estudio que aquí se expone comprende el comportamiento de estructuras de ferrocemento utilizando distintas mallas y comparándolas para ver su eficiencia.



1.2. OBJETIVOS:

1.2.1. Objetivo General

Evaluar la resistencia y el comportamiento de elementos en ferrocemento y realizar un acercamiento a la valoración de la efectividad de los materiales locales.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar una investigación bibliográfica acerca de los usos del material ferrocemento
- Diseñar y desarrollar una campaña experimental sobre elementos y módulos prefabricados de ferrocemento y ensayarlos bajo cargas que emulen cargas que se darían en la realidad.
- Identificar a partir de la experimentación la efectividad y la idoneidad de los materiales locales utilizados en las estructuras de ferrocemento.
- Aplicar e implementar una metodología que, en términos probabilísticos permita un análisis de estructuras de ferrocemento ensayadas.

1.3. JUSTIFICACION

El presente tema tiene como finalidad dar a conocer las características mecánicas que tienen los elementos tipo C fabricados en ferrocemento, para ser utilizados en la construcción de obras civiles.

El ferrocemento consiste en un mortero muy rico en cemento de poco espesor, en la que el número de mallas de alambre de acero de pequeño diámetro están distribuidas uniformemente a través de la sección transversal, consiguiéndose de esta manera un comportamiento notablemente mejorado con relación al hormigón armado cuya resistencia está dada por la forma de las piezas.

Se utilizará una resistencia a compresión del mortero en el orden de los 350 kg/cm^2 , la resistencia a la fluencia de la malla es de 2500 kg/cm^2 , y

Para el diseño se empleará lo estipulado en "Requisitos de Reglamento y Comentario del Comité ACI-318 S-05", "Guía para el Diseño,

AUTORES: Bruno Guzmán D.

Israel Salcedo A.



Construcción y Reparación del Ferrocemento”, y “Estado del Arte Publicado por el ACI”.

Los elementos estarán diseñados a cumplir con la rigidez adecuada y atender deflexiones verticales del elemento, sin fallar y sin exceder los límites especificados en las normas vigentes.

Una vez diseñados y fabricados los elementos tipo C en ferrocemento se procederá a ensayarlos a flexión, compresión y tracción, además se medirán las deformaciones que se producirán. Cabe indicar que el ferrocemento presenta una resistencia muy buena a la tracción manteniéndose en el rango elástico hasta su fisuración, la presencia de mallas no modifica la resistencia a compresión del mortero que forma la matriz.

Con los resultados de laboratorio se podrá dar un criterio para determinar la posición de mejor comportamiento mecánico que sea la de mayor ventaja para el diseño de dichos elementos.

1.4. ALCANCE

Este estudio tiene como alcance diseñar, ensayar y evaluar el comportamiento de elementos de ferrocemento construido con materiales de la región ante esfuerzos como los de tracción, compresión y flexión, de esta forma contribuir con los estudiantes, constructores y profesionales de la ingeniería civil y arquitectura en la utilización de ferrocemento.

CAPITULO 2

2.1. DEFINICIONES GENERALES

El ferrocemento es un material con más de un siglo y medio de antigüedad y durante este tiempo ha tenido diferentes aplicaciones que van desde pequeñas embarcaciones hasta grandes estructuras. A continuación se presenta una descripción del ferrocemento, una breve comparación con el hormigón armado, su antecedente histórico y la construcción con ferrocemento.

2.1.1. Descripción del Ferrocemento:

El ferrocemento es un tipo de hormigón armado de pared delgada, habitualmente construido con mortero de cemento y reforzado con capas de malla de alambre continuas, de pequeño calibre y ocasionalmente barras de acero de armazón. La malla puede ser hecha de metal u otro material conveniente. La manejabilidad del mortero y su composición debe ser

AUTORES: Bruno Guzmán D.

Israel Salcedo A.

compatible con los tejidos de malla y las varillas de armazón, para permitir su colocación. El mortero puede contener fibras discontinuas.

El ferrocemento se caracteriza y se diferencia de los demás hormigones, por la distribución y tamaño relativo de su refuerzo: mallas de alambre de diámetros pequeños y fibras uniformemente distribuidas en toda la sección transversal del elemento. Una vez endurecido, el ferrocemento presenta propiedades químicas, físicas y mecánicas consistentes con un material de acción compuesta. Esta constitución lo hace propicio para la fabricación de elementos de pared delgada, no mayores de 50 mm. En la figura 1, se muestra un elemento típico de ferrocemento, fabricado mediante un adecuado diseño para obtener proporciones óptimas de los materiales, incluyendo la cantidad de refuerzo requerido, y un mezclado uniforme de la matriz cementante.

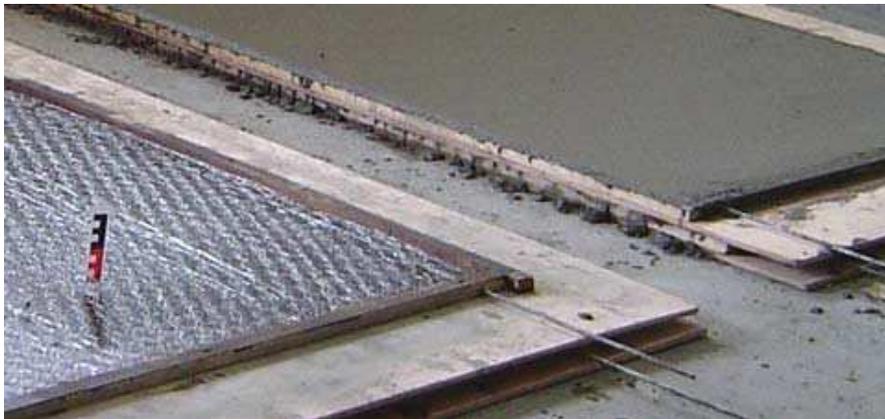


Figura 1. Sección típica de ferrocemento.

A pesar de que el mortero representa, en la mayoría de los casos, más del 90 % del volumen del compuesto, éste tiene un comportamiento dúctil, más parecido al del acero que al del hormigón. El ferrocemento ha sido considerado el primer tipo de hormigón armado y un miembro general de la familia de los materiales estructurales de hormigón. En la figura 2, se ilustra la familia del hormigón estructural y sus combinaciones.

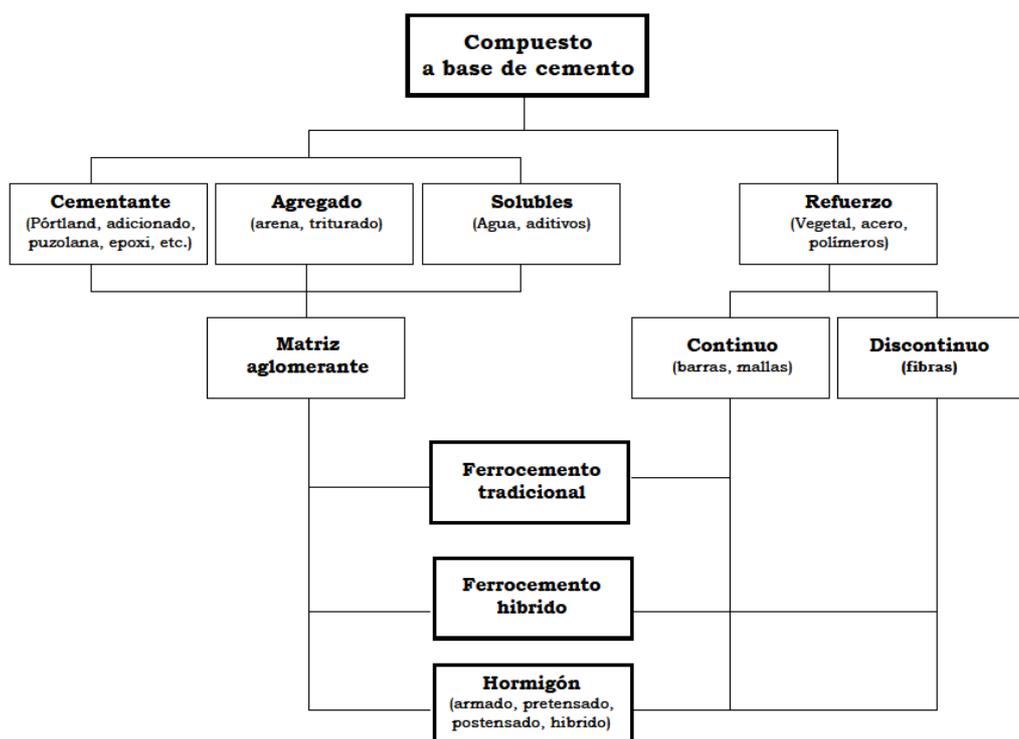


Figura 2. Familia del hormigón estructural y sus distintas combinaciones.

2.1.2. Ferrocemento y Hormigón Armado

El ferrocemento, como miembro de la familia del hormigón armado, posee más similitudes que diferencias. Para comprender mejor su comportamiento y la metodología de análisis y diseño, a continuación se presenta una nueva visión del ferrocemento y se hace una revisión de las diferencias y similitudes más relevantes con el hormigón armado.

2.1.2.1. El ferrocemento como un material compuesto laminado

Un material compuesto es aquel que está hecho a partir de dos componentes diferentes. Una vez estos dos componentes interactúan resulta un material compuesto con propiedades mejoradas y de gran interés estructural. Las propiedades obtenidas son diferentes a las ofrecidas por cada material si actuara de forma independiente. Por ejemplo, el mortero para cargas a tracción es pobre y las mallas de alambre expuestas a la intemperie se corroen.

Combinando el mortero y las mallas en un ferrocemento, se obtiene capacidad de carga a tracción y protección al refuerzo. El ferrocemento puede ser considerado como un material compuesto laminado, hecho de capas de malla, embebidas en capas de mortero de cemento, una encima de otra. Una lámina, generalmente tiene propiedades ortótropas, es decir las propiedades mecánicas son diferentes en las tres direcciones principales. Si



la lámina se refuerza con malla cuadrada se obtiene un material de iguales propiedades en dos direcciones principales.

Cuando el refuerzo proporcionado no es simétrico, como sucede con la malla hexagonal, expandida o rectangular, pueden colocarse una encima de otra o rotarlas, hasta obtener una distribución uniforme de los alambres de refuerzo en dos direcciones. Un compuesto con propiedades isotrópicas en el plano y conjunto de capas de refuerzo amontonadas y orientadas uniformemente en toda su sección, está cerca de ser un material isotrópico. Generalmente el ferrocemento, hecho con mallas rectangulares es asumido isotrópico, en las dos direcciones principales de la malla. Sin embargo, cuando se diseña ferrocemento no es necesaria la isotropía, a menos que las condiciones lo requieran.

2.1.2.2. Diferencias físicas y mecánicas con el hormigón armado

- El ferrocemento es un material de pared delgada, el concreto posee grandes espesores.
- El componente dúctil está distribuido a través de toda la sección de ferrocemento; en el hormigón son barras, generalmente longitudinales y transversales de diámetro considerable.
- La matriz de aglutinante del ferrocemento está hecha a partir de agregados finos (sólo arenas); en el hormigón existen agregados finos y gruesa (arena más grava).
- El ferrocemento posee propiedades de un material homogéneo e isotrópico en dos direcciones.
- El ferrocemento tiene alta resistencia a la tracción y alto módulo de rotura. Su resistencia a tracción puede llegar a ser similar a la resistencia a compresión. En el hormigón la resistencia a tracción es muy baja.
- Generalmente el ferrocemento presenta una alta superficie específica de refuerzo, del orden de uno a dos con respecto al hormigón reforzado.
- Por el contenido y distribución del refuerzo, el ferrocemento presenta un proceso de agrietamiento a tracción, diferente al del hormigón reforzado.
- En el ferrocemento la deformación generada por falla a tracción, se incrementa con el número de capas de malla. Es decir, la ductilidad aumenta con el incremento de la superficie específica de refuerzo. Tal comportamiento es diferente en el hormigón reforzado a



flexión, donde generalmente se ha observado que la ductilidad baja con el incremento de la relación de refuerzo.

- El ferrocemento presenta pequeños anchos de grietas y alta deformabilidad, lo que lo hace ideal para aplicaciones marinas debido a los pequeños espesores el ferrocemento posee menor resistencia al fuego que el hormigón reforzado.
- Debido al sistema de malla que proporciona refuerzo en las dos direcciones, el ferrocemento presenta mejor resistencia al impacto y ala cortante de punzonamiento, que el hormigón reforzado.
- Los métodos de construcción del ferrocemento son diferentes de los métodos del hormigón reforzado.
- El ferrocemento es más adaptable a bajos niveles de tecnología, mientras el hormigón reforzado necesita un mínimo de tecnología y equipo liviano. El ferrocemento se adapta fácilmente a altos niveles de tecnología, como el hormigón armado.
- En la construcción con ferrocemento se puede tener altos niveles de industrialización con menores costos en equipos. El hormigón armado incrementa la inversión.
- El ferrocemento es más fácil de reparar y mantener. En aplicaciones marinas, el ferrocemento, está por encima del hormigón reforzado.

2.1.2.3. Similitudes entre el ferrocemento y el hormigón armado

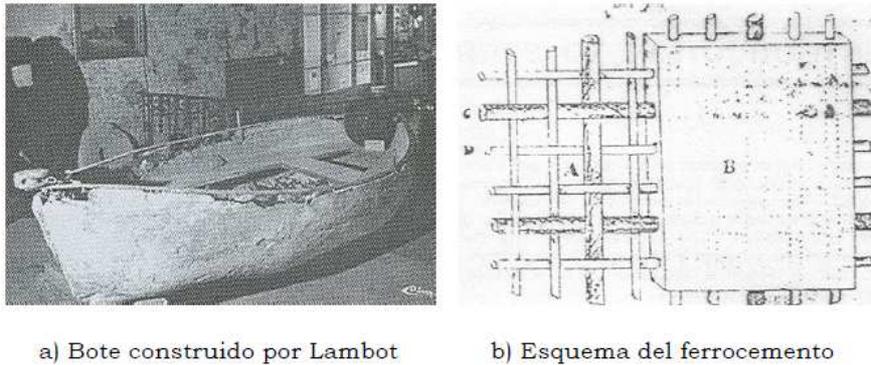
Las similitudes entre ferrocemento y el hormigón reforzado son numerosas.

Ambos materiales utilizan en común una matriz aglutinante y un volumen de refuerzo; obedecen a los mismos principios mecánicos y pueden ser modelados de acuerdo con las mismas teorías y analizados utilizando las mismas técnicas.

Además pueden ser diseñados con la misma filosofía.

2.1.3. Antecedente histórico y actualidad

Aunque hay plena evidencia que el uso de morteros reforzados con fibras se remonta a los tiempos del imperio Romano, e, inclusive, a los tiempos de los Sumerios [Pama, 1992], Joseph Louis Lambot produjo a finales del siglo XIX los primeros objetos construidos con mortero reforzado con malla de alambre en Miraval, en el sur de Francia.



a) Bote construido por Lambot

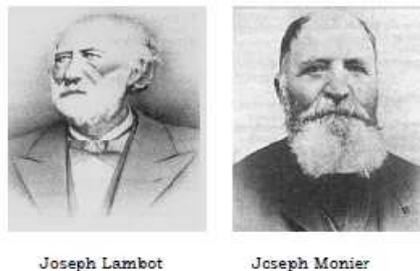
b) Esquema del ferrocemento

Figura 3. Bote construido por Joseph L. Lambot y esquema del material en la patente. [Naaman, 2000]

Entre 1848 y 1849, construyó dos botes con más de 3 m de longitud, 1.30 m de ancho y 38 mm de espesor. En la actualidad las dos embarcaciones se conservan en el museo de Brignoles, Francia. En la Figura 3 a, se observa una de estas embarcaciones.

Lambot concibe el ferrocemento como un material de construcción para ser usado como sustituto de la madera en construcciones navales, arquitectónicas y para uso doméstico, que no está sujeto a daños por agua y humedad. El material tiene una base de malla metálica de alambre o varilla entrelazada, formando un tejido flexible, adaptable al tamaño y forma geométrica deseada del objeto que se quiere construir; este tejido se rellena con una mezcla cementante, generalmente de cemento hidráulico (ver figura 3 b). El ferrocemento se considera como la primera aplicación y muy original del hormigón armado. En 1852 Joseph Luís Lambot patenta el material con el nombre de *ferciment*.

A principios de 1849, otro francés, Joseph Monier, realiza objetos para uso en la horticultura, independientemente de Lambot. Fabricó maceteros y cubos para jardinería con cemento y varillas de hierro. Monier, patenta este material en julio de 1867. En la figura 4, se aprecia a Lambot y a Monier, considerados los pioneros del ferrocemento y el hormigón armado.



Joseph Lambot

Joseph Monier

Figura 4. Joseph L. Lambot y Joseph Monier, pioneros del ferrocemento. [Naaman, 2000]

La tecnología de la segunda mitad del siglo XIX, no proporcionó un desarrollo eficiente en la producción de mallas y alambres de diámetro pequeño. El uso y la producción de varillas de acero con diámetros grandes, fue incrementando, llevando el ferrocemento a la construcción con hormigón armado. Durante la primera guerra mundial se construyeron buques y barcos con hormigón armado, y estos fueron usados de nuevo en la segunda guerra mundial, debido a la escasez de materiales, particularmente del acero. El ferrocemento fue olvidado y reemplazado por el hormigón armado y pre-esforzado.

Sin embargo, a principios de los años cuarenta, el arquitecto, ingeniero y constructor italiano Pier Luigi Nervi, retoma las ideas de Lambot realizando estudios sobre hormigones reforzados con capas de malla de alambre. Se asombra de los resultados de sus estudios en donde anota que el material obtenido tiene un "comportamiento similar al de un material homogéneo de elevadas resistencias" [Pama, 1992]. En sus investigaciones, Nervi encuentra un material altamente flexible, elástico y resistente a la tracción. Variando diámetros y capas de refuerzo, obtuvo espesores con cualidades importantes como gran deformabilidad y baja formación y propagación de grietas. Pier L. Nervi, procede a diseñar y construir diferentes proyectos arquitectónicos en ferrocemento, considerados racionales y estéticos dentro del diseño estructural. En la figura 5, se muestra la cubierta del salón principal del palacio de exposiciones de Turín, Italia. Fue construida entre 1948 y 1950, posee una luz de 96 metros y es la mayor de sus obras en estructuras con tejados.



*Figura 5. Techumbre del palacio de exposiciones de Turín.
[www.greatbuilding.com]*

El trabajo de Nervi, tan solo fue apreciado dos décadas después. La durabilidad y el buen estado en servicio de estas estructuras, permitieron una amplia difusión y aceptación del ferrocemento en el mundo.

Las aplicaciones constructivas del ferrocemento son extensas y variadas: Bóvedas delgadas en Rusia; aplicaciones arquitectónicas en Estados Unidos, viviendas en la India, suroeste Asiático, Cuba y México; botes pesqueros en China, Nueva Zelanda; techos, tanques y silos para granos en Argentina, África y Tailandia, entre muchos otros. Durante las últimas dos décadas del

AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.



siglo XX, varios países de América lo adoptaron para construcciones no convencionales. Arquitectos brasileños han desarrollado prefabricados de ferrocemento para urbanizaciones y escuelas, Cuba se especializó en la construcción de botes pesqueros, en México se han construido varios programas piloto con este material especialmente en casas de bajo costo, escuelas rurales y reparación de edificaciones hechas con mampostería no reforzada. 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 [Fabiarz, 1985; Bedoya, 1997; 2004].

En Ecuador se construyó por primera vez un tanque circular de ferrocemento para almacenamiento de agua en el año 1986, con una capacidad de 50 m³, obteniéndose como resultado en esta primera experiencia que su implementación producía considerables ahorros tanto en costos como en tiempos de construcción. Luego en 1991 se construyó un tanque de 100 m³ para el sistema de agua potable de la comunidad de Palugo en Quito, combinando mampostería de ladrillo, columnas de hormigón armado y ferrocemento como recubrimiento interior de la pared del tanque de reserva. Actualmente se han elaborado diseños para tanques de 5 a 500 m³ de capacidad.

Varias organizaciones a nivel mundial han realizado seminarios y reuniones con expertos y estudiosos del ferrocemento para analizar datos, experiencias, métodos de construcción, dimensiones, costos, nuevas aplicaciones y revisión del estado actual de la tecnología de construcción con ferrocemento y del material en sí. En los albores de 1960, se crea en Nueva Zelanda el Journal of Ferrocement, para trasladarse más tarde al Centro internacional de información sobre ferrocemento (IFIC), en Bangkok, Tailandia, donde aún reside. El American Concrete Institute (ACI), en 1975, estableció el comité 549 sobre ferrocemento para hacer una extracción y revisión de los documentos, y así elaborar un reglamento práctico para este material, mientras que en 1979, la Unión Internacional de Laboratorios de Pruebas e Investigación de Materiales y Estructuras (RILEM), estableció en Europa el comité 48-FC para examinar métodos de prueba para el ferrocemento.

En la última década, en Italia, se desarrolló un sitio virtual que ofrece información acerca del material, orígenes, usos, aplicaciones, formas constructivas, investigaciones, contacto con investigadores y constructores del ferrocemento [<http://www.ferrocement.com>].

Finalmente, en la sexta Conferencia Internacional sobre ferrocemento, en Estados Unidos, se presentó el modelo del código de diseño con ferrocemento que una vez terminado, se espera que contenga toda la información necesaria y suficiente para diseñar estructuras de ferrocemento [Nassif, 1998].

2.1.4. Construcción con ferrocemento

AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.

El ferrocemento como tal, o como un tipo de hormigón armado de pared delgada o como un compuesto laminado a base de cemento puede ser usado en numerosas aplicaciones, incluyendo nuevas estructuras y la reparación y rehabilitación de estructuras existentes. También, como material para la construcción de vivienda de bajo costo.

2.1.4.1. Embarcaciones

Los albores de la prefabricación con ferrocemento pueden remontarse a la antigüedad, cuando los sumerios utilizaron morteros de brea y refuerzos vegetales para construir materos. Sin embargo, la aparición de prefabricados modernos con este material tiene lugar en Asia, en aplicaciones fluviales.

Desde entonces se han fabricado toda clase de canoas y embarcaciones, desde pequeñas bateas circulares para una persona hasta barcos comerciales y aplicaciones especiales. La técnica de construcción con ferrocemento es idónea para aplicarla en los astilleros. El casco se preforma fácilmente utilizando refuerzo convencional alrededor del cual se colocan las mallas de alambre metálico. El mortero se aplica fácilmente por ambos lados del refuerzo. La industrialización de este proceso de prefabricado de cascos incluye en algunas partes el lanzamiento del mortero con bombas de inyección de alta presión. El resultado de este proceso puede verse en diversas partes del mundo en todo tipo de embarcaciones, como las que se muestran en la Figura 6.



a) Barco de transporte en la República China

b) Barco de transporte en Nueva Zelanda



c) Réplica de galeón Británico de 1767 construida en 1997 en Boston, E.U.

Figura 6. Barcos de ferrocemento. [Naaman, 2000]



Todavía hoy, existen muchos astilleros que producen navíos con ferrocemento.

Los procesos más industrializados se encuentran en China y en Cuba. En la India y en Tailandia se construyen todavía canoas y pequeñas embarcaciones con ferrocemento, por medio de procesos artesanales.

Los cascos flotantes de ferrocemento representan un reto para la ingeniería del ferrocemento en términos de durabilidad. El cambio continuo de niveles de flotación implica ciclos de mojado y secado. La alta humedad, la presencia potencial de cloruros y sulfatos; en fin, todas las consecuencias de los ambientes fluvial y marino conllevan el riesgo de la corrosión de los componentes del ferrocemento, tanto la pasta de cemento, como los áridos y el refuerzo. Sin embargo, la baja relación agua - cemento necesaria en las mezclas para ferrocemento resulta generalmente en morteros densos y resistentes. El uso de aditivos y la adición de puzolanas como cenizas volantes son frecuentes en la construcción con ferrocemento y le dan mayor durabilidad al material.

2.1.4.2. Tanques y Techumbres

De la impermeabilidad del ferrocemento y de sus características aptas para la construcción de elementos de pared delgada se deriva de manera natural, no solamente la construcción de cascos flotantes, sino también la de estructuras para contener líquidos y gases y estructuras para almacenar granos. En la Figura 7, se muestra un tanque típico en ferrocemento para el almacenamiento de agua.



Figura 7. Tanques de ferrocemento en Ecuador. [www.ferrocement.com]

A pesar de que el ferrocemento tiene aproximadamente la misma densidad del hormigón por unidad de volumen, las estructuras de pared delgada

ofrecen menor volumen total, y por ende menor peso, que los elementos de hormigón reforzado convencional. Combinando el bajo peso con la impermeabilidad, el siguiente renglón de aplicación cronológica del ferrocemento aparece en el ramo de la construcción de cubiertas y domos de diversa índole.

Desde modestos techos para quioscos, hasta enormes cubiertas para estadios y coliseos se han construido con ferrocemento. A mediados del siglo pasado, Pier Luigi Nervi, diseñó y construyó impresionantes cubiertas utilizando ferrocemento.

En Moscú, Rusia, varias estaciones del sistema de tren subterráneo utilizan ferrocemento en sus bóvedas y en Estados Unidos se han construido con ferrocemento elementos de cubierta decorativos, no estructurales, como celosías para proteger de la luz directa del sol. El ferrocemento se presta también para la construcción de tejas de sección delgada. Son comunes las tejas onduladas o en placa plegada, como las que muestra la Figura 8.



*Figura 8. Cubierta de placa plegada en ferrocemento.
Escuela Esmeraldas - Ecuador*

2.1.4.3. Edificios y Estructuras

Curiosamente, en 1852, año en que fue patentado el ferrocemento, nace el arquitecto Catalán, Antonio Gaudí. Creativo de formas y estructuras inspiradas en la naturaleza. Su ingenio agrietó el frágil paisaje de la ciudad mampuesta. Irrumpió con una arquitectura cargada de elementos místicos y casi panteísta con la naturaleza. La atracción por lo monumental y el amor simultáneo por lo humilde, proyectaron la arquitectura Barcelonesa al mundo. Cuando empieza sus primeras obras busca materiales que le permitan moldear sus edificaciones. Gaudí, retoma el ferrocemento y deja ver sus bondades como material de construcción en una arquitectura moderna.

En la figura 9, se aprecia una de sus colosales y paradigmáticas obras: la Sagrada Familia.



Figura 9. Templo de la Sagrada Familia, Barcelona-España. [Bedoya, 2004]

Posteriormente, una nueva generación de arquitectos e ingenieros ha descubierto los beneficios, versatilidad y características únicas del ferrocemento en aplicaciones especiales. En la Figura 10, se muestra el interesante trabajo realizado para una planta productora de cemento en Arabia Saudita, donde se utilizó el ferrocemento para construir la cubierta ondulada que se convierte en el recubrimiento que envuelve la torre de entrada, así como también para prefabricar las pantallas celosía para la protección solar de la fachada del edificio principal.



Figura 10. Planta productora de cemento Yambu, en Arabia Saudita.

[Naaman, 2000].

El material y la creatividad de los diseñadores, han permitido la construcción de obras similares en Nueva Zelanda, Australia, China, Singapur, México, Bolivia y Brasil. En los últimos años, Estados Unidos y Australia, ha construido casas de descanso y veraneo con ferrocemento.

En la figura 11 se presenta un ejemplo de estas viviendas, en la que tanto la cubierta como el sistema estructural fueron hechos de ferrocemento.



Figura 11. Casa de descanso en Australia. [Steve's, 2004]

Durante los últimos veinte años se han propuesto muchos otros sistemas constructivos con base en elementos de ferrocemento. Se han ensayado perfiles estructurales moldeados con ferrocemento, actuando solos o como formaletas permanentes. En China 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 contra otros materiales.

2.1.4.4. Viviendas de bajo costo

En países del tercer mundo donde la demanda de vivienda de bajo costo es muy alta, el ferrocemento se ha utilizado como una alternativa eficaz que, por una parte, ofrece viviendas durables y de buena calidad, y, por otra parte, ofrece un sistema constructivo con base en mano de obra intensiva no calificada. Esta combinación hace del ferrocemento una solución apropiada para sociedades en vías de desarrollo que requieren de soluciones de vivienda de bajo costo y generación de empleo.

Como edificaciones para diversas actividades humanas, el ferrocemento ha estado presente en construcciones tales como: edificios de auditorio, museos, cúpulas de mezquitas, estructuras de domos, centros comunitarios, escuelas, elementos prefabricados para casas tipo panel o tipo "sandwich" y viviendas de bajo costo.

De las diferentes aplicaciones que ha tenido el ferrocemento en la generación de viviendas de bajo costo, se han identificado cuatro sistemas constructivos para su fabricación: construcción en sitio, construcción con elementos modulares prefabricados, construcción con paneles prefabricados y construcción de casas móviles. Dado el bajo nivel de tecnología requerido, cualquier edificación con ferrocemento puede ser construida en el lugar requerido. En la construcción con elementos prefabricados y la producción de casas móviles resulta apropiado suministrar cierto nivel de tecnología.

Todos estos sistemas constructivos tienen un elemento estructural en común: el panel o muro pared delgada de ferrocemento. En el archipiélago de Malasia, en las islas de Sumatra, Sri Lanka y Nueva Guinea, se han construido casas en ferrocemento. Países como México, India, Tailandia,



Cuba, Estados Unidos, Brasil y Colombia, son pioneros en el uso del ferrocemento para construir viviendas de bajo costo.

A mediados de los años 1970, Olvera López (1998), construyó casas de ferrocemento en México. Desarrolló un sistema constructivo para edificaciones de uno y dos pisos usando paneles livianos prefabricados de ferrocemento de diferentes secciones y experimentó 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 (ver Figura 12).



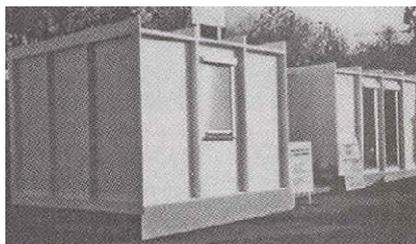
*Figura 12. Primera edificación construida en México con ferrocemento.
[Naaman, 2000]*

En 1979, también en México y utilizando paneles de ferrocemento prefabricados, J. Castro [Castro, 1979], construyó 350 viviendas de bajo costo. Los paneles fueron elaborados con barras de acero tradicional de 6 milímetros formando una rejilla con aberturas cuadradas de 250 milímetros de lado. Esta rejilla fue envuelta con dos capas de malla hexagonal.

Los paneles fueron unidos por medio de tornillos y tuercas. El comportamiento de las conexiones no ha sido monitoreado durante la actividad sísmica de México, ni existen estudios del comportamiento a largo plazo de estas edificaciones.

En la India, en el año 1983, V. G., Gokhale, publicó el sistema para la construcción de casas denominado "Catone" [Gokhale, 1983]. El sistema consiste en paneles de ferrocemento anclados a la losa de cimentación y atornillados en la parte superior a la viga de cubierta. Cada panel tiene 0.91 m de largo por 2.73 m de alto y 0.032 m de espesor. El sistema fue usado para la construcción de varias viviendas de uno y dos pisos en Bombay.

Sin embargo no se tiene información acerca del comportamiento estructural de estas viviendas, bajo condiciones de servicio ni a largo plazo. En el Segundo Simposio Internacional sobre ferrocemento, Bangkok, 1985, F. Davis, presentó el sistema constructivo para vivienda de bajo costo, que se ve en la Figura 13.



*Figura 13. Salones modulares típicos para viviendas de ferrocemento.
[Naaman, 2000]*

El sistema consiste en paneles prefabricados de ferrocemento, en forma de U y Cajón y otro número de formas que pueden ser utilizadas para ventanas, canales de agua, etc. Cada panel fue fabricado con procedimientos de alta calidad.

En 1988, Wainshtok Rivas [Wainshtok, 1988], describe las primeras casas de ferrocemento hechas en Cuba en el año de 1986. Fueron construidas con paneles prefabricados de ferrocemento reforzados con malla entretejida de alambre. En la Figura 14, se muestra la solución de viviendas de uno y dos pisos. La cubierta se hizo con secciones de ferrocemento tipo cajón [Wainshtok, 1994, 1996].



Figura 14. Viviendas de uno y dos pisos en ferrocemento. [Naaman, 2000]

Desde entonces se construye en Cuba numerosas casas de uno, dos y tres pisos con elementos prefabricados de ferrocemento tipo panel. En la figura 15, se observan soluciones de vivienda de dos pisos.



Figura 15. Casas de uno y dos pisos con ferrocemento, Cuba. [Naaman, 2000]



En 1992, el Profesor Naaman [Naaman, 1992], publica el resultado de sus investigaciones realizadas en la Universidad de Michigan, Estados Unidos, sobre casas de ferrocemento. Los objetivos del estudio fueron explorar las ventajas del ferrocemento desde la industrialización, teniendo en cuenta las características ofrecidas por este material, tales como: resistencia, poco peso, resistencia al fuego, durabilidad, ductilidad para zonas sísmicas, fácil transporte, erección y altos niveles de adaptabilidad en la prefabricación. El sistema estudiado consta de dos niveles y está conformado por paneles de ferrocemento en forma de cajón de 12.5 mm de espesor y unidos por una conexión atornillada. La investigación mostró que el sistema de ferrocemento propuesto es técnicamente factible e indicado para ser industrializado con costos competitivos. Sin embargo, se detectó que para que el sistema tenga éxito se debe resolver el problema de las conexiones entre los paneles de ferrocemento. Krishnamoorthy [Krishnamoorthy et al, 1990; Mansur et al, 2001], identificaron experimentalmente, cuatro modos de fallo predominantes en las conexiones atornilladas de los paneles prefabricados de ferrocemento.

Hasta el momento, no se conocen aplicaciones masivas para viviendas de bajo costo, con este sistema investigado. En 1998, Machado et al., en el Sexto Simposio Internacional sobre Ferrocemento, en la Universidad de Michigan, presentó las investigaciones realizadas en Brasil, en muros de ferrocemento tipo “sandwich”, como elementos estructurales de las viviendas de bajo costo.

Sin embargo, desde los 80, el arquitecto, J. Filgueiras [Salas, 1990], construyó escuelas con argamasa armada (origen del ferrocemento). Con esta aplicación impulsó el uso del ferrocemento en soluciones de vivienda de bajo costo. Hoy, y después de varias investigaciones, el gobierno de Brasil lo ha adoptado como estrategia para solucionar el déficit de vivienda a mediana y gran escala. En el mismo Simposio, Barberio (1998), expuso los problemas y perspectivas del ferrocemento en Italia. Ambas investigaciones mostraron los esfuerzos llevados a cabo en estas comunidades para contribuir a la solución de vivienda de bajo costo.

2.2. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES

En este acápite se presenta una descripción de los componentes del ferrocemento, las propiedades físicas y mecánicas de la matriz aglutinante y el equilibrio de los componentes en el diseño de la mezcla. Por último, se enuncian algunos aspectos constructivos y tecnológicos referidos a la prefabricación del ferrocemento, como elemento estructural de pared delgada.

2.2.1. Componentes del ferrocemento

Inicialmente se ha definido el ferrocemento como un material hecho con mortero y reforzado con mallas de alambres y en ocasiones barras de acero.

AUTORES: Bruno Guzmán D.

Israel Salcedo A.

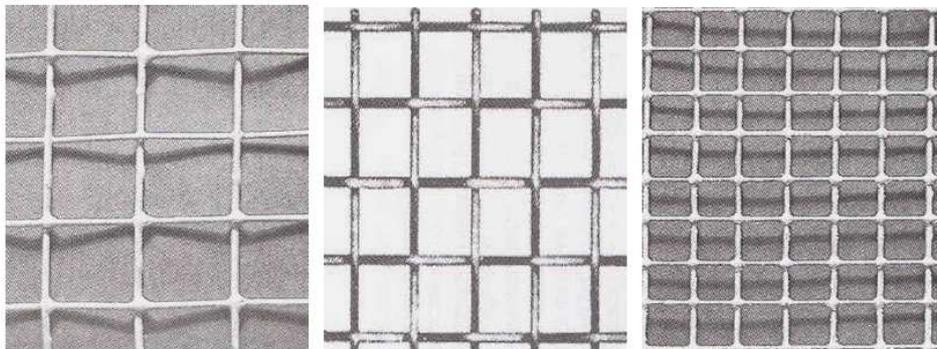
Con el desarrollo de la tecnología y con la finalidad de mejorar sus propiedades mecánicas, el mortero puede ser adicionado con aditivos y agentes inyectoros de aire. Sin embargo, para mejorar las propiedades del mortero y el desempeño del compuesto, también se puede adicionar fibras cortas discontinuas. Estas elevan la resistencia a cortante y disminuyen los procesos de agrietamiento. Para aumentar otras propiedades, tales como resistencia a tracción y flexión, las mallas plásticas o fibras poliméricas, combinadas con matrices densificadas con pequeñas partículas han resultado ser una buena alternativa.

2.2.1.1. Componente dúctil: El tejido de alambre y las fibras

a) Mallas de alambre

Uno de los componentes principales del ferrocemento es la malla de alambres delgados, ya sean entretejidos, soldados o troqueladas (mallas expandidas). El comportamiento mecánico del ferrocemento depende en gran parte del tipo, cantidad, orientación y propiedades de la resistencia de la malla y la varilla de refuerzo. Deben ser lo suficientemente flexibles para poderlas doblar. Como en el hormigón, la matriz cementante del ferrocemento es frágil. El entretejido metálico le proporciona ductilidad y su distribución es homogénea en toda la sección transversal.

Las mallas de acero más utilizadas en ferrocemento, son las mallas cuadradas, rectangulares tejidas o soldadas, las mallas de metal expandido y las mallas de forma hexagonal. La malla hexagonal, es la más usada por su economía y fácil manipulación. Sin embargo, estructuralmente no son muy eficientes debido a que los alambres no están orientados en la dirección principal de los esfuerzos. Se conoce como *malla de alambre de pollo o gallinero*, dependiendo del tamaño de sus aberturas y se fabrica con alambre estirado en frío. Todas, excepto la malla de metal expandido, deben ser, preferiblemente galvanizadas. En la figura 16, se ilustran varios tipos de mallas.



a) Ondulada soldada

b) Cuadrada tejida

c) Cuadrada soldada

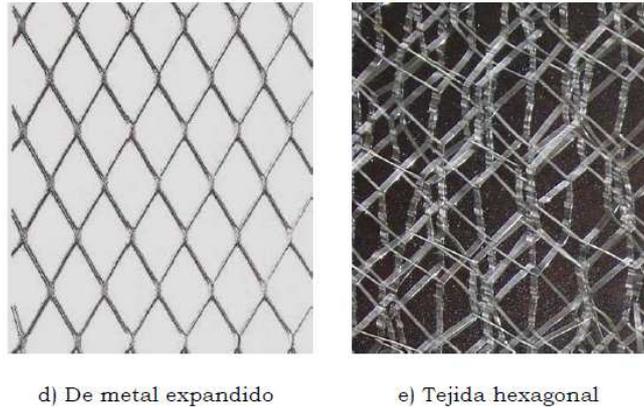


Figura 16. Mallas metálicas. [Naaman, 2000; Bedoya, 2004]

En los últimos años se han desarrollado mallas metálicas tridimensionales tejiendo hilos ondulados sinusoidalmente en una dirección, con hilos zigzagueantes en la dirección perpendicular. En la Figura 17, se ilustra este ejemplo.

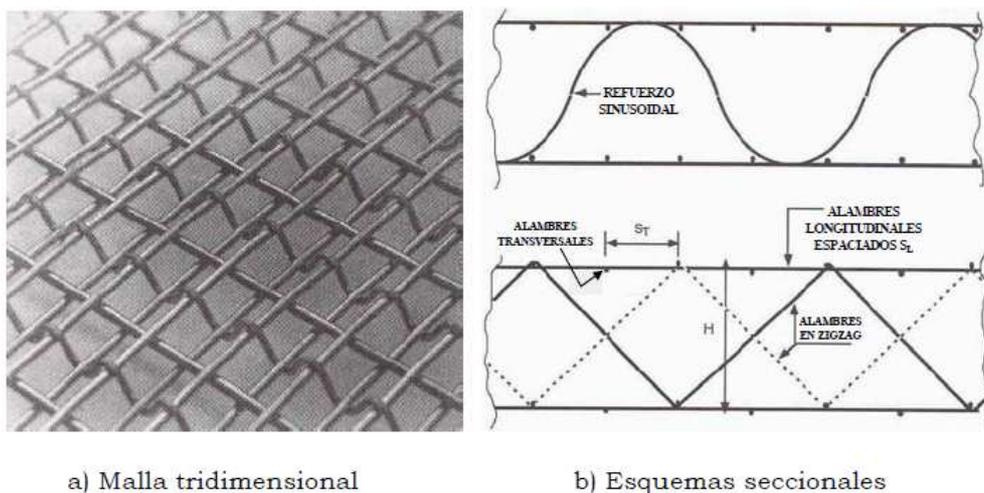


Figura 17. Malla tridimensional. [Naaman, 2000]

b) Mallas de hilo polimérico

Las mallas de acero han sido el refuerzo tradicional en la construcción con ferrocemento. Sin embargo, investigaciones sobre refuerzos con fibras poliméricas y mallas plásticas han generado nuevas posibilidades para el diseño y la construcción con ferrocemento [Guerrero, 1998; Naaman, 2000]. El desarrollo de materiales poliméricos ha resultado en una amplia oferta de alternativas al refuerzo metálico. Hoy en día se consiguen en el mercado internacional varios tipos de malla polimérica y plásticas. Algunos ejemplos se ilustran en las figuras 18.

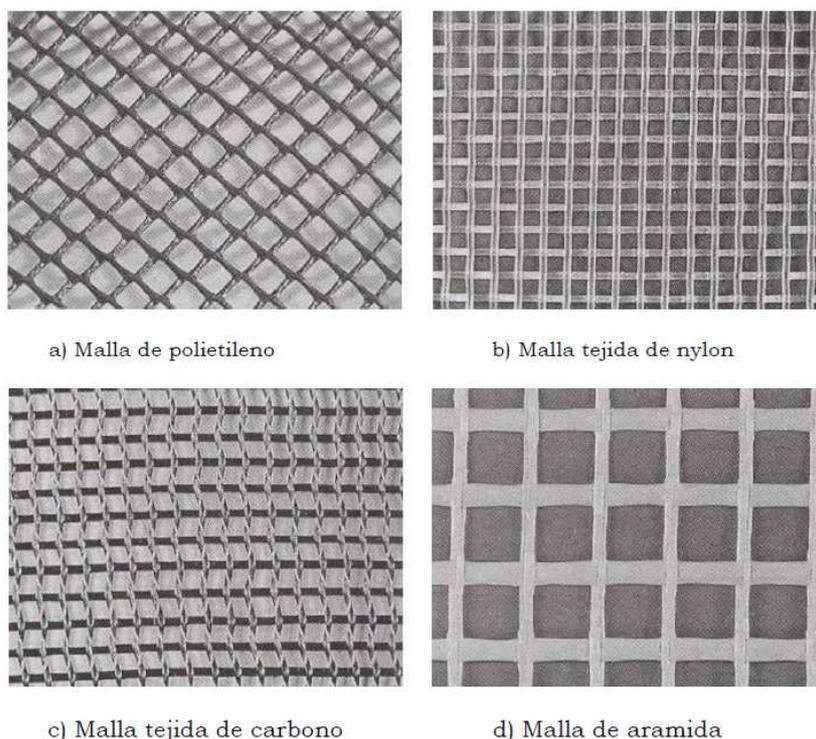


Figura 18. Mallas poliméricas y plásticas. [Naaman, 2000]

c) Fibras discontinuas y cortas: Metálicas y Poliméricas

Las fibras discontinuas están relacionadas con los compuestos híbridos. Un compuesto híbrido está hecho de diferentes materiales. En el área de los hormigones de pared delgada, un compuesto híbrido es la combinación de mallas continuas, tal como carbón o acero, con fibras discontinuas y cortas, bien sean plásticas, metálicas, orgánicas u otro material. Las fibras, generalmente son mezcladas con el mortero. Distribuidas aleatoriamente en el componente frágil, las fibras discontinuas mejoran la resistencia a tracción, a cortante interlaminar y disminuyen notoriamente los procesos de fisuración del ferrocemento. El diseño de una estructura de ferrocemento como un compuesto híbrido, mejora el desempeño del mismo [Naaman, 2000].

Acero de Armazón

A diferencia del hormigón convencional, el ferrocemento puede fabricarse sin encofrado. En tal caso, la función del refuerzo dentro del ferrocemento consiste en dar forma y sostener a las capas de malla y al mortero en estado fresco. Una vez endurecido el mortero, la función del refuerzo es la de absorber las tensiones de tracción sobre la estructura, que el mortero por sí sólo no podría soportar. En la Figura 19, se aprecia este tipo de refuerzo. En general, se usan varillas de acero dulce.



Figura 19. Acero de armazón para una estructura de ferrocemento.
[Bedoya, 2002]

En secciones delgadas planas o en cáscaras, este refuerzo convencional se localiza muy cerca del eje neutro por lo que su colaboración estructural para esfuerzos flectores no es significativa. Sin embargo, en secciones más complejas, las barras de refuerzo alejadas del eje neutro del elemento participan activamente en la respuesta estructural a la flexión [Pama, 1992; Naaman, 2000]. En la tabla 1, se presentan las características más generales acerca del sistema de refuerzo habitual en estructuras de ferrocemento.

Mallas de acero	Diámetro del alambre	$0,50 \leq d_w \leq 1,50 \text{ mm}$
	Tipo de malla	Malla de alambre galvanizada cuadrada, hexagonal o de metal expandido
	Tamaño de abertura	$0,50 \leq D \leq 1,50 \text{ in}$
	Número de capas de malla	6 capas por cm de espesor
	Fracción de volumen de refuerzo	Hasta 8% en ambas direcciones equivalente a 630 kg/m^3 por malla de acero de refuerzo
	Superficie específica de refuerzo	Hasta $4 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ en ambas direcciones
Acero esquelético	Tipo	Alambres, varillas, barras
	Diámetro	$3,0 \leq d_b \leq 10,0 \text{ mm}$
	Tamaño de la rejilla	$50,0 \leq d_b \leq 150,0 \text{ mm}$

Tabla 1. Características del refuerzo para ferrocemento. [ACI 543.R]

2.2.1.2. Componente frágil: Las matrices aglutinantes

La matriz aglomerante del ferrocemento consiste generalmente en un mortero hecho con cemento Portland, agregados finos, agua y, ocasionalmente, aditivos. Esta materia aglomerante comprende más del 95% del volumen del ferrocemento. La composición química del cemento, la



naturaleza de los agregados, la relación finos-cemento y la relación aguacemento, son los parámetros que determinan las propiedades del mortero [Bedoya, 1996; Naaman, 2000].

En la actualidad, las matrices inorgánicas y densificadas con pequeñas partículas se presentan como una nueva alternativa para producir, en combinación con mallas de alta resistencia, compuestos laminados de alto desempeño. Las aplicaciones han sido pocas en estructuras de ferrocemento, pero los resultados de las investigaciones han sido muy promisorios [Balaguru, 1998].

2.2.2. Propiedades físicas y mecánicas del mortero

2.2.2.1. Propiedades en estado fresco

a) Manejabilidad

Se define como la facilidad con la que un grupo dado de materiales puede mezclarse, luego manejarse, transportarse y colocarse de manera que no pierda su homogeneidad. La manejabilidad depende de las proporciones de cada uno de los materiales y está relacionada con el concepto de consistencia, y ésta, a su vez, con el estado de fluidez del mortero. Para determinar la manejabilidad, se acepta el ensayo de fluidez (ASTM C230 u otro equivalente); por medio del cual se califica que tan seca o fluida es la mezcla. En la Figura 20, se aprecia una prueba sobre una mezcla con fluidez aceptable [Bedoya, 1996]



Figura 20. Consistencia del mortero para ferrocemento. [Bedoya, 1996]

En la tabla 2, se presenta una propuesta para cuantificar la manejabilidad, en términos del porcentaje de flujo.



Consistencia	Flujo (%)	Condiciones de colocación	Sistemas de colocación
Seca	80 – 100	Secciones sujetas a vibración	Proyección neumática, con vibradores de formaleta.
Plástica	100 – 120	Sin vibración.	Manual con palas y palustres
Fluida	120 – 150	Sin vibración	Manual, bombeo, inyección

Tabla 2. Clasificación de la consistencia en morteros para ferrocemento.

b) Retención de agua

Es la capacidad que posee el mortero de mantener su plasticidad al contacto con una superficie absorbente. Para obtener morteros de buena plasticidad se puede aumentar los contenidos de finos, usar aditivos plastificantes, agentes incorporadores de aire, cemento puzolánicos o cal.

La velocidad de endurecimiento y la resistencia a compresión se afectan cuando la mezcla no tiene buena capacidad de retención de agua. El agua faltante impide el proceso de hidratación normal del cemento. Sin embargo, algunas adiciones o aditivos, como algunos materiales puzolánicos o como la cal, pueden afectar al nivel de resistencia a la compresión a edades tempranas o a la velocidad de fraguado.

c) Velocidad de endurecimiento

El tiempo de fraguado inicial y final en una mezcla debe estar dentro de un intervalo adecuado para permitir el uso del mortero fresco y el comienzo oportuno del proceso de ganancia de resistencia. Estos períodos de tiempo están en función de las condiciones ambientales y de la composición de la mezcla, y pueden ser controlados con adición de aditivos.

2.2.2.2. Propiedades en estado duro

a) Retracción

La retracción o pérdida de volumen de mortero se presenta cuando el agua libre en la mezcla fresca se evapora. La tasa de evaporación del agua, depende de las condiciones ambientales. En zonas con condiciones climáticas severas, temperaturas altas, corrientes fuertes de vientos, la tasa de evaporación puede ser muy importante. La pérdida de agua implica una disminución en el volumen del mortero. Si el elemento vaciado tiene restricciones para dicha disminución, pueden generarse tensiones internas suficientemente altas para desarrollar grietas. La retracción es inversamente proporcional al espesor del mortero y la calidad del cemento.

Como la retracción ocurre en la pasta de cemento, el agregado se constituye en un reductor de la retracción. En particular, las arenas bajas en finos y con



buen a granulometría, resultan con menores retracciones que arenas muy finas que requieren mayor cantidad de pasta. Las mezclas con relaciones agua - cemento altas o que poseen agua en exceso de la requerida para la hidratación del cemento están en peligro de agrietamiento.

b) Contracción y flujo bajo carga

La contracción es una medida de estabilidad volumétrica en donde influyen muchos factores climáticos, cantidad de refuerzo, curado etc. El ferrocemento, en este aspecto, es diferente al hormigón reforzado. De los ensayos hechos en secciones de ferrocemento se ha encontrado que el comportamiento de flujo plástico (fluencia a largo plazo), en una sección reforzada con malla de alambre galvanizado, presenta menor fluencia que la misma sección reforzada con malla de alambre sin galvanizar. El ferrocemento presenta niveles más bajos de contracción que el hormigón reforzado convencional, debido a sus pequeños espesores y a la distribución uniforme del refuerzo.

c) Adherencia

Es la capacidad del mortero para absorber las tensiones normales y tangenciales a la superficie de contacto entre el mortero y la armadura. La adherencia contribuye a la resistencia de la estructura ante sollicitaciones de pandeo, cargas transversales y excéntricas. Las mezclas para ferrocemento más adaptables y de mayor utilización son las mezclas plásticas, con buena capacidad de retención de agua.

d) Resistencia

Es la capacidad del mortero de resistir esfuerzos longitudinales (tracción o flexión) y transversales (cortante). En estructuras de ferrocemento se requiere buena resistencia a la compresión que se traduce en buena resistencia para esfuerzos de cortante y tracción. La resistencia a compresión la aporta principalmente el mortero; se mide por medio de cubos normalizados y es función del tamaño de los agregados, la cantidad de cemento y las proporciones entre éstos. Morteros hechos con un mismo agregado y un porcentaje mayor de cemento, por unidad de volumen, proporcionan mayor resistencia e impermeabilidad.

e) Fatiga

Cuando una estructura es sometida a la aplicación de cargas repetitivas en el tiempo, se fatiga. En diversas investigaciones se ha estudiado los efectos del uso de acero del armazón, el uso de la malla de refuerzo, los métodos de curado, y los tipos de cemento. Los resultados han mostrado que la fatiga del ferrocemento no es una función directa de las propiedades del mortero, si no del deterioro del refuerzo, y no sólo de la malla sino también del acero



del armazón. La malla sin galvanizar presenta mayor resistencia a la fatiga que la malla galvanizada. [Naaman, 2000].

f) Impacto

Algunos estudios han mostrado [Naaman, 2000; Abdullah et al. 2003], que la resistencia a compresión del mortero y las propiedades del refuerzo, incluyendo las del acero del armazón, influyen de una manera importante en el comportamiento y capacidad de los elementos del ferrocemento bajo cargas de corta duración.

g) Durabilidad

Una estructura de ferrocemento es durable cuando puede soportar, en las condiciones para la cual fue diseñada, con un grado satisfactorio (es decir, sin deterioro mayor al de la degradación normal con el envejecimiento, bajo un programa de mantenimiento estándar), los efectos de las cargas de servicio a las que se le sometan durante su vida útil, además de fenómenos climatológicos, desgaste, contracción, eflorescencias, corrosión, ataques químicos, entre otros. En general, la durabilidad es función de las propiedades del mortero que, a su vez, depende indirectamente del nivel de su resistencia a la compresión. Mientras mayor sea su resistencia, mayor será su durabilidad.

En ambientes agresivos, húmedos y marinos los aditivos y agentes inclusores de aire, enriquecen las propiedades del mortero y hacen a las estructuras menos vulnerables a estos fenómenos.

h) Corrosión

Es el desgaste de las propiedades químicas o físicas del ferrocemento. El fenómeno de la corrosión puede darse en el cemento, en el agregado y en el refuerzo, en la forma de ataque de sulfatos, reacción álcalis-agregados y celda galvánica, respectivamente. Los cambios ambientales, el nivel de permeabilidad del mortero, la composición química del agua de mezclado y de los aditivos, entre muchos otros, son agentes que inciden en los procesos de corrosión que pueden afectar al ferrocemento. El refuerzo se corroe cuando existe presencia de humedad y aire ocasionando agrietamiento y pérdida de recubrimiento. Es un proceso lento que en condiciones extremas puede ser inmediato. En un diseño adecuado de una estructura de ferrocemento debe evitarse al máximo la aparición de este fenómeno por lo que la selección de los materiales debe ser muy cuidadosa y apropiada.

i) Apariencia

El aspecto y la capacidad que tiene el ferrocemento para dejarse vaciar en elementos de pared delgada que pueden construirse con cualquier forma, lo convierte en un material versátil, ideal para construcciones poco convencionales, como se ve en la figura 21.



*Figura 21. Vivienda poco convencional construida en ferrocemento.
[www.ferrocement.com]*

El color y la textura del mortero pueden mejorarse y controlarse con colorantes inorgánicos o aditivos especiales. La plasticidad de la mezcla, la selección y las proporciones adecuadas de sus componentes son de esencial importancia en el acabado de la superficie del mortero.

2.2.3. Componentes del mortero y su equilibrio en la mezcla

2.2.3.1. Cemento

Es el material con propiedades de adherencia y cohesión necesarias para unir agregados inertes y conformar una masa sólida de resistencia y durabilidad adecuada. La respuesta de las estructuras de ferrocemento depende de las propiedades mecánicas del mortero endurecido dentro de condiciones ambientales determinadas. Propiedades como resistencia a compresión, dureza, impermeabilidad y resistencia al ataque químico, determinan en gran parte el comportamiento a corto y largo plazo del ferrocemento. El cemento debe ser fresco, libre de terrones y sustancias extrañas, debe almacenarse en ambientes secos y durante períodos cortos de tiempo. A continuación se hace una breve descripción de los tipos de cemento Pórtland, habituales en la fabricación del mortero para ferrocemento:

- **Tipo I:** No es recomendable en elementos bajo condiciones agresivas de sulfatos, aguas saladas y altas temperaturas. Apropriados para condiciones normales poco severas de ataque de sulfatos, y en general para diferentes tipos de obras que no le exijan propiedades específicas donde hayan demostrado un comportamiento satisfactorio.



- Tipo II: Ofrece resistencias iniciales bajas y resistencias últimas altas. Destinado a obras expuestas a la acción moderada de sulfatos y cuando se desee bajo calor de hidratación.
- Tipo III: Desarrolla altas resistencias iniciales; en condiciones de altas temperaturas puede presentar dificultades, debido a la rápida velocidad de fraguado; a bajas temperaturas puede ser satisfactorio.

Su resistencia última puede ser un poco menor que las resistencias últimas de los cementos Tipo I y II. No posee efectos perjudiciales en secciones delgadas y ofrece ventajas a las mezclas con granulometrías finas.

- Tipo IV: Desarrolla bajo calor de hidratación, por lo que es útil en hormigones masivos donde las condiciones adiabáticas pueden causar problemas serios al hormigón endurecido.
- Tipo V: Ofrece alta resistencia al ataque de sulfatos y posee un tiempo de fraguado promedio. Útil en estructuras sometidas a ambientes marinos y susceptibles al ataque de sulfatos.
- Cemento Portland de escoria de alto horno: La calidad y propiedades de este cemento dependen directamente de las características de la escoria de alto horno. La velocidad de fraguado es lenta y su proceso de curado debe ser minucioso. Su resistencia final es similar a la del cemento Portland Tipo I. Se recomienda en construcciones marinas o expuestas a sulfatos.
- Cemento Portland puzolánico: Para obtener su resistencia final se requiere mayor tiempo que en los demás tipos de cemento, aunque ello depende de la calidad de la puzolana y de la cantidad de cemento Portland. Provee buenas resistencias al ataque de los sulfatos y otros agentes destructivos como la reacción álcali-agregado. Dependiendo de la fuente de puzolanas puede significar ahorros en el costo de la mezcla.

El cemento que se emplee en la elaboración del mortero para ferrocemento debe cumplir con las normativas de calidad. En general, la utilización de cemento tipo I, ha resultado en comportamientos satisfactorios [Pama, 1992; Bedoya, 1996; Sánchez, 1998; Naaman,2000].

2.2.3.2. Agregados finos inertes

El agregado para morteros de ferrocemento debe ser duro, impermeable, libre de impurezas orgánicas, limpias y resistentes. El ferrocemento se caracteriza por tener agregados con tamaños máximos relativamente pequeños consistentes con el de las arenas para la fabricación de hormigón



convencional. Con respecto a los demás materiales usados en la mezcla, debe ser adecuado para obtener niveles aceptables de resistencia y densidad, e inerte para garantizar la durabilidad; además, debe tener suficiente trabajabilidad con una mínima relación agua-cemento. La arena no debe ser porosa, ni poseer cantidades de polvo fino que cree excesivos espacios vacíos, pues se reduciría la resistencia a compresión del mortero. Algunos agregados porosos permiten el flujo de humedad, lo cual aumenta la permeabilidad, reduce la durabilidad y desmejora el comportamiento estructural del mortero.

Las arenas blandas son afectadas por la abrasión y las reacciones químicas en los morteros. La granulometría de la arena debe producir una distribución uniforme de los áridos, para lograr alta trabajabilidad, densidad y resistencia, evitando la segregación y altos contenidos de agua. En la tabla 3, se presenta la granulometría especificada por las normativas de diseño, para arenas utilizadas en la fabricación de morteros para ferrocemento y hormigones.

Abertura (mm)	Malla #	Porcentaje que pasa.
9.5	3/8"	100
4.75	4	95 a 100
2.36	8	80 a 100
1.18	16	50 a 85
0.60	30	25 a 60
0.30	50	10 a 30
0.15	100	2 a 10

Tabla 3. Especificación de la Norma ASTM C-33 para agregado inerte.

a) Efecto de la gradación de la arena en la mezcla

Las características de la arena (granulometría, módulo de finura, forma y textura de los granos) deben ser adecuadas para obtener un buen empaquetamiento de las partículas y un consumo reducido de cemento.

Para determinar las gradaciones óptimas de agregados, con el propósito de reducir las cantidades de agua y de mejorar la trabajabilidad, se ha estudiado tanto las gradaciones continuas como las discontinuas. Los efectos de la gradación de la arena sobre la trabajabilidad y demás propiedades, se pueden mejorar por el incremento de los módulos de finura de 2.5 hasta 3.0. Los efectos combinados del tamaño máximo, módulos de finura y gradación de la arena se han estudiado a través de una serie de experimentos sobre arenas naturales y propiedades físicas conocidas, con el objetivo de adquirir principios relativos a la gradación de arenas para mezclas de ferrocemento [Bedoya 1996].

En la práctica, las propiedades del mortero (durabilidad, permeabilidad, resistencia a la compresión y flexión, y porosidad) no son exclusivas de la



calidad del cemento sino también de la gradación y tamaños de las partículas de la arena. Los efectos medidos sobre la gradación de la arena han mostrado que:

- El tamaño máximo del grano, el módulo de finura y los componentes de la gradación representan el mejor factor para evaluar la reducción del requerimiento de agua en la fabricación de un mortero hecho con arena natural.
- En una mezcla cualquiera, con un módulo de finura dado, el requerimiento mínimo de agua se encuentra para una superficie específica máxima.
- Ciertas gradaciones discontinuas permiten un mayor acercamiento de los granos y generan una reducción en la cantidad de pasta de cemento necesaria.
- No se registró segregación en morteros con gradación discontinua, con agregados de tamaños máximos de 1.2 mm a 2.4 mm, y de consistencia seca a plástica. Estos morteros exhibieron menor requerimiento de agua que morteros con gradación continua.
- En los agregados con tamaño máximo de 2.4 mm se considera adecuado un módulo de finura 2.9 a 3.0 y para tamaños de 1.2 mm. un módulo de finura de 2.5.
- Arena fina, con tamaños de 0.6 mm, o con módulos de finura bajos, resultan en un crecimiento considerable en el requerimiento de agua y producen morteros frágiles y porosos.

Cantidades excesivas de la porción más fina en las arenas no son adecuadas para mezclas de ferrocemento. La gradación de la arena en fracciones no consecutivas ha mostrado resultados satisfactorios. En general, la gradación adecuada de la arena para mezclas de ferrocemento es aquella que presente una distribución uniforme de los áridos, alta densidad, buena trabajabilidad, que no produzca fenómenos de segregación en su colocación y requiera bajos contenidos de agua. Si se mantiene la relación agua – cemento constante, la resistencia a la compresión depende de la gradación de la arena. El mejor comportamiento, en términos de resistencia y propiedades del mortero fresco, corresponde a mezclas con una relación 1 a 2 entre agregado fino y cementante [Bedoya 1996]. Por otra parte, la composición que arrojó mejores resultados fue la de arena gradada con fracciones no consecutivas, es decir con gradación discontinua, que corresponde a arenas constituidas exclusivamente de fracciones retenidas en las mallas No. 16 y No. 100, en proporciones cercanas al 60 % y 40 %, respectivamente.



Sin embargo, en términos de costo y disponibilidad, el estudio demostró que la utilización de arena que cumpla con las especificaciones de la norma ASTM C-33, libre de lodos, resulta en mezclas de comportamiento aceptable.

Para evitar aumentos adicionales en el agua requerida, deben retirarse los contenidos de arena que pasan la malla No. 100. Aunque el módulo de finurano parece tener un efecto significativo sobre la resistencia a flexión del mortero, arenas con un módulo de finura entre 2.8 y 3.1 exhibieron una fluidez entre el 97 % y el 104 %, lo que implica una buena consistencia para el ferrocemento, en términos de trabajabilidad [Bedoya, 1996].

b) Efecto de la relación arena – cemento en la mezcla

La proporción finos - cemento en la mezcla debe ser tal que alcance la resistencia requerida de diseño. Si esta proporción se aumenta, los granos de arena rozarán entre sí al no existir pasta lubricante y el mortero resultante poseerá propiedades mecánicas más pobres y baja resistencia; carecerá de ductilidad y perderá trabajabilidad; pero tendrá menor retracción y bajos costos. Si esta proporción se disminuye excesivamente pueden aparecer grietas y contracciones. Algunas relaciones arena – cemento, en peso, se presentan en la tabla 4.

Proporción cemento - arena, (en peso)	Comentario
1 : 1.0	Mortero rico
1 : 1.5	Mortero adecuado
1 : 2.0	Relación óptima. [Bedoya, 1996]
1 : 2.5	Mortero bombeado
1 : 3.0 a 5.0	Estructuras con bajas solicitaciones

Tabla 4. Proporciones finos-cemento en peso para el mortero. [Bedoya, 1996]

El intervalo de proporciones recomendado para mezclas de ferrocemento, va desde una relación por peso, cemento-arena de 1:1.5 hasta 1:2.5 [Bedoya, 1996].

2.2.3.3. Agua

Es de gran importancia para la preparación del mortero y el curado del ferrocemento. El agua debe ser fresca, exenta de impurezas y turbiedad, libre de sustancias orgánicas, álcalis, aceites, cieno, lama, azúcar, cloruros, ácidos y otras soluciones que puedan ocasionar corrosión del refuerzo, deterioro de las propiedades del mortero y el manchado de las superficies expuestas. El agua potable es en general apta para uso en mezclas para ferrocemento. No se permite el uso de agua salada.

AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.



Efecto de la relación agua – cemento en la mezcla

A medida que se adiciona agua, la plasticidad y la fluidez de la mezcla aumentan, mejora la manejabilidad, pero disminuye su resistencia debido al mayor volumen de vacíos creados por el agua libre. La relación agua - cemento es un factor que controla la resistencia del mortero e influye notablemente en la retracción, la adherencia, y en otras propiedades del mortero. Además, una pasta porosa, resultado de una relación agua – cemento alta, es una pasta permeable, que afecta la durabilidad del mortero.

Como se aprecia en la figura 22, la resistencia a la compresión aumenta a medida que la relación agua–cemento disminuye.

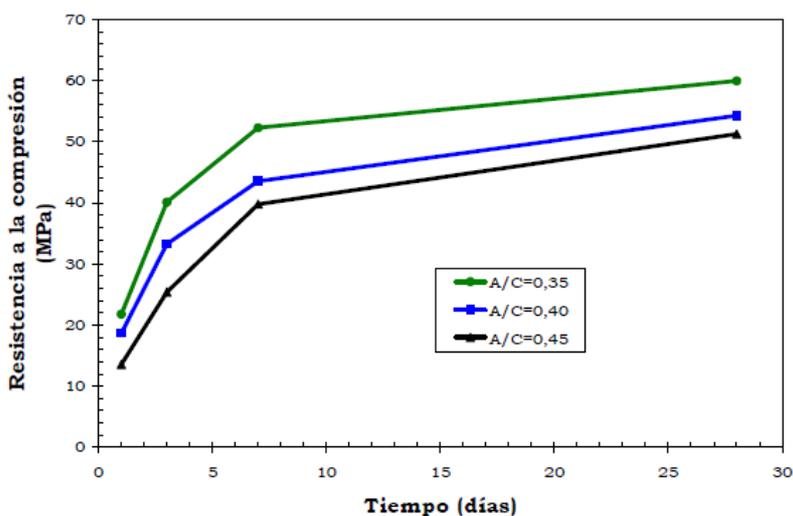


Figura 22. Efecto de la relación agua – cemento en la resistencia. [Bedoya, 1996]

La relación agua – cemento afecta la trabajabilidad del mortero, que puede medirse en términos de fluidez de la mezcla, a través de un ensayo normalizado. La humedad de las arenas debe medirse en el momento del vaciado para lograr un buen control de la relación agua - cemento. La cantidad de agua de mezclado en un diseño de mortero para ferrocemento debe ser la necesaria para producir una pasta bien hidratada, con capacidad de movilidad y que permita la redistribución adecuada de los agregados cuando la mezcla presente una consistencia plástica, para formar así un sólido compacto y homogéneo, con propiedades físicas, químicas y mecánicas de características singulares. Las relación agua - cemento debe

AUTORES: Bruno Guzmán D.

Israel Salcedo A.



ser lo más baja posible para obtener mezclas de calidad, resistencia, trabajabilidad apropiada para su vaciado, con un bajo costo. La mejor relación agua - cemento, por peso, para mezclas de ferrocemento está en un intervalo entre 0.35 y 0.45. En general, se recomienda utilizar una relación de agua - cemento de 0.4, por peso, en el diseño de la mezcla para el mortero de ferrocemento [Bedoya, 1996].

2.3. FUNDAMENTOS UTILIZADOS PARA EL DISEÑO SEGÚN LA NORMATIVA ACI-549.R

En este capítulo se describe el comportamiento mecánico del ferrocemento estudiado y documentado hasta el momento y se presenta un resumen general de sus propiedades mecánicas bajo varias condiciones de carga: tracción, flexión, compresión, cortante, fatiga y cíclica. También serán tratados el módulo de elasticidad, la superficie específica del refuerzo y las características de agrietamiento del ferrocemento.

Hasta el momento, la caracterización mecánica del ferrocemento a tracción y flexión cuenta con un buen número de estudios, pero, quedan otros aspectos que es preciso de investigar [ACI, 1997; Naaman, 2000]. De acuerdo con el Comité del ACI 549-R97, es necesario generar investigaciones encaminadas a determinar la resistencia a cortante en el plano y la resistencia fuera del plano. La resistencia dentro y fuera del plano es importante cuando el ferrocemento es usado en paneles o muros de viviendas ubicadas en zonas de actividad sísmica. Además, es necesario realizar pruebas experimentales con condiciones de carga combinadas, tal como cortante en el plano y flexión o compresión. Acerca del comportamiento histerético del ferrocemento se conoce poco, por lo tanto su caracterización bajo acciones repetitivas como la de los sismos se debe investigar [ACI, 1997].

2.3.1. Parámetros mecánicos para el diseño estructural

En viviendas o estructuras hechas con ferrocemento el sistema de resistencia sísmica conformado por cada uno de los elementos estructurales debe poseer suficiente integridad, resistencia y rigidez para garantizar la transferencia de las cargas hasta la cimentación, de forma segura y económica. Cualquier estructura construida con elementos prefabricados en ferrocemento debe

AUTORES: Bruno Guzmán D.

Israel Salcedo A.



diseñarse y construirse de tal manera que pueda soportar todas las cargas muertas, vivas, de viento y de sismo, sin exceder las tensiones admisibles, o las resistencias nominales, cuando se mayoran las cargas por medio de factores de seguridad.

Además, todas las cargas deben evaluarse de acuerdo con las Normativas de Diseño y Construcción Sismo Resistentes de cada país.

En viviendas de bajo costo, los elementos prefabricados y sus componentes deben diseñarse para que tengan una rigidez adecuada para atender deflexiones verticales o desplazamientos horizontales ante cargas de sismo, sin fallar y sin exceder los límites especificados por las normas vigentes.

Deben determinarse los efectos de las cargas en los diferentes elementos de la estructura y de sus conexiones, tomando en cuenta los principios de equilibrio y compatibilidad en las deformaciones y las propiedades de los materiales, tanto a corto, como a largo plazo. En los elementos que tiendan a acumular deformaciones residuales bajo cargas de servicios repetidas, debe tenerse en cuenta el análisis de las excentricidades adicionales que se espera que ocurran durante la vida útil de la estructura.

El comportamiento mecánico del ferrocemento depende en gran parte del tipo, cantidad, orientación y propiedades de la resistencia de la malla y la varilla de refuerzo. Deben ser lo suficientemente flexibles para poderlas doblar. Como en el hormigón, la matriz cementante del ferrocemento es frágil. El entretejido metálico le proporciona ductilidad y su distribución es homogénea en toda la sección transversal.

El ferrocemento se considera un material homogéneo, con una alta relación de superficie sobre volumen, constituido por refuerzo metálico de pequeños diámetros distribuido dentro de una matriz frágil de mortero; esta composición le otorga al material propiedades importantes como ductilidad, durabilidad y baja permeabilidad. Desde sus inicios, el ferrocemento se ha construido empíricamente. En los últimos años se han desarrollado varias propuestas para el diseño con ferrocemento y se han publicado varios estudios experimentales sobre su comportamiento para comparar con las predicciones teóricas. Para el análisis y el diseño del ferrocemento se han sugerido varios métodos y guías de diseño, inspiradas en el diseño de estructuras de hormigón armado. Los interesados en profundizar en este tema pueden consultar la bibliografía sugerida al final de este estudio [Hajj, 1981; Pama, 1992; Bedoya, 1996; ACI, 1997; Naaman, 2000].

A continuación se hace una descripción de algunos conceptos básicos, tales como: la fracción de volumen, el área y la superficie específica del refuerzo que influyen en el comportamiento mecánico del ferrocemento.

2.3.1.1. Fracción de volumen de refuerzo y de mortero



La fracción de volumen de refuerzo V_r , se define como la relación del volumen de refuerzo y el volumen del compuesto:

$$V_r = \frac{V_{\text{refuerzo}}}{V_{\text{compuesto}}} \quad (1)$$

En el caso que el diseño de ferrocemento requiera acero esqueletal, este debe ser incluido en el numerador y denominador de la expresión 1. La expresión 2, nos permite determinar la fracción de volumen de refuerzo para una malla rectangular [Naaman, 2000].

$$V_r = \frac{N \pi d_w^2}{4h} \left[\frac{1}{D_L} + \frac{1}{D_T} \right] \quad (2)$$

Donde, N es el número de capas de malla, $w d$ es diámetro del alambre de la malla, h el espesor del elemento de ferrocemento. En mallas rectangulares, $T D$ y $L D$ es la distancia centro a centro entre los alambres longitudinales y transversales respectivamente de la malla, como se muestra en la figura 23.

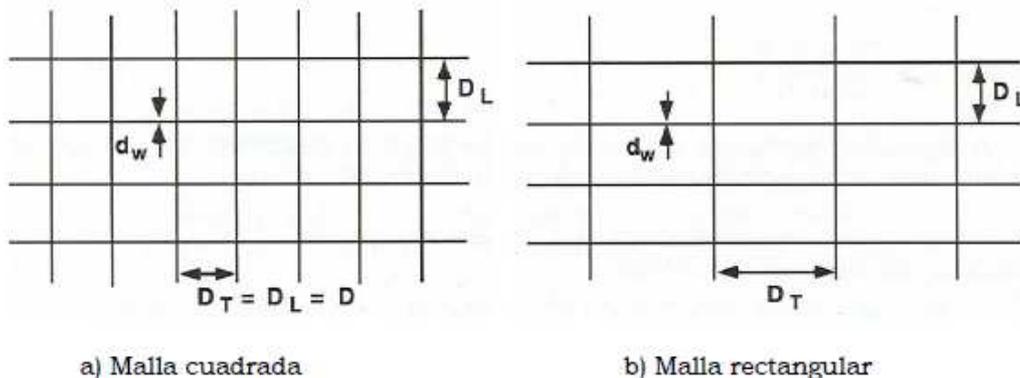


Figura 23. Parámetros geométricos en mallas metálicas de refuerzo.

La fracción de volumen de refuerzo $r V$ puede ser dividida en dos partes; una parte para la dirección longitudinal y otra para la dirección transversal, de la siguiente forma:



$$V_r = V_{rT} + V_{rL} \quad (3)$$

$$V_{rL} = \frac{N \pi d_w^2}{4h} \left[\frac{1}{D_L} \right] \quad (4)$$

$$V_{rT} = \frac{N \pi d_w^2}{4h} \left[\frac{1}{D_T} \right] \quad (5)$$

Para determinar la fracción de volumen de cualquier tipo de malla, por ejemplo: malla hexagonal (*malla de alambre de pollo o gallinero*), malla de metal expandido, malla de fibras reforzadas con polímeros (FRP) o malla de forma irregular, se debe utilizar la siguiente expresión:

$$V_r = \frac{N W_r}{h \gamma_r} \quad (6)$$

Donde, W_r es el peso unitario de la malla de refuerzo (kg/m^2 o kN/m^2) y γ_r es la densidad de la malla de refuerzo (kg/m^3 o kN/m^3). Las expresiones 3 a 6, son válidas para cualquier sistema de unidades. V_r es adimensional.

La fracción de volumen de mortero V_m está definida por la ecuación 7.

$$V_m = \frac{A_m}{A_c} \quad (7)$$

Donde, A_m es el área transversal de la sección del mortero y A_c es el área transversal de la sección del compuesto de ferrocemento; $A_c = A_r + A_m$

2.3.1.2. Área efectiva de refuerzo

Es la cantidad de refuerzo que contiene un elemento de ferrocemento. Una de las principales diferencias entre el ferrocemento y el resto de la familia de los hormigones armados es que el refuerzo generalmente es bidireccional.

Para mallas cuadradas o rectangulares el refuerzo longitudinal es asumido como el refuerzo a tracción del elemento de ferrocemento. La presencia del refuerzo transversal es considerada dentro del diseño, utilizando un valor alto para la resistencia de adherencia τ . Esto se debe a la forma ondulada o a la soldadura de los alambres que introducen una componente de resistencia a la adherencia, la cual incide en la resistencia total.

AUTORES: Bruno Guzmán D.

Israel Salcedo A.

Cuando las mallas no son cuadradas o rectangulares, tales como las mallas de metal expandido y hexagonal, el área de refuerzo A_r en la dirección de la carga no está definido y no se conoce su orientación final de los alambres. En este caso, se ha sugerido un área de refuerzo equivalente en la dirección de la carga.

$$A_r = \eta_o V_r A_c \quad (8)$$

Donde, V_r es la fracción de volumen total de refuerzo, A_c es el área transversal de la sección de ferrocemento y η_o es el factor de eficiencia del refuerzo en la dirección considerada de la carga (es la relación entre la resistencia de adherencia del refuerzo y el mortero con la resistencia a tracción del mortero). El valor de η_o puede ser tomado en la dirección longitudinal η_L , transversal η_T o en cualquier otra dirección η_θ . Los valores típicos de η_o son habitualmente obtenidos de pruebas de laboratorio sobre mallas de acero para ferrocemento. En la figura 24, se muestra un esquema de la dirección de la carga y la posible orientación de la malla.

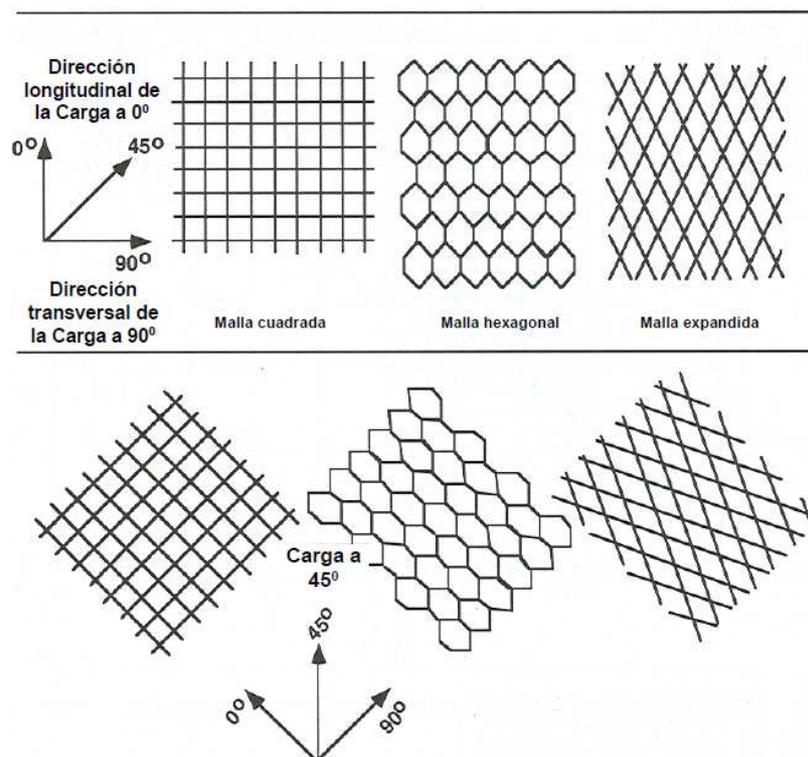


Figura 24. Dirección de la carga y orientación de las malla de refuerzo.

El efecto en la orientación de la malla es más predominante cuando el elemento de ferrocemento es construido con mallas de metal expandido o hexagonal.



Generalmente, la anisotropía del ferrocemento puede ser reducida alternando la colocación de las capas de malla en toda la profundidad del elemento. En la tabla 5, se presentan los valores mínimos de resistencia, módulo efectivo y factor de eficiencia global recomendados para las mallas de refuerzo, según su dirección y orientación [ACI, 1997]

Tipo de malla de alambres		Cuadrada tejida	Cuadrada soldada	De metal expandido	Hexagonal
Resistencia de cedencia σ_{ry} (Mpa)	σ_{ry}	450	450	310	310
Módulo efectivo E_r (Gpa)	E_{rL}	138	200	138	104
	E_{rT}	165	200	69	69
Factor de eficiencia global η_o	η_L	0,50	0,50	0,65	0,45
	η_T	0,50	0,50	0,20	0,30
	$\eta_{\theta} (\theta = 45)$	0,35	0,35	0,30	0,30

Tabla 5. Parámetros estructurales sugeridos para el diseño. [ACI, 1997]

2.3.1.3. Superficie específica de refuerzo

La superficie específica del refuerzo es el área total lateral del refuerzo adherida al compuesto, dividida por el volumen del compuesto; esto es:

$$S_r = \frac{\text{Superficie de área total adherida al refuerzo}}{\text{Volumen del compuesto}} \quad (9)$$

Para una malla de alambre de diámetro d_w , la superficie específica está dada por la expresión 10.

$$S_r = \frac{4 V_r}{d_w} \quad (10)$$

La superficie específica, S_r , puede ser dividida en dos partes; una parte para la dirección longitudinal y otra para la dirección transversal, así:

$$S_r = S_{rT} + S_{rL} \quad (11)$$

Para una malla cuadrada de alambre se tiene la siguiente relación:

$$S_{rT} = S_{rL} = \frac{S_r}{2} = \frac{2V_r}{d_w} = \frac{4V_{rL}}{d_w} = \frac{4V_{rT}}{d_w} \quad (12)$$



2.3.1.4. Propiedades del compuesto

En la tabla 6, se presentan algunas propiedades mecánicas para el ferrocemento reforzado con mallas de acero convencional y matrices de mortero de cemento.

Propiedades del ferrocemento	Espesor	$6 = d_w = 50 \text{ mm}$, (preferible $< 30 \text{ mm}$)
	Recubrimiento del acero	$1,50 = d' = 3,0 \text{ mm}$
	Resistencia última a tracción	Hasta 35 Mpa
	Deformación última a tracción	0,0035 o la deformación última del refuerzo
	Esfuerzo permisible a tracción	$0,6 f_y$ o hasta 14 Mpa
	Módulo de ruptura	Hasta 70 Mpa
	Relación flexión/tracción	de 2,0 a 2,5
	Resistencia a la compresión	de 12 a 96 Mpa
Ancho de fisuras W	$0,05 \text{ mm} = W = 0,10 \text{ mm}$	

Tabla 6. Propiedades del ferrocemento. [ACI, 1997, Naaman, 2000]

2.3.2. Comportamiento carga–deformación bajo carga estática

Las siguientes consideraciones son dadas para la resistencia última y para la resistencia de grieta. El comportamiento carga–deformación del ferrocemento bajo varias formas de carga estática -y en particular su elasticidad, que históricamente ha sido identificada como uno de sus mayores atributos debe ser examinada teniendo en cuenta estos dos parámetros.

2.3.2.1. Elasticidad y comportamiento carga–deformación en tracción

Comportamiento característico a tracción

En la figura 25, se muestra la curva típica esfuerzo–deformación para un elemento de ferrocemento a tracción. El espécimen es sometido a incrementos de carga, obligándolo a deformarse a través del intervalo elástico hasta alcanzar deformaciones plásticas y, eventualmente, fallar. El comportamiento carga–deformación del ferrocemento a tracción se ha caracterizado en tres estados:

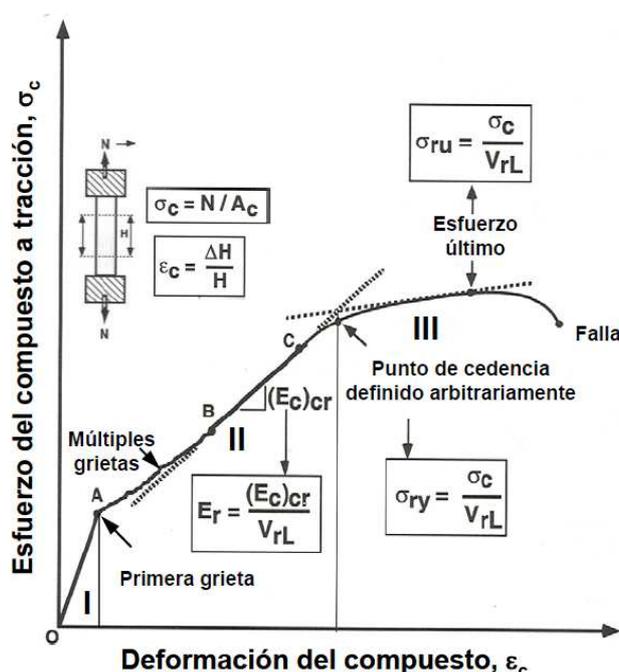


Figura 25. Curva típica esfuerzo – deformación en tracción del ferrocemento.
[Adaptado de Naaman, 2000]

- a) **Estado elástico o estado I:** En este estado el ferrocemento se comporta linealmente (tramo OA), deformándose en forma directamente proporcional con la carga aplicada. La malla de refuerzo y la matriz de mortero trabajan conjuntamente con deformaciones similares sin perder adherencia entre mortero y refuerzo. Si la dirección de la carga es paralela a la dirección de las fibras de refuerzo, se supone que la fibra y la matriz toman la carga en conjunto en forma directamente proporcional a sus áreas seccionales.

Aunque pueden existir microgrietas no observables a simple vista debido a imperfecciones del material o formadas por la retracción durante el fraguado, no hay formación de grietas nuevas debido a la aplicación de carga. En estos casos, el cálculo del módulo de elasticidad del compuesto con base en los módulos de elasticidad de los componentes es relativamente sencillo.

En las secciones de ferrocemento con mallas de fibras alineadas en cualquier dirección (metal expandido, hexagonal o fibras discontinuas), la obtención del módulo de elasticidad efectivo del compuesto es más complejo.

En cualquier caso, el modelo de distribución de tensiones entre el mortero y el refuerzo se basa en la característica modular de las mallas de alambre, donde se puede identificar un patrón básico repetitivo con el que puede describirse el conjunto. Así, el compuesto puede dividirse en franjas básicas donde se analiza el aporte de cada componente al



comportamiento del compuesto en función de las tensiones para obtener un módulo de elasticidad equivalente.

- b) Estado de agrietamiento o estado II:** Con el aumento de la carga rápidamente se excede la resistencia a la tracción del mortero y la malla de refuerzo atiende las tensiones de tracción subsecuentes. En este estado (tramo ABC, de la figura 25), se forman y se ensanchan las grietas. El comportamiento del ferrocemento pierde linealidad con el aumento en las tensiones, las grietas se multiplican y se agrandan. La primera grieta es función de la superficie específica del refuerzo. La aparición, multiplicación y ancho de las grietas depende de la adherencia entre el refuerzo y el mortero, de la distribución del refuerzo y del espesor de la capa del mortero.
- c) Estado de fluencia o estado III:** Con el continuo incremento en la carga las grietas siguen aumentando uniformemente; no hay formación significativa de grietas nuevas, lo que implica el ensanchamiento y alargamiento de las grietas existentes junto con el incremento de las tensiones de tracción en el acero y, si es del caso, de compresión en el mortero. El compuesto actúa conjuntamente hasta un ancho de grieta aproximado de 100 micras. El refuerzo toma todas las tensiones de tracción y entra al intervalo de cedencia. Antes de la falla se registra una carga o esfuerzo máximo.

La primera grieta estructural

En la literatura técnica sobre ferrocemento la resistencia a la primera grieta aparece como una de las propiedades interesantes del ferrocemento en tracción o flexión. Numerosos y largos debates se han llevado a cabo por especialistas e investigadores para definir "*la primera grieta*". "*La primeragrieta*" puede ser subjetiva y definida de varias maneras. Quizá pueda verse a simple vista o ser microscópica. Las microfisuras son inherentes a la matriz de mortero, aun sin ser cargada.

Cuando la estructura es solicitada, aumentan de ancho y se propagan progresivamente, entonces son detectadas a simple vista o de alguna otra manera. En ensayos de laboratorio sobre especímenes a tracción, las microgrietas se desarrollan aleatoriamente a través de toda la matriz cementante.

Cuando el grupo de microfisuras se une de forma tridimensional en la superficie del elemento y lo separa en dos, se ha formado "*la primera grieta estructural*" [Naaman, 2000]

Para minimizar la subjetividad de la definición de la primera grieta en ferrocemento se han desarrollado varias investigaciones. Russian y Polish (1995), proponen un rango de valores de acuerdo con el ancho de la grieta.



Para valores al microscopio un ancho de 0.005 mm y para valores a la vista de 0.03 mm a 0.1 mm. En otros estudios [ACI, 1997] “la primera grieta”, es definida como la primera desviación de la linealidad en la curva carga-deformación del ferrocemento a tracción o la correspondiente desviación en el gráfico carga–deflexión, en la curva a flexión del ferrocemento. El ancho de grieta bajo carga a flexión es de 0.075 mm.

En ferrocemento, la superficie específica del refuerzo está directamente relacionada con la formación de la primera grieta. Los efectos sobre el espaciamiento promedio de grietas y el ancho están aún más influenciados.

Cuando la superficie específica aumenta, la resistencia a la primera grieta crece; en flexión este efecto no es significativo. En la figura 26, se muestra la variación del esfuerzo a la primera grieta con el aumento de la superficie específica de refuerzo.

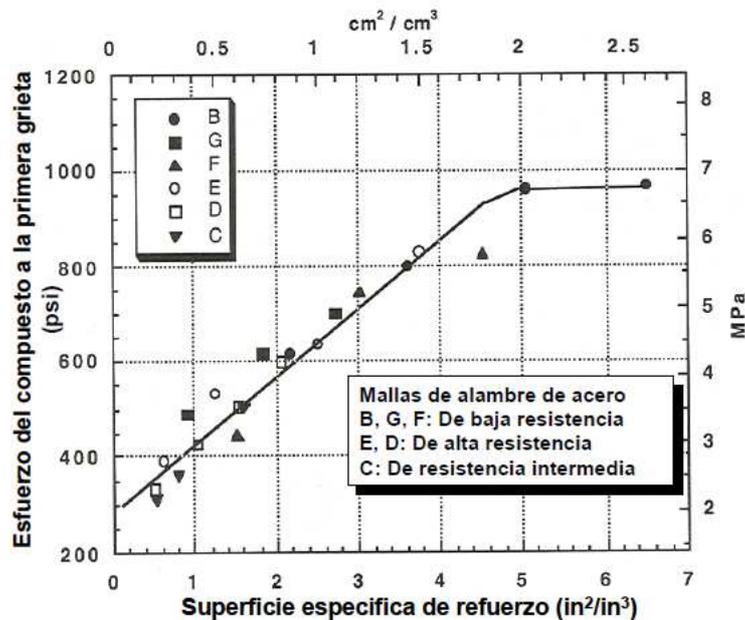


Figura 26. Influencia del refuerzo en la primera grieta. [Naaman, 2000]

Módulo de elasticidad a tracción

El módulo de elasticidad es una medida del cambio de los esfuerzos entre dos puntos de la curva esfuerzo–deformación para un material a tracción. Es una de las propiedades fundamentales para el ferrocemento.

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} \quad (13)$$

Donde, $\Delta \sigma$ es el cambio en el esfuerzo y $\Delta \epsilon$ es el cambio en la deformación. La ecuación 13, es una expresión general. La selección de los diferentes puntos puede llevar a distintos valores del módulo de elasticidad.



En la figura 27, se ilustran varias definiciones para el módulo de elasticidad del ferrocemento. El módulo tangente o inicial usualmente es obtenido cuando el ferrocemento no se ha agrietado. Para elementos agrietados el módulo es más pequeño y es función de la relación de refuerzos en la dirección de la aplicación de la carga.

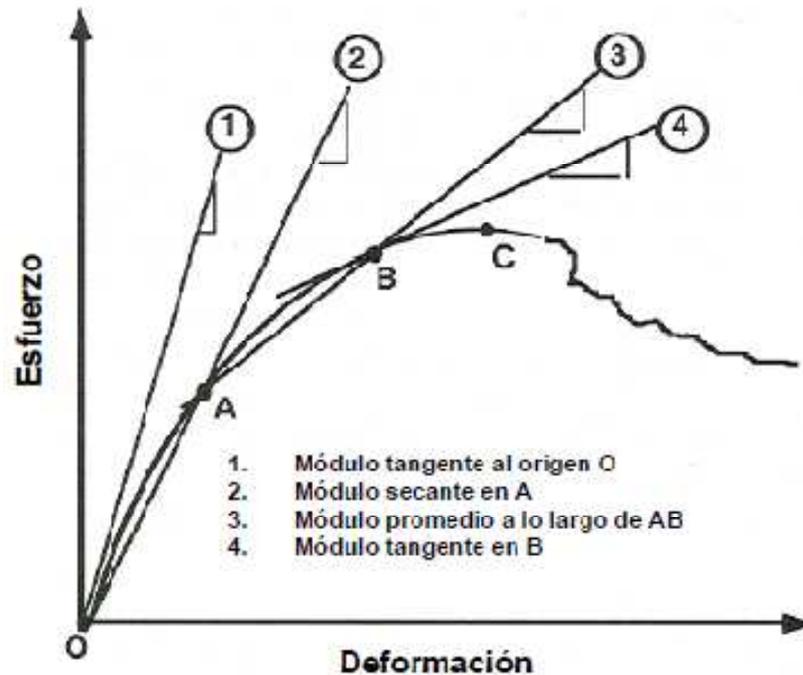


Figura 27. Varias definiciones del módulo de elasticidad. [Naaman, 2000]

Módulo de elasticidad del ferrocemento sin agrietar: la predicción del módulo de elasticidad de un compuesto con diferentes propiedades en distintas direcciones exige un análisis preciso. Sin embargo, la ecuación 14, permite estimar de manera aproximada y simplificada el módulo de elasticidad del ferrocemento sin agrietar (E_C)_{ub}.

$$(E_C)_{ub} = E_r V_r + E_m V_m = E_r V_r + E_m (1 - V_r) \quad (14)$$

Donde, E_r es el módulo elástico del sistema de refuerzo en la dirección de la carga aplicada; E_m es el módulo de elasticidad del mortero asumido



isotrópico; V_r y V_m son la fracción de volumen y de mortero respectivamente.

Módulo de elasticidad agrietado: o módulo de elasticidad aparente del ferrocemento $(E_c)_{cr}$, depende de una gran cantidad de parámetros, entre ellos está la fracción de volumen de refuerzo V_r , la extensión del múltiple agrietamiento en los estados II y III y la orientación final de los alambres de refuerzo. Algunos autores proponen la expresión 15, obtenida a partir del módulo elástico sin agrietar [Naaman, 2000].

$$(E_c)_{cr} = \frac{E_m V_m + E_r V_{rL}}{\lambda} \quad (15)$$

Donde, V_{rL} es la fracción de volumen de refuerzo en la dirección de la carga aplicada y λ es un factor que puede tomar valores entre 2 y 3. El valor de tres es sugerido para fracciones de volumen de refuerzo bajo. En ningún caso se debe desconocer la aleatoriedad y las incertidumbres asociadas a los módulos de elasticidad del ferrocemento. Para diseños a gran escala o repetitivos lo indicado es determinar el módulo de elasticidad agrietado y sin agrietar a partir de pruebas experimentales o ensayos [ACI, 1997; Naaman, 2000].

Influencia de la superficie específica del refuerzo

Una de las principales características del ferrocemento, frente al hormigón armado, es su alta superficie específica (de uno a dos) para una fracción de volumen de refuerzo casi similar. Esto hace que el ferrocemento adquiera un número de propiedades particulares en su comportamiento, las cuales han sido observadas en investigaciones experimentales [Naaman, 2000]. La figura 28, ilustra cualitativamente la influencia de la superficie específica de refuerzo sobre algunas propiedades mecánicas del ferrocemento. El esfuerzo a la primera grieta crece linealmente con la superficie específica de refuerzo, en cambio el ancho y el espaciamiento entre grietas, decrece rápidamente y de forma inversamente proporcional a la superficie específica de refuerzo. El esfuerzo a la estabilización de las grietas, también aumenta con la superficie específica de refuerzo. Sin embargo, el esfuerzo a la estabilización no es lineal, su comportamiento debe evaluarse experimentalmente y depende de otros tipos de factores que intervienen junto con otras propiedades del ferrocemento, tales como: tipo de matriz cementante (liviana, normal o pesada), la malla de refuerzo (módulo, cedencia, resistencia última o deformación), geometría, etc.

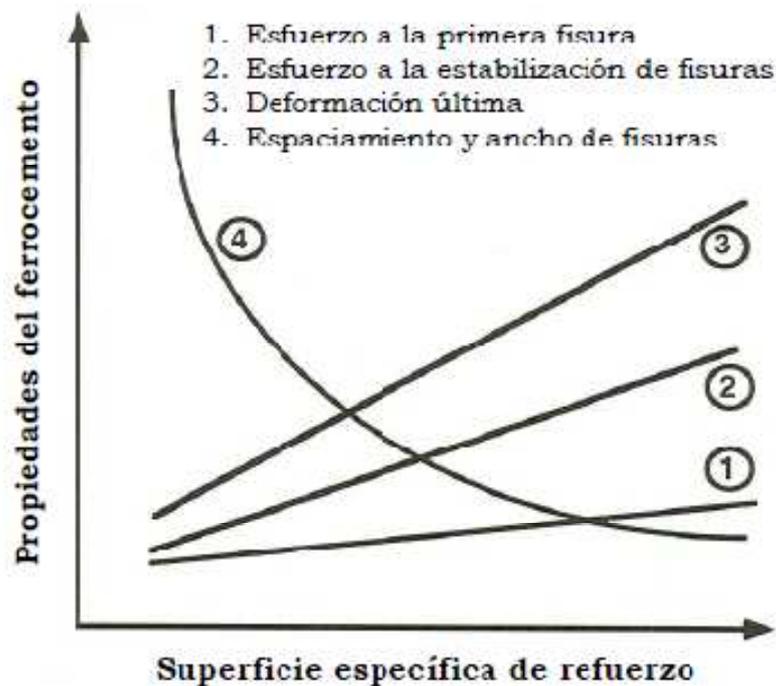
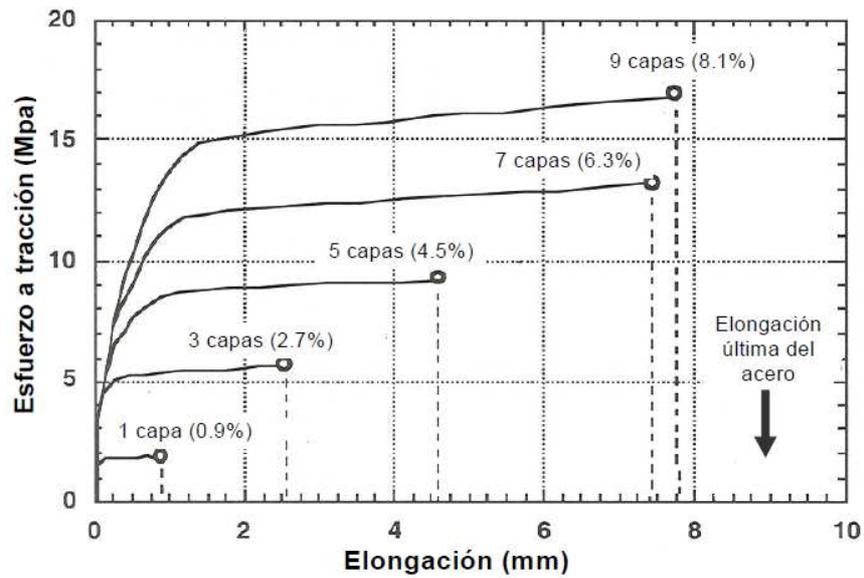


Figura 28. Influencia cualitativa de la superficie específica de refuerzo en las propiedades del ferrocemento. [Naaman, 2000]

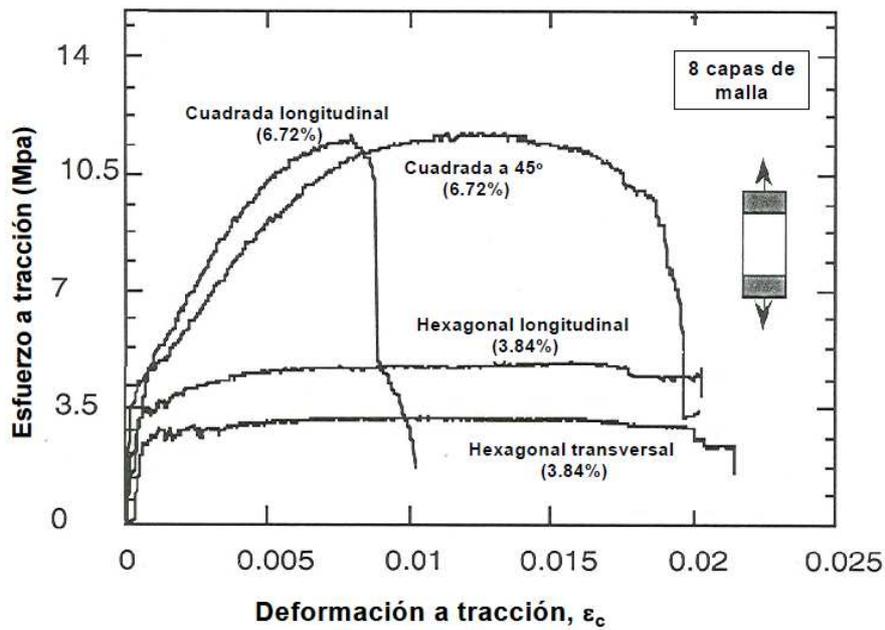
Propiedades a tracción del ferrocemento

El ferrocemento posee una gran variedad de propiedades singulares y algunos autores lo han considerado un modelo a pequeña escala de un "super hormigón armado" [Naaman, 2000]. El ferrocemento tiene ductilidad, grandes fracciones de volumen de refuerzo distribuido en la matriz cementante, alta resistencia y bajo agrietamiento.

En las figuras 29, se muestran la variación del comportamiento a tracción del ferrocemento con diferentes cantidades de refuerzo y tipos de malla. La figura 29a, corresponde a una malla de acero tejida de baja resistencia. La deformación última y el esfuerzo a tracción aumentan a medida que se incrementa la fracción de volumen de refuerzo. La figura 29b, corresponde a una malla hexagonal. Este tipo de refuerzo es el más habitual en construcciones de ferrocemento.



a) Malla cuadrada tejida de acero de baja resistencia.



b) Malla hexagonal de acero de baja resistencia.

Figura 29. Comportamiento a tracción del ferrocemento en mallas de acero. [Naaman,2000]



2.3.2.2. Comportamiento carga–deformación en 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 compresión es igual al del mortero. Cuando el refuerzo es colocado en forma perimetral, la relación carga–deformación es curvilínea, con un módulo tangente inicial que incrementa gradualmente con la fracción de volumen de refuerzo. El módulo de elasticidad puede ser determinado exactamente, teniendo en cuenta la participación, en conjunto de los dos componentes. 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. Las mallas de refuerzo soldadas proporcionan mejor confinamiento al mortero.

En la figura 30, se muestra el comportamiento típico del ferrocemento a compresión.

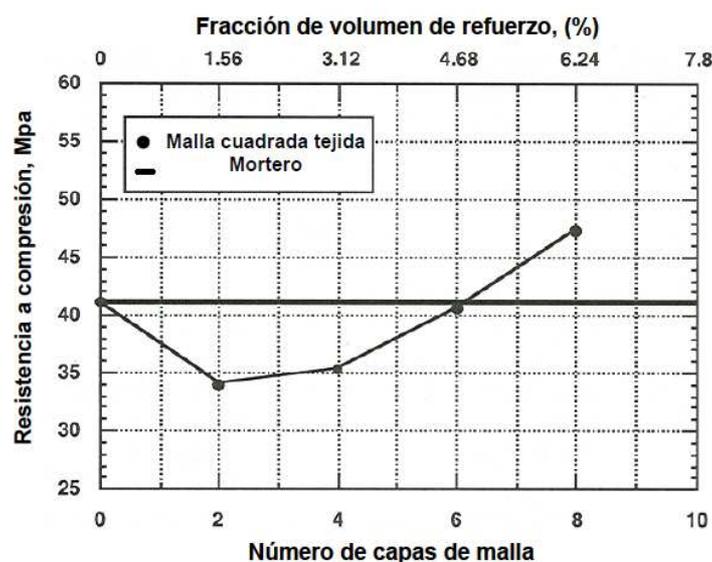


Figura 30. Resistencia a la compresión del ferrocemento. [Naaman, 2000]

Para contenidos bajos de malla la resistencia a compresión es inferior a la del mortero, pero aumenta para grandes cantidades de refuerzo. La de laminación, el tipo y la orientación de las mallas de refuerzo influyen y reducen la resistencia a compresión. Las mallas de metal expandido o hexagonal, orientadas en la dirección de la carga, son menos efectivas que las mallas cuadradas soldadas en la misma dirección. Si las mallas se disponen de tal manera que proporcionen confinamiento a la matriz de mortero, las propiedades a compresión mejoran notablemente.

2.3.2.3. Comportamiento carga–deformación en flexión

La resistencia a flexión refleja la influencia combinada de los factores que gobiernan la resistencia a tracción y a compresión; cantidad, tipo, orientación y geometría del refuerzo. En la figura 31, se muestra un esquema del comportamiento característico, carga–deformación, del ferrocemento a flexión. En la curva se pueden identificar diferentes tramos similares al comportamiento a tracción.

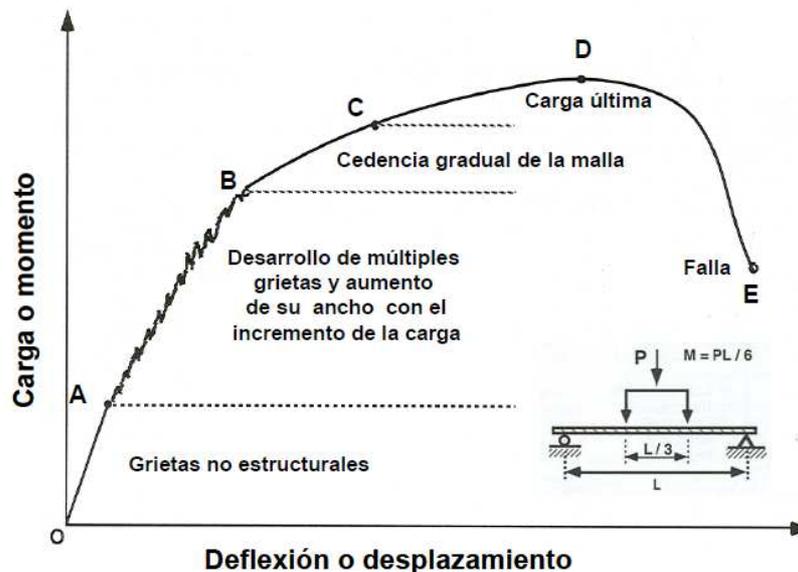


Figura 31. Comportamiento típico a flexión del ferrocemento. [Adaptada de Naaman, 2000]

- El tramo inicial OA, representa la porción sin grietas estructurales.
- En la porción AB, es la región donde se generan, se desarrollan y se multiplican las grietas. El ancho de la grietas aumenta con el incremento de la carga.
- En el tramo BC, se inicia la cedencia gradual del acero de refuerzo. La cedencia gradual ocurre cuando una malla de acero llega al punto de cedencia; las demás capas de refuerzo, colocadas diferentes posiciones en el espesor del elemento, cederán a medida que aumente la carga.
- La región CD, se conoce como post-cedencia plástica o región de endurecimiento por deformación. En el punto D, se alcanza el máximo o carga última.



- El tramo DE, lleva a la falla, punto E.

Respuesta a momento–curvatura del ferrocemento

El comportamiento a flexión del ferrocemento también está caracterizado por la relación momento – curvatura. En la actualidad, se han propuesto varios métodos para determinar la relación momento-curvatura del ferrocemento.

Algunos métodos proponen trazar una curva de segundo orden para la relación esfuerzo–deformación del mortero a compresión y una relación bilineal (elástica/plástica) para el refuerzo a tracción. Estas dos curvas no han sido verificadas experimentalmente [ACI, 1997]. Otros métodos proponen el uso de las series de Fourier para definir las relaciones esfuerzo–deformación en el mortero y en el refuerzo, y de ese modo calcular la respuesta momento–curvatura. Este enfoque ha dado resultados satisfactorios con las correspondientes relaciones determinadas experimentalmente para los dos primeros estados o tramos, pero discrepa para los demás estados [Queket al, 1991]

El comportamiento carga–deformación en flexión, también, se puede estudiar con base en la teoría del hormigón armado [Naaman, 2000]. Para dicho análisis se supone que las secciones planas permanecen planas y que su deformación es directamente proporcional a la tensión. Del estudio de las distribuciones de deformaciones y de tensiones a través de la sección transversal de los elementos se obtiene el modelo para su comportamiento a flexión. De acuerdo con el nivel de tensiones alcanzado el compuesto puede estar trabajando en el intervalo elástico o fuera de éste, caso en el cual la fluencia puede no alcanzarse simultáneamente para cada componente del ferrocemento. Para cada caso, se realiza el equilibrio de fuerzas internas y, en términos de sus propiedades elásticas y geométricas, se obtiene la profundidad del eje neutro, el momento resistente a flexión de la sección y la curvatura. En la figura 32, se muestra un esquema típico de la respuesta momento-curvatura de una sección de ferrocemento. Cada tramo permite caracterizar el desempeño a flexión del compuesto:

- El tramo inicial OA corresponde a la sección sin agrietar.
- En el punto A ocurren las primeras grietas, lo que incrementa la curvatura sin aumentar el momento. Tramo AB.
- En el tramo BC el refuerzo y el mortero, sujetos a compresión, presentan un comportamiento elástico lineal.



- El tramo CD es no lineal. Ambos materiales están en el rango no lineal. El pico D, representa el punto de máxima resistencia nominal a flexión alcanzada.
- El punto E, del tramo descendente DE, representa la falla. La falla puede ocurrir en cualquiera de los dos materiales, ya sea por la fibra extrema a tracción del refuerzo o a compresión del mortero, cualquiera que ocurra primero.

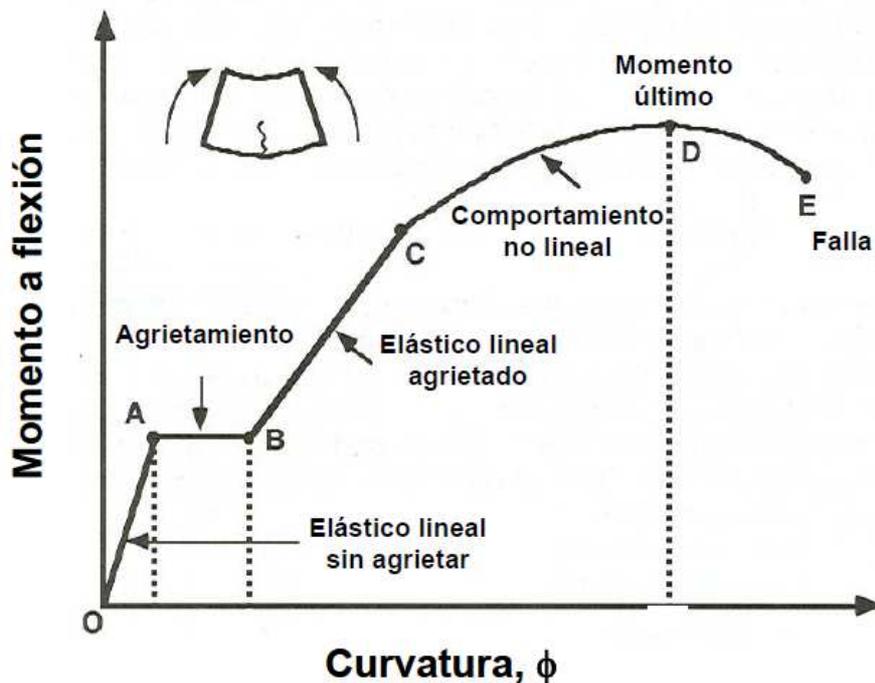


Figura 32. Respuesta momento - curvatura del ferrocemento. [Adaptada de Naaman, 2000]

Propiedades a flexión del ferrocemento

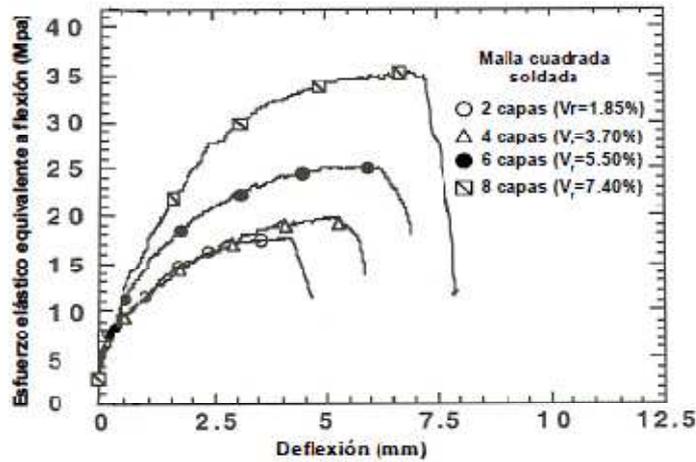
En las figuras 33, se muestra la variación del comportamiento a flexión del ferrocemento con diferentes cantidades de refuerzo, orientación y tipos de malla obtenidos a partir de estudios experimentales [Naaman et al, 2000]. La figura 33a, corresponde a una malla de acero cuadrada soldada. La deflexión última y el esfuerzo equivalente elástico a flexión aumentan a medida que se incrementa la fracción de volumen de refuerzo. La figura 33b, corresponde a una malla de acero cuadrada tejida. Aunque la resistencia es menor comparada con la malla soldada, la elongación última es mayor y aumenta con la fracción de volumen de refuerzo. La figura 33c, corresponde a una malla hexagonal con los alambres orientados longitudinal y transversalmente. Para esfuerzos biaxiales, la resistencia a flexión en el sentido transversal debe ser mejorada por lo que es recomendado en mallas hexagonales alternar su posición entre capa y capa, a la vez que se reduce

AUTORES: Bruno Guzmán D.

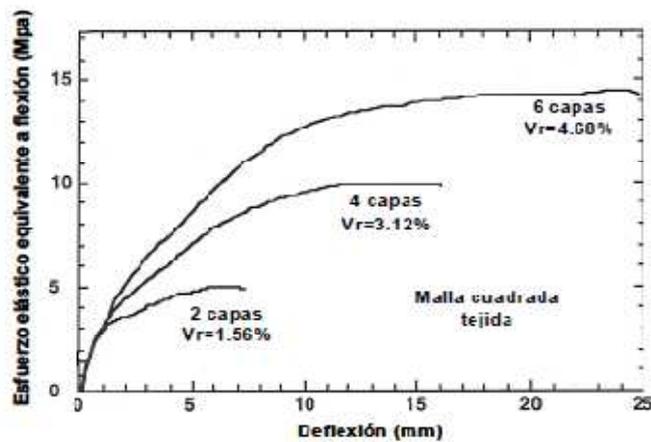
Israel Salcedo A.



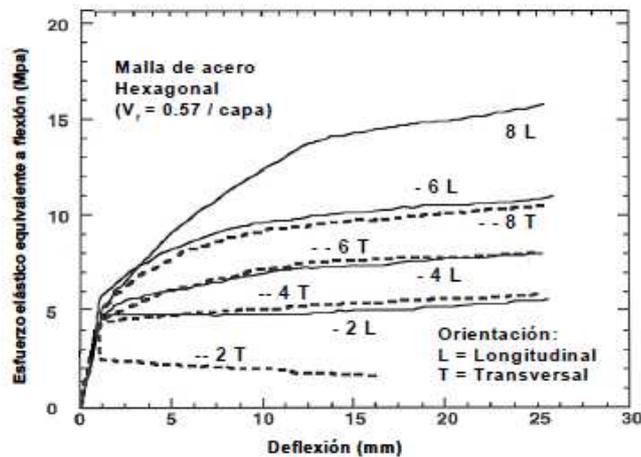
la anisotropía en la respuesta. Las mallas hexagonal y tejida presentan propiedades similares a flexión.



a) Malla cuadrada soldada de acero.



b) Malla cuadrada tejida de acero.



c) Malla cuadrada tejida de acero.

AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.



Figura 33. Respuesta característica a flexión del ferrocemento. [Naaman, 2000]

2.3.3. Resistencia última bajo carga estática

2.3.3.1. Resistencia última a tracción

La capacidad a carga última a tracción del ferrocemento es independiente del espesor del elemento y equivale a la resistencia última de los alambres de refuerzo. El mortero no aporta resistencia a tracción, es frágil y falla. El desempeño del material es expresado más en términos de la carga que en términos del esfuerzo a tracción. Generalmente, la resistencia a tracción del ferrocemento utilizando malla de refuerzo de metal, bien sea soldada, expandida o tejida, en su orientación normal corresponde a la capacidad de carga a tracción del refuerzo; es decir, al producto de la resistencia última por el área efectiva del acero en la dirección considerada. El esfuerzo a tracción correspondiente es igual a la capacidad de carga a tracción, dividida por el área transversal del elemento de ferrocemento.

La carga a tracción es diferente cuando la orientación de los alambres cambia con respecto a la aplicación de la carga (figura 33). Esto sucede cuando se utilizan mallas rectangulares orientadas a 45 grados, malla de metal expandido o hexagonal. En la figura 34, se muestra la variación en la carga última y el factor de eficiencia (η) para algunos tipos de malla de acuerdo con su orientación.

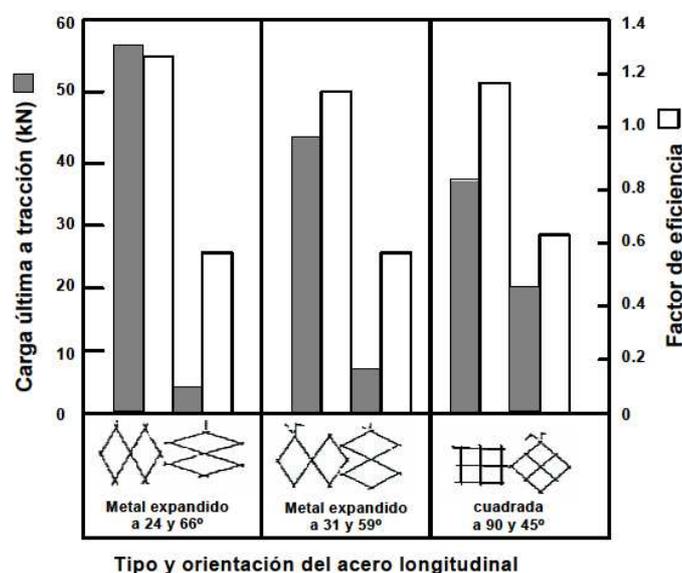


Figura 34. Influencia de la orientación del refuerzo en la resistencia última a tracción en el ferrocemento. [ACI, 1997]

Para las mallas de metal expandido la resistencia en la dirección perpendicular a la orientación normal es únicamente del 15 a 35% de la resistencia en la dirección normal. La resistencia última a tracción para malla soldada, orientada a 45 grados es aproximadamente un 50 o 60 % de la



obtenida en la dirección normal. La malla hexagonal, aunque no se muestra, produce anisotropía en las características de la resistencia última a tracción del ferrocemento.

2.3.3.2. Resistencia última a compresión

En estructuras de ferrocemento, al igual que en otras estructuras basadas en materiales frágiles, la resistencia a compresión es el parámetro más utilizado para calificar el comportamiento de la estructura ante toda clase de solicitaciones, incluyendo tensiones de cortante, flexión y tracción.

La contribución de las fibras de refuerzo puede despreciarse para obtener la resistencia última, debido a que éstas pueden sufrir pandeo. Se ha encontrado experimentalmente que, bajo compresión, la resistencia última es menor que la del mortero puro equivalente. La capacidad a compresión del ferrocemento está ligada a las características geométricas del elemento, de la estructura y a parámetros tales como la relación agua–cemento, finos–cemento y otros discutidos en el capítulo 3. La resistencia a compresión típica en estructuras de ferrocemento es de 30 a 70 Mpa. Es habitual cuando no existen datos disponibles, elegir una resistencia última a compresión de aproximadamente el 85 % de la resistencia del mortero [Naaman, 2000].

2.3.3.3. Resistencia última a flexión

Las metodologías y los principios básicos para obtener la resistencia última a flexión en elementos de hormigón armado han sido aplicados para calcular la resistencia del ferrocemento a flexión [ACI, 1997; Naaman, 2000]. Esta metodología, aunque satisfactoria en algunos casos, únicamente tiene en cuenta el área efectiva de la sección transversal y la posición de las capas de refuerzo con respecto al eje neutro. En esta metodología se desconocen otras variables importantes y únicas en el ferrocemento tales como tipo de refuerzo y orientación, espaciamiento y geometría. Ignorar estas variables no es adecuado, aunque puede ser usada para obtener un acercamiento a la resistencia última.

Para estabilizar el desempeño general del ferrocemento a flexión y eliminar la influencia de las variables anteriores, se ha introducido el factor de eficiencia η , equivalente al seleccionado para la resistencia a tracción.

Aunque el método de la resistencia última depende de la distribución de deformaciones, del modo de falla, del tipo de función esfuerzo–deformación del refuerzo, de los coeficientes del bloque de esfuerzo y de la deformación última del mortero, el factor de eficiencia puede ser aplicado con cualquier método de análisis.

Para entender el comportamiento a flexión del ferrocemento se han desarrollado varios estudios [ACI, 1997]. Las investigaciones fueron hechas sobre mallas seleccionadas previamente (malla cuadrada soldada y tejida, malla de metal expandido y malla hexagonal) con orientación normal (carga



en la dirección longitudinal) y dos niveles de resistencia. La distribución de las capas de refuerzo se supone uniforme en toda la profundidad de la sección. En la figura 35, se compara el desempeño último a flexión del ferrocemento diseñado con este tipo de mallas, respecto a la fracción de volumen de refuerzo total.

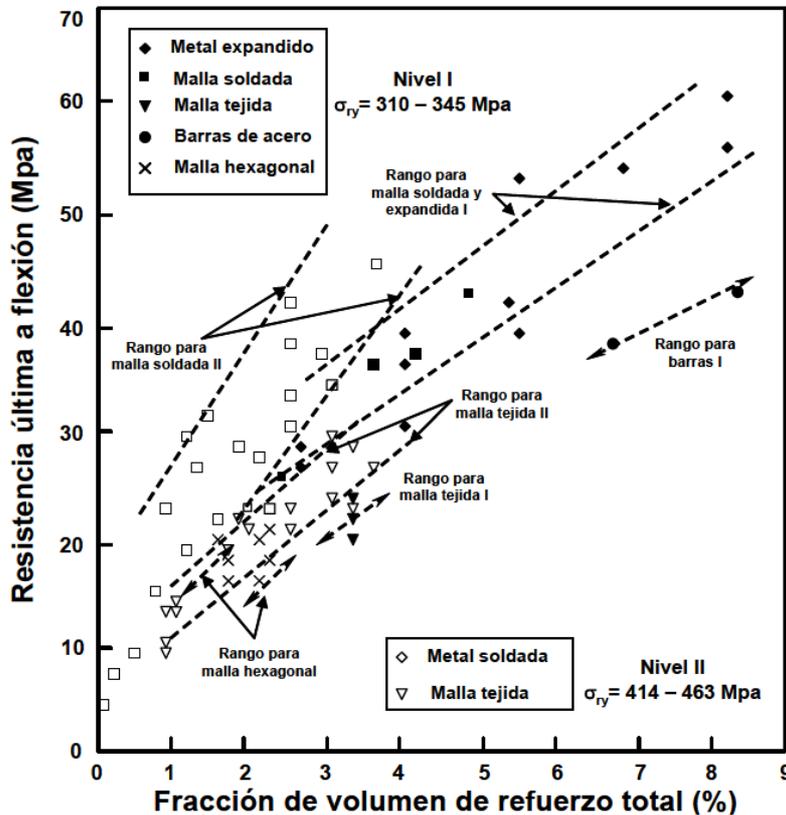


Figura 35. Resistencia última a flexión del ferrocemento. [ACI, 1997]

La malla de metal expandido y la malla cuadrada soldada tienen un desempeño significativamente mejor que la malla tejida o las barras de refuerzo convencional.

La malla tejida y hexagonal tiene un desempeño similar. La malla hexagonal presenta la menor de resistencia a flexión.

En otros estudios [ACI, 1997; Naaman, 2000] se han encontrado otras propiedades de la resistencia última a flexión del ferrocemento con respecto a la orientación del refuerzo y la superficie específica. Mientras la malla cuadrada ofrece igual resistencia en ambas direcciones paralelas a los alambres, la resistencia a flexión, orientada a 45 grados es del 67 ó 80% de la paralela a los alambres. Para mallas de metal expandido la resistencia en la dirección transversal es particularmente baja, 11 a 15%, de la resistencia en la dirección normal. Las mallas de metal expandido y hexagonal presentan un mayor grado de anisotropía en la resistencia última a flexión

AUTORES: Bruno Guzmán D.

Israel Salcedo A.



con el ángulo de orientación. En las mallas hexagonales la resistencia última a flexión en la dirección transversal es, en promedio, un 57% de la resistencia en la dirección normal.

La superficie específica del refuerzo tiene influencia en la resistencia a flexión, cuando se utiliza malla cuadrada tejida con diámetros de alambre mayores a 150 mm. Sin embargo, en mallas cuadradas soldadas y tejidas con diámetros menores no se ha encontrado ningún efecto [ACI, 1997]. Es apropiado garantizar la adherencia entre el refuerzo y la matriz de mortero.

La orientación del refuerzo es tan importante para la resistencia a flexión como para la resistencia a tracción, particularmente cuando existe carga biaxial. En general la elección óptima del refuerzo para flexión está predeterminada por la resistencia a tracción y esencialmente depende de si es cargada uniaxial o biaxialmente. La malla cuadrada soldada es la mejor elección para cargas biaxiales. Cuando se utilice malla de metal expandido o malla hexagonal bajo estas condiciones, es apropiado alternar las direcciones de las capas de refuerzo para contrarrestar su anisotropía característica.

Otra consideración que gobierna la elección del refuerzo es la habilidad de adaptarse fácilmente a las curvaturas del diseño arquitectónico a construir.

La malla de metal expandido es conveniente para secciones planas, la malla cuadrada para secciones de simple curvatura y la malla hexagonal, para secciones complejas y de doble curvatura.

2.3.3.4. Resistencia última a cortante y punzonamiento

Son pocos los estudios de los muchos que se han hecho sobre ferrocemento que han incluido la evaluación de la resistencia a cortante. El ferrocemento ha sido usado principalmente en paneles de pared delgada en donde la relación altura-longitud en flexión es bastante mayor, y de una u otra manera el esfuerzo cortante no gobierna el criterio de falla [Mansur et al, 2001]. Además, los elementos estructurales de ferrocemento contienen una alta fracción de volumen de mallas de refuerzo que contribuyen a la acción cortante.

Las capas de malla en el ferrocemento proporcionan el refuerzo a cortante, equivalente a las barras transversales en el hormigón armado. El ferrocemento no tiene particularmente refuerzo a cortante, tal como sucede en losas delgadas de hormigón armado.

Las propiedades y algunas ecuaciones para el diseño a cortante en elementos de ferrocemento se han propuesto de manera similar al hormigón armado. La ecuación 16, permite obtener la resistencia a cortante.



$$v_c = \frac{\sqrt{f'_c}}{6} \quad (16)$$

Donde, v_c es la resistencia promedio nominal a cortante, proporcionada por la matriz de mortero y f'_c es la resistencia a compresión del mortero.

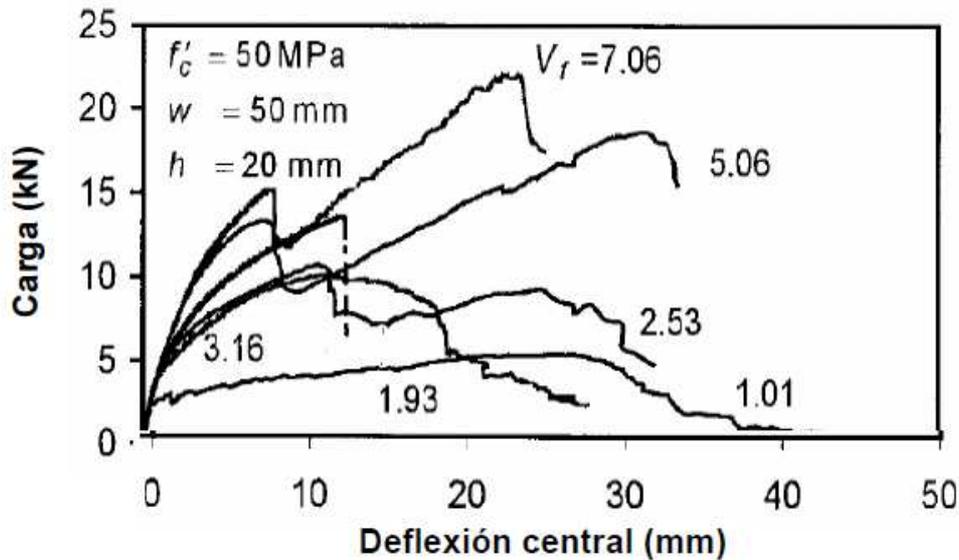
Para el diseño de ferrocemento la sección crítica para cortante puede ser tomada a una distancia d_{ex} , desde la parte superior a compresión del elemento, hasta la capa extrema de refuerzo a tracción. El comité ACI [ACI, 1997], propone la resistencia a cortante del ferrocemento como un 32% de la resistencia a flexión.

Punzonamiento en losas de ferrocemento

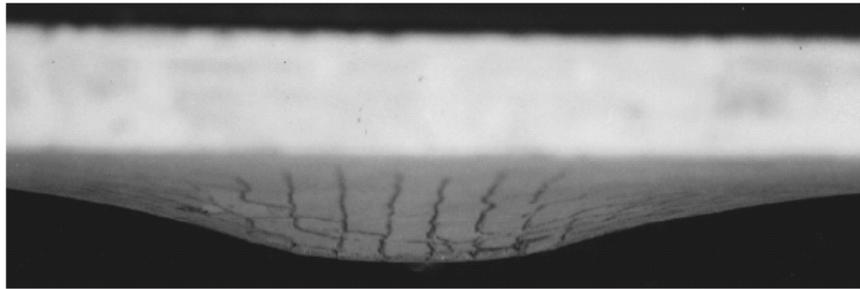
Un número de estructuras en ferrocemento, tales como losas o cubiertas, están expuestas a cargas puntuales o concentradas, generando punzonamiento en un área determinada. Algunas investigaciones recientes [Mansur et al, 2001], han permitido entender el comportamiento de la cortante por punzonamiento en losas de ferrocemento. Los parámetros estudiados fueron el ancho efectivo de la carga w , la resistencia del mortero f'_c , la fracción de volumen de refuerzo V_f , el espesor h y la longitud efectiva de la losa l . La resistencia a cortante por punzonamiento incrementó con el aumento de w , f'_c , V_f o h , pero disminuyó con el aumento de longitud efectiva l . El perímetro crítico de la cortante por punzonamiento se localizó a una distancia de $1.5 h$. La ecuación 17, permite predecir la resistencia a cortante por punzonamiento v_{ps} en elementos de ferrocemento.

$$v_{ps} = 0.39 \left(f'_c V_f \frac{h}{l} \right)^{0.5} \quad (17)$$

En la figura 36, se muestra el comportamiento a punzonamiento de losas de ferrocemento con diferentes fracciones de volumen de refuerzo.



a) Carga de punzonamiento vs. deflexión central. [Mansur et al, 2001]



b) Losa de ferrocemento sometida a punzonamiento. [Mansur et al, 2001].

Figura 36. Comportamiento a cortante del ferrocemento por punzonamiento.

2.3.4. Comportamiento bajo cargas repetitivas

Los materiales constituyentes del ferrocemento tienen diferentes características bajo cargas de fatiga y/o bajo cargas cíclicas. El acero, sometido a este tipo de acciones tiene definido el límite de endurecimiento, mientras que el mortero no lo tiene definido y probablemente falle ante cargas repetidas. El comportamiento a fatiga y a cargas cíclicas puede estar gobernado por cualquiera de los materiales constitutivos del ferrocemento.

2.3.4.1. Flexión bajo carga de fatiga

Las cargas de fatiga en flexión incrementan gradualmente la deflexión y el ancho de las grietas y disminuyen la rigidez. El rápido aumento de la deflexión y el ancho promedio de las grietas preceden a la falla del elemento.

AUTORES: Bruno Guzmán D.

Israel Salcedo A.



En la figura 37, se muestra el comportamiento típico carga–deformación del ferrocemento sometido a fatiga en flexión.

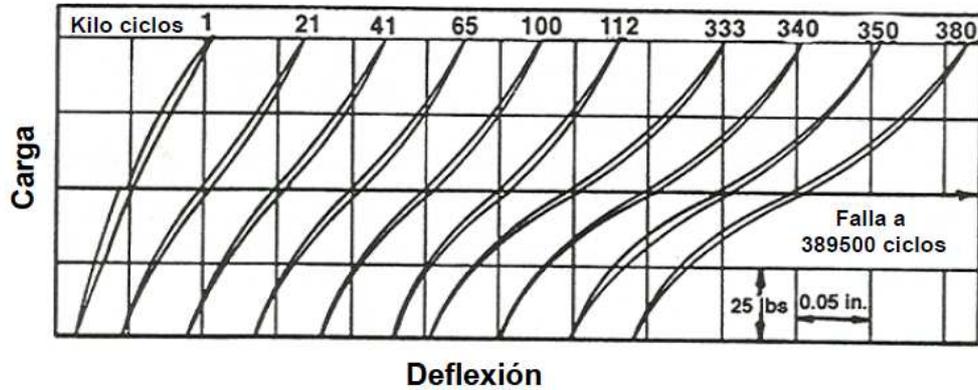


Figura 37. Comportamiento típico carga – deflexión, bajo carga cíclica de fatiga del Ferrocemento. [Balaguru et al, 1979]

La vida del ferrocemento a fatiga, en flexión, está gobernada por las propiedades de la malla a fatiga en tracción (en las capas exteriores), similar al caso de vigas de hormigón armado. En algunas investigaciones se ha observado que para fracciones de volumen de refuerzo entre 2 y 6%, la falla en especímenes de ferrocemento sujetos a fatiga en flexión, generalmente ocurre debido a la fatiga de la malla a tracción [Balaguru, 1979; Naaman2000]. Los estudios fueron hechos en mallas de acero cuadradas, soldadas y tejidas y permitieron obtener expresiones para predecir algunos parámetros.

La ecuación 18, permite estimar los esfuerzos bajo fatiga.

$$\Delta\sigma_{sr} = 1050 - 134.5 \log_{10} N_f \tag{18}$$

Donde, $\Delta\sigma_{sr}$ es el rango límite de esfuerzos de la capa de malla de acero más externa en Mpa, y N_f es el número de ciclos hasta la falla. Por otra parte, bajo cargas de fatiga de amplitud constante, la deflexión, el ancho promedio de grietas y el máximo ancho promedio de grietas aumentan con el número de ciclos de carga. La ecuación 19, tiene en cuenta estos efectos:

$$Y = A e^{Br} \tag{19}$$

Donde, Y representa la deflexión, el ancho promedio de grieta o el máximo ancho de grieta; r está definido como: N / N_f y N es el número de ciclos en que se desea calcular Y . A es el valor de la variable de interés (deflexión o ancho de grieta) predicho bajo carga estática o en el primer ciclo y B es una



constante determinada desde los datos experimentales. Para $\geq 450.000 N f$, se sugiere $B = 1.67$ para el ancho de grieta y $B = 0.67$ para la deflexión. En la figura 38, se muestra el efecto del número de ciclos de carga en el ancho máximo de grieta.

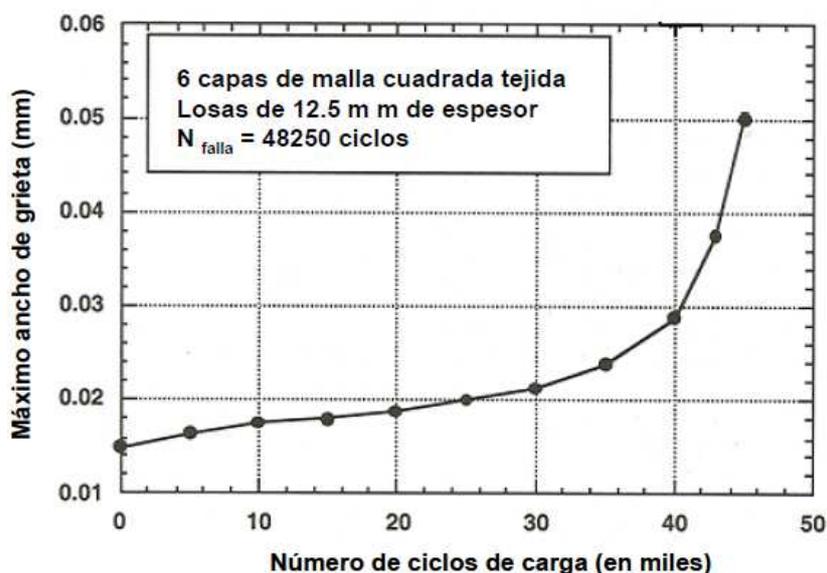


Figura 38. Incremento típico del ancho de grieta con el número de ciclos de carga aplicados. [Naaman, 2000]

A la hora de elegir el refuerzo para un desempeño óptimo del ferrocemento se debe considerar el tipo de carga a las cuales va a ser sometido. Las cargas de fatiga difieren de las cargas estáticas. Las mallas cuadradas soldadas han mostrado mejores resultados que las mallas cuadradas tejidas para cargas estáticas, en cambio las mallas tejidas han tenido un desempeño favorable bajo esfuerzos de fatiga. En las mallas soldadas la falla bajo carga de fatiga es predominante en las uniones soldadas.

En el caso de las mallas de metal expandido la falla ocurre habitualmente en los nodos o uniones. La malla hexagonal, habitualmente no exhibe regiones de falla preferencial y puede ofrecer ventajas similares a la malla tejida. En general, el comportamiento del acero a la fatiga sugiere que cualquier factor (soldadura, galvanizado, entrelazados, uniones, etc.) que afecte su superficie final, afecta también su comportamiento en fatiga.

2.3.4.2. Comportamiento bajo cargas cíclicas

Igual que otras propiedades del ferrocemento el comportamiento bajo cargas cíclicas ha sido poco investigado. El ferrocemento posee buenas características dinámicas y ha mostrado ser un material con un gran potencial para aplicaciones vibratorias. Hajj (1981), ha estudiado el comportamiento a flexión y cortante en losas de ferrocemento sujetas a cargas cíclicas en el plano y fuera del plano, con fines de construir una mesa vibradora en ferrocemento y donde se probaran estructuras a escala real y

AUTORES: Bruno Guzmán D.

Israel Salcedo A.

de diferentes materiales. Las investigaciones se hicieron en losas de ferrocemento construidas utilizando dos tipos de malla (soldada y tejida), cuatro ángulos de orientación para las mallas de refuerzo (0, 15, 30 y 45°) y varias combinaciones (agua-cemento y arena-cemento) para el diseño del mortero. El tamaño de los especímenes fue de 3.66 m x 2.74 m y 19 milímetros de espesor para la placa entre vigas de 0.33 m de alto. En la figura 39, se muestra la curva carga-deformación para este tipo de losas sometidas a ciclos de carga y descarga en su centro (fuera del plano).

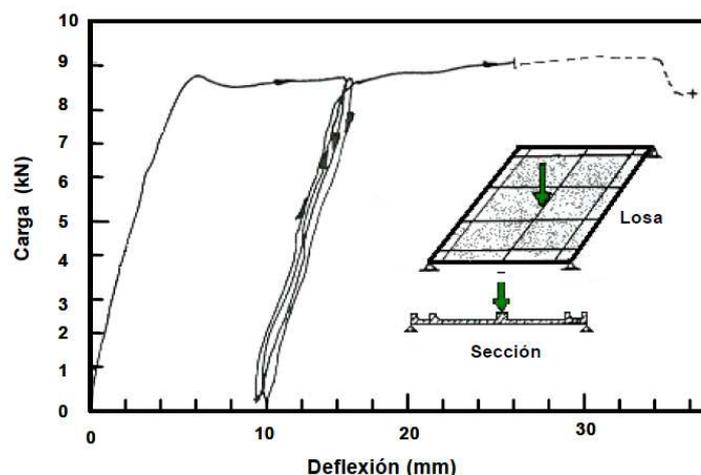
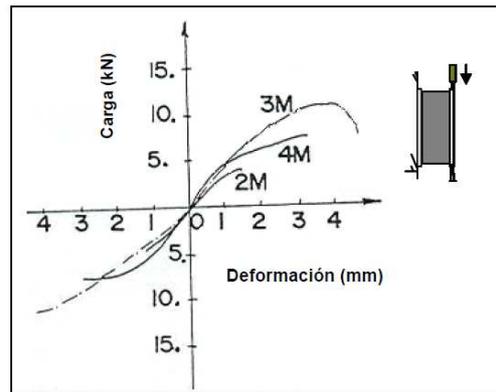


Figura 39. Comportamiento de losas de ferrocemento bajo ciclos carga y descarga. [Hajj, 1981]

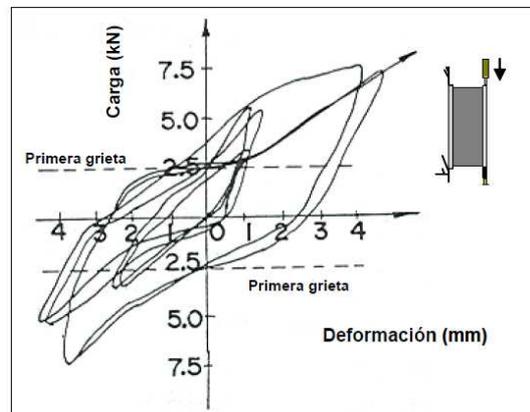
Idealmente, el comportamiento fue elasto-plástico y presenta casi las mismas propiedades para la rigidez en los primeros ciclos de carga y antes de la primera grieta. Las losas a flexión mostraron buena ductilidad y los niveles de esfuerzos permanecieron esencialmente constantes hasta la falla.

Cuando se desea conocer la respuesta de una estructura sometida a cargas generadas por un terremoto es necesario conocer su comportamiento bajo acciones dinámicas aleatorias. El ferrocemento ante cargas cíclicas ha mostrado un comportamiento elástico estable y degradación de rigidez. Para estudiar este fenómeno, Hajj (1989) investigó el comportamiento a cortante en el plano de placas de ferrocemento.

En la figura 40, se muestra la curva carga-deformación para este tipo de placas. A carga última las losas presentaron un leve aumento de la rigidez inicial con el incremento de la fracción de volumen de refuerzo y las propiedades del mortero (ver 40a). En la figura 40b, se aprecia el comportamiento histerético de las losas hechas en ferrocemento. La degradación de rigidez inicial es aproximadamente un 50% del valor último e incrementa gradualmente hasta la falla.



a) Carga de última en losas de ferrocemento bajo cortante en el plano



b) Comportamiento histerético del ferrocemento

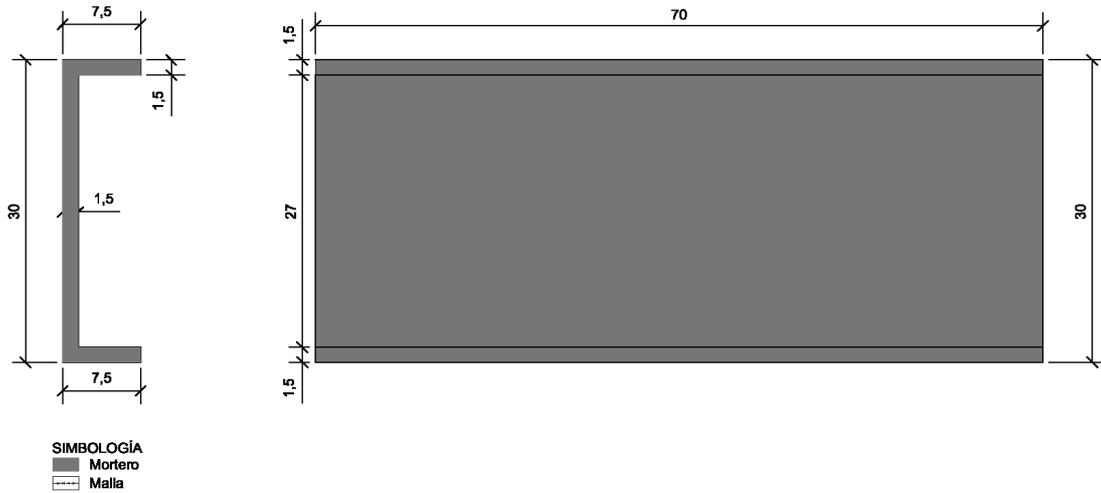
Figura 40. Comportamiento a cortante en el plano del ferrocemento debido a cargas cíclicas. [Hajj, 1981]

CAPITULO 3

3.1. DISEÑO Y FABRICACION DE ELEMENTOS SOMETIDOS A FLEXIÓN, TRACCIÓN Y COMPRESIÓN SEGÚN LA NORMATIVA ACI-549.R-18 Y ACI-318 PARA SECCIONES TIPO C FABRICADOS EN FERROCEMENTO.

3.1.1. DISEÑO DE ELEMENTO TIPO DE FERROCEMENTO.

Los elementos de ferrocemento que se van a diseñar son de sección c con las siguientes medidas:



El diseño del elemento de ferrocemento está regido por el método de resistencia de materiales es cual dice: El material sometido a elongación y contracción sigue la ley de Hooke; pero los módulos de elasticidad en tracción y compresión son diferentes. El material se considera homogéneo aun después del agrietamiento considerándose la sección completa del elemento, sin embargo en esta parte solo consideraremos diseño en el rango elástico.

A continuación se indica el diseño y las formulas utilizadas:

Las tablas siguientes muestran las medidas de la sección y las constantes mecánicas de la misma:

	mm	cm	m
b	15,00	1,50	0,015000
h	300,00	30,00	0,300000
c1	75,00	7,50	0,075000
t1	15,00	1,50	0,015000
c2	75,00	7,50	0,075000



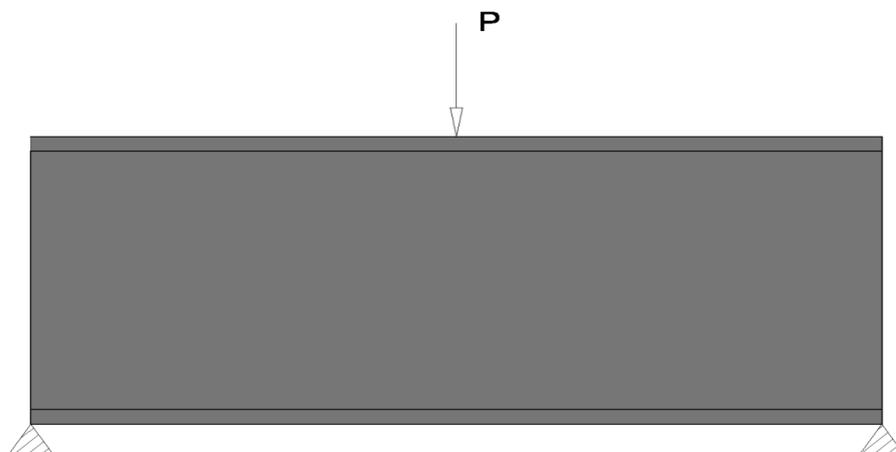
t2	15,00	1,50	0,015000
L	700	70	0,700000

Medidas de la Sección

	mm	cm	m
Área	6300,00	63,00	0,006300
y media	150,00	15,00	0,150000
x media	18,21	1,82	0,018214
I x-x	70292812,50	7029,28	0,0001
I y-y	1301785,71	130,18	0,0000
rx	105,63	10,56	0,1056
ry	14,37	1,44	0,0144
Sx	468618,75	468,62	0,0005
Sy	71470,59	71,47	0,0001

Constantes mecánicas del perfil

El elemento se diseña como una viga a flexión por el método de resistencia de materiales, además de este ensayo se puede obtener los esfuerzos de tracción y compresión que puede soportar el elemento, por lo tanto se procede como sigue:



Aplicación de la carga en el elemento.

El diseño parte del comportamiento del elemento sometido a una carga como muestra la figura anterior a continuación se muestra una tabla con los datos asumidos:

Datos	valor	unidad
Fs	1,4	
P	3100	kg
Γ mortero	2400	kg/m ³

AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.

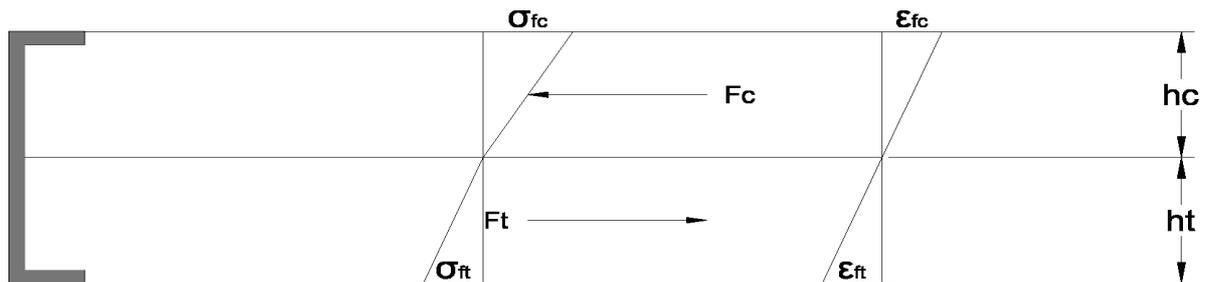


Rb	27	kg/cm ²
σ _b	270	kg/cm ²

Datos asumidos

Se procede con el diseño:

Flexión en secciones C: en la figura se representa la variación de las tensiones a lo alto de la sección, en el caso más general:



Tensiones y de flexiones en el elemento de ferrocemento tipo C.

A continuación se procede a calcular el efecto de las cargas vivas y muertas, siendo Q_{pp} el efecto de la carga muerta o permanente debida a l peso propio y Q_{ac} , el efecto de la carga viva o actuante que en nuestro caso es la carga puntual supuesta, el cálculo se muestra a continuación:

Efecto de carga muerta:

$$Q_{pp} = A \times L \times \gamma_{mortero}$$

Donde:

A es el área del elemento.

L es la longitud del elemento respectivamente.

El momento producido por la carga permanente se calcula como sigue:

$$M_{pp} = \frac{Q_{pp} \times L^2}{8}$$

Efecto de la carga viva:

$$Q_{ac} = F_s \times P$$

AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Donde:

P es la carga actuante.

Fs es el factor de seguridad que en nuestro caso tiene un valor de $F_s = 1,4$.

El momento producido por la carga actuante se calcula de la siguiente manera:

$$M_{ac} = \frac{Q_{ac} \times L}{4}$$

A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos:

Resultados		
Qac	4340	kg
Qpp	15,12	kg/m
Mac	759,5	kg-m
Mpp	0,9261	kg-m
MT	760,4261	kg-m

Resultados Obtenidos.

Al final se calcula el momento total (MT) que es la suma del momento de la carga permanente mas el momento de la carga actuante.

A continuación se procede a calcular el esfuerzo en la parte traccionada (σ_{ft}) del perfil:

$$M_t = \sigma_{ft} \times W$$

Donde:

σ_{ft} es la tensión de tracción.

W es el módulo de sección del perfil.

Los resultados se muestran a continuación:

σ_{ft}	162,27	Kg/cm ²
σ_{ft}	16,23	MPa

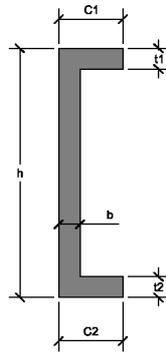
Resultados Obtenidos.

Como σ_{ft} es mayor que 70 Kg/cm² por lo tanto se considera agrietado y se toma $\eta = 4$.

AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.



Por el método de resistencia de materiales se tiene que:



De la figura “Tensiones y de flexiones en el elemento de ferrocemento tipo C” se tiene:

$$E_{fc} \neq E_{ft}$$

Las ecuaciones de equilibrio a cumplir son:

$$\int_A \sigma dA = 0$$

$$\int_A \sigma dA = M$$

La expresión para la tensión máxima a compresión o tracción vendrá dada por:

$$\sigma_{fc} = \varepsilon_{fc} E_{fc}$$

$$\sigma_{ft} = \varepsilon_{ft} E_{ft}$$

Pero como $\varepsilon_c = hc/\rho$ y conociendo que $\varphi = hc/\rho$ sustituyendo en las ecuaciones anteriores:

$$\sigma_{fc} = \frac{E_{fc} h_c}{\rho} \sigma_{ft} = \frac{E_{ft} h_t}{\rho}$$

Para la sección tipo C la ecuación de equilibrio de fuerzas se desarrolla como sigue:

$$\frac{1}{2} \sigma_{fc} h_c b + \sigma_{fc} (b - b_1) \times t_1 = \frac{1}{2} \sigma_{ft} h_t b + \sigma_{ft} (b - b_2) \times t_2$$

Sustituyendo σ_{ft} y σ_{fc} en la ecuación de equilibrio de fuerzas se tiene que:



$$\frac{b_1 - b}{b} = \beta_1 \frac{b_2 - b}{b} = \beta_2 \frac{t_1}{t} = \gamma_1 \frac{t_2}{t} = \gamma_2$$

$$\eta = \frac{E_{fc}}{E_{ft}} \gamma h = h_c + h_t$$

Resolviendo la ecuación de la línea neutra queda como:

$$h_c^2 \left(\frac{\eta - 1}{2h} \right) + h_c (\eta \beta_1 \gamma_1 + \beta_2 \gamma_2 + 1) - h \left(\frac{1}{2} + \beta_2 \gamma_2 \right) = 0$$

A continuación se muestra una tabla con los resultados:

Resultados		
hc	8,64	cm
ht	21,36	cm

Resultados que muestran la línea neutra.

La ecuación de equilibrio de momentos se desarrolla como sigue:

$$M = \frac{1}{2} \sigma_{fc} h_c b \frac{2}{3} h_c + \sigma_{fc} (b - b_1) \left(h_c - \frac{t_1}{2} \right) \times t_1 + \frac{1}{2} \sigma_{ft} h_t b \frac{2}{3} h_t + \sigma_{ft} (b - b_2) \left(h_t - \frac{t_2}{2} \right) \times t_2$$

De las relaciones geométricas de la figura “Tensiones y de flexiones en el elemento de ferrocemento tipo C” se tiene que:

$$\sigma_{fc} = \eta \sigma_{ft} \frac{h_c}{h_t}$$

Reemplazando σ_{fc} en la ecuación de equilibrio de momentos obtenemos:

$$M = W \sigma_{ft} W_w$$

Donde:

$$W_w = \frac{6}{h_t} \left[\frac{\eta h_c^3}{3h^2} + \frac{\eta h_c}{h} \beta_1 \gamma_1 \left(h_c - \frac{t_1}{2} \right) + \frac{h_t^3}{3h^2} + \beta_2 \gamma_2 \left(h_t - \frac{t_2}{2} \right) \frac{h_t}{h} \right]$$



Ww es un factor que corrige el módulo de sección, reemplazando los datos obtenidos se tiene que:

Resultados	
β1	4
β2	4
γ1	0,05
γ2	0,05
Ww	2,62

Resultado DeWw, coeficiente que corrige el modulo de sección

Con este resultado se calcula la tensión máxima de tracción que puede soportar el perfil:

$$\sigma_{ft} = \frac{M}{W \times W_w}$$

La tensión máxima de tracción que puede soportar la sección es:

σft	62,01	kg/cm2
σft	6,20	MPa

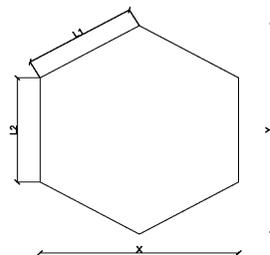
Tensión máxima atracción que admite la sección

A partir de estos datos se procede a diseñar el elemento como si estuviera sometido a tracción directa, como el área del elemento ya está definida se procede a seleccionar una malla que cumpla con los parámetros requeridos de superficie especifica y volumen de refuerzo.

Como la resistencia del mortero a tracción es del 10% al 15 % de la resistencia a compresión se tiene que Rb= 10% f'c y como se diseño un mortero de 270kg/cm2 se tiene que Rb = 27 kg/cm2.

Se procede a seleccionar la malla de refuerzo:

Seleccionamos una malla hexagonal con las siguientes características:



Malla hexagonal seleccionada

Datos de Malla Hexagonal



X	15	mm
Y	19	mm
d	0,56	mm
L1	10,61	mm
L2	4	mm
Ea	15900000	kg/cm2
Ra	2200	kg/cm2
u	1	eficiencia

Características de la malla seleccionada (Anexo A2).

Se calcula la resistencia al agrietamiento con la fórmula que sigue:

Se toma como tensión de agrietamiento (σ_{agr}) la tensión de tracción máxima obtenida (σ_t), entonces $\sigma_{agr} = 62,01 \text{ kg/cm}^2$.

$$\sigma_{agr} = K S_l - R_b$$

Donde:

K: es un coeficiente que depende de varios factores, entre otros del árido utilizado, el curado, el tipo de malla y su orientación, el tipo de sollicitación, etc. De no disponer de otros valores de K, se recomienda tomar 20 N/mm (245 Kg.mm/cm²) para tracción directa y 35 N/mm (430 Kg.mm/cm²) para flexión. Y para compresión se tomará 250 N/mm (280 Kg.mm/cm²) tanto para compresión directa como para compresión en flexión. Como el elemento se diseña a flexión se tiene que $K = 430 \text{ Kg.mm/cm}^2$

SL: es la superficie específica en mm⁻¹

Rb: es la resistencia a tracción del mortero

Calculamos la superficie específica como sigue:

$$S_l = \frac{\pi \times d \times n(4L_1 + 2L_2)}{x \times y \times t}$$

Donde:

d: es el diámetro de la malla

n: es el número de mallas

t: es el espesor del elemento

X, Y, L₁ y L₂ son parámetros de la malla mostrados en la figura #.

Se tiene:

AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.



$$S_l = 0,021nmm^{-1}$$

Reemplazando los valores en la expresión de tensión de agrietamiento y despejando el número de mallas:

$$62,10 = 430 \times 0,021n - 27$$

Obtenemos $n = 3,92 \approx 4$ mallas.

Se procede a comprobar los parámetros antes mencionados:

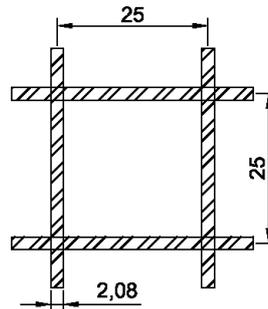
Superficie específica:

$$S_1 = \frac{\pi \times d \times n(4L_1 + 2L_2)}{x \times y \times t} = 0,083 \text{ mm}^{-1} > 0,05 \text{ mm}^{-1} \text{ sicumple}$$

Con las 4 mallas el elemento cumple con los requerimientos de superficie específica.

Volumen de refuerzo:

Se colocó una malla cuadrada soldada que servirá como armazón para el elemento de ferrocemento, la malla tiene las siguientes características:



Malla cuadrada

Malla soldada		
a	25	mm
b	25	mm
d	2,08	mm

Características de la malla soldada (Anexo A1)

El volumen de refuerzo estará compuesto por el volumen de refuerzo de la malla de armazón más el volumen de refuerzo de la malla de refuerzo y se calcula de la siguiente forma:



Para malla de armazón cuadrada:

$$\rho_{\square\square} = \frac{d \times n^2 \times a \times 50}{t \times a}$$

Donde:

d: es el diámetro de la malla

n: es al número de mallas

a : es el espaciamiento entre alambres de la malla, como es cuadrada a=b.

t: es el espesor del elemento.

Reemplazando valores se tiene:

$$\rho_{\square\square} = \frac{d \times n^2 \times a \times 50}{t \times a} = 1,81 \%$$

Para malla hexagonal:

$$\rho_{\square h} = \frac{d \times n^2 \times (4L_1 + 2L_2) \times 25}{t \times X \times Y}$$

Donde:

d: es el diámetro de la malla

n: es el número de mallas

t: es el espesor del elemento

X, Y, L₁ y L₂ son parámetros de la malla mostrados en la figura #.

Reemplazando valores se tiene:

$$\rho_{\square h} = \frac{d \times n^2 \times (4L_1 + 2L_2) \times 25}{t \times X \times Y} = 1,16\%$$

El volumen de refuerzo total se calcula como sigue:

AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

$$\sigma_{\sigma} = \sigma_{\sigma\sigma} + \sigma_{\sigma h} = 2,97\% > 1,8\%$$

Con 4 mallas el elemento cumple con el requerimiento de volumen de refuerzo

Calculamos la tensión de agrietamiento que soportaría con 4 mallas:

$$\sigma_{\sigma\sigma\sigma} = \sigma_{\sigma\sigma} - \sigma_{\sigma}$$

$$\sigma_{\sigma\sigma\sigma} = 340 \times 0,083 - 27 = 62,70 \frac{\sigma\sigma}{\sigma\sigma 2} > 62,10 \frac{\sigma\sigma}{\sigma\sigma 2}$$

Como se puede ver la sección y el número de mallas son correctos ya que cumplen con todos los requisitos de diseño.

3.1.2. MATERIALES UTILIZADOS:

3.1.1.1. Cemento portland tipo 1: Este tipo de cemento es de uso general, y se emplea cuando no se requiere de propiedades y características especiales que lo protejan del ataque de factores agresivos como sulfatos, cloruros y temperaturas originadas por calor de hidratación.

Entre los usos donde se emplea este tipo de cemento están: pisos, pavimentos, edificios, estructuras, elementos prefabricados.



Para nuestra práctica utilizaremos material de la marca nacional GUAPAN.

3.1.1.2. Mallas fabricadas por la industria Ideal - Alambrec: Se utilizaron dos tipos de mallas (Ver Anexo A).

AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.



Hexagonal de 1/2´: La Malla Hexagonal, también conocida como la tradicional malla de gallinero está fabricada con alambre galvanizado para una excelente resistencia al entorno. La triple torsión con la que están tejidos los alambres formando un hexágono, le otorga rigidez y resistencia.

Ventajas:

- Durabilidad y forma estable.
- Flexibilidad.
- Excelente relación costo y beneficio.
- Bajo impacto ambiental.
- Versátil



Soldada Cuadrada 1´x 1´: Esta malla está fabricada con alambres redondos electro soldados entre sí. Se caracteriza por ser una solución económica y resistente. Su triple protección de zinc le asegura una gran duración si se encuentra a la intemperie.

Ventajas

- Anclaje efectivo en el concreto por sus uniones sólidas.
- Se corta fácilmente.
- Si la aplicación que se necesita no es plana, este material brinda un servicio de doblado para adaptar la malla al uso que el proyecto requiera.



3.1.2.1. Arena.



La arena fue obtenida de la cantera CONSAG, la cual es extraída de un sector denominado la josefina ubicado en la vía Cuenca – El Descanso – Paute.

3.1.2.2. Madera para encofrado.



Se mandó a cortar un total de 56 piezas a medida, las cuales sirvieron para la construcción de 7 moldes.

3.1.3. Procedimiento para la fabricación de las secciones:

3.1.3.1. Armado de los cofres.



Dos cajones uno externo y otro interno, para formar la sección C.

3.1.3.2. Confección de la armadura.

AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.



Se corta la malla soldada a medida y se dobla de tal forma que cumpla con las dimensiones establecidas en el diseño, esta actuará como el esqueleto para la armadura.



Se coloca las 4 mallas hexagonale alrededor de la soldada (2 arriba y 2 abajo) con la ayuda de amarres con alambre galvanizado # 20.



Se finaliza comprobando que la armadura no tenga problemas de medidas, amarres y / o colocación en el cofre.



3.1.1.3. Mortero: Los morteros están habitualmente compuestos por un solo árido fino, lo cual trae como consecuencia que algunas de sus principales condiciones estén definidas y ligadas a las propiedades de dicho árido.

Los siguientes alcances debes estar siempre presentes al efectuar la dosificación del mortero:

- La granulometría de este árido único condiciona en forma importante la consistencia del mortero, ya que no es posible efectuar los ajustes granulométricos que permite la existencia de varios áridos. Esto hace necesario muchas veces la adición de cal hidráulica para controlar esta característica.
- El contenido de huecos del árido condiciona la resistencia del mortero, pues el mortero no resulta compacto si la suma de volúmenes absolutos de cemento y agua no rellenan dichos huecos (Egaña y Zabaleta 1989).

Granulometría del material: Para la elaboración del mortero se empleó arena, la cual se obtuvo de la cantera CONSAG, Se usó arena que pasa bajo el tamiz N°4 (de abertura 4,76 mm), siguiendo las disposiciones de la norma de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM C 33).

Datos:

Peso Arena Humedad (gr)	800
Peso Arena Seca (gr)	757





Se tamiza la arena a utilizar con el fin de obtener su módulo de finura y el tamaño de las partículas.

Valores obtenidos:

Granulometría Arena						
Nº	Tamiz Abertura (mm)	Peso Ret. (gr)	Peso Ret Corregido (gr)	Peso Ret. Acum (gr)	%Ret. Acum.	%Pasa
4	4,76	17,40	17,40	17,4	2,3	97,7
8	2,38	40,00	40,00	57,4	7,6	92,4
30	0,59	256,00	263,90	321,3	42,4	57,6
50	0,297	248,80	248,80	570,1	75,3	24,7
100	0,149	150,60	150,60	720,7	95,2	4,8
200	0,074	24,80	21,90	742,6	98,1	1,9
Fondo		11,50	14,40	757,0	100,0	0,0
Total=		749,10				

Perdida(gr) por lavado T#200 (gr)	2,90
--------------------------------------	------

Error (gr)	7,9
------------	-----

AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.



% Error	1,04
---------	------

Módulo de finura: El módulo de finura es el valor correspondiente a la centésima parte de la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices de la serie preferida. Se calcula tanto para arenas como para gravas o áridos totales. Cuanto mayor es el módulo de finura más grueso es el material. Ahora, apegándonos a la norma anteriormente citada, tenemos que el módulo de finura se expresa como:

$$MF = 6 - \left(\frac{\sum \text{porcentaje retenido}}{\% \text{ retenido en tamiz \#4}} \right)$$

$$MF = 6 - \left(\frac{279,1}{97,7} \right)$$

$$MF = 2.8567 \approx 2.86$$

Tamaño de las partículas: La siguiente tabla muestra los límites de tamaño de suelo separado desarrollados por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y del Transporte (AASHTO), el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos, y la Oficina de Restauración de Estados Unidos. En esta tabla, el Sistema MIT se presenta únicamente para fines ilustrativos porque juega un papel importante en la historia del desarrollo de los límites de tamaño de suelo separado. Sin embargo, en la actualidad el Sistema Unificado es casi universalmente aceptado. El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) ha sido adoptado por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM).

Las *partículas* de arena están formadas principalmente de cuarzo y feldespatos, aunque también están presentes, a veces otros granos minerales.



Tabla 1.1 Límites de tamaño de suelos separados.

Nombre de la organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)	> 2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	< 0.002
Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA)	> 2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	< 0.002
Asociación Americana de Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	< 0.002
Sistema unificado de clasificación de suelos (U.S. Army Corps of Engineers; U.S. Bureau of Reclamation; American Society for Testing and Materials)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (es decir, limos y arcillas) < 0.075	

Cantidad de agua del mortero: En general, cualquiera sea el método de dosificación (proporciones o requisitos), la dosis de agua queda definida por la trabajabilidad que debe tener el mortero para ser colocado en obra dependiendo al uso que esté destinado.

En obras de nivel medio o bajo **como es el caso de nuestra práctica**, este aspecto queda a criterio del albañil, puesto que él recibe los materiales en seco y va agregando agua a medida que lo va necesitando.

AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.



Vale presentar que para obras de mejor calidad, el mortero se mezcla generalmente en equipos mecánicos, para distribuirlo totalmente preparado a los albañiles. Para este caso, la cantidad de agua puede estimarse a través de la fluidez necesaria del mortero (medida en la mesa de sacudidas o con el cono de Abrams), de las propiedades de la arena (módulo de finura y tamaño máximo) y del porcentaje de cal que tendrá el mortero. Las siguientes tablas señalan los procedimientos descritos (Egaña y Zabaleta, 1989):

	MF = 3,20			MF = 2,70			MF = 2,20			MF = 1,80			H
% cal	<25	25-50	>50	<25	25-50	>50	<25	25-50	>50	<25	25-50	>50	

ARENA TAMAÑO MÁXIMO 5 mm

fluidez	Dosis de agua y aire (lt/m ³)												
baja	260	265	270	280	285	290	310	315	320	350	355	360	30
media	270	275	280	290	295	300	320	325	330	360	365	370	30
alta	290	295	300	310	315	320	340	345	350	380	385	390	40
muy alta	310	315	315	330	335	340	360	365	370	400	405	410	40

Determinación de la dosis de agua y aire (lt/m³) de un mortero

MF=Modulo de finura de la Arena.

H=Contenido mínimo de aire para un mortero compacto.

Fluidez	Asentamiento Cono	Mesa de Sacudidas ASTM
Baja	0 - 2 cm	≤ 130 mm
Media	3 - 8 cm	140 - 175 mm
Alta	9 - 14 cm	180 - 195 mm
muy alta	15 - 20 cm	200 - 220 mm

Criterio de fluidez adoptado



3.1.4. Diseño de mortero:

3.1.4.1. Resistencia Requerida.

Como se desea un mortero de resistencia de 350 kg/cm² o 35 MPa se procede a calcular la resistencia requerida en laboratorio:

$$F_c = \frac{f'c \times 9,7}{0,9}$$

Donde:

f'c: es la resistencia esperada en obra

Reemplazando los datos se tiene que la resistencia que debe resistir el mortero será:

$$F_c = \frac{35 \times 9,7}{0,9} = 49,99 \approx 50MPa$$

3.1.4.2. Aditivo y Asentamiento.

Debido a que se utilizó un aditivo líquido acelerante de fraguado Tipo C se asume un asentamiento de entre 5 a 10 cm.

3.1.4.3. Datos del Árido.

El tamaño máximo de la arena fue de 0,119 mm es decir la abertura del tamiz número 16, la arena fue secada para trabajar con humedad cero, su peso específico compactado fue de 1660 kg/cm² su porcentaje de absorción es del 1%, su peso específico es de 2,59 gr/cm³ y su módulo de finura fue de 2,4.



Con los datos anteriores y la siguiente tabla se procede con el diseño de la mezcla:

<i>Cement</i>	<i>Sand</i>	<i>Water</i> ¹	<i>Fly Ash</i> ⁵	<i>Micro-silica</i>	<i>HRWRA or SP</i> ³	<i>Comp.</i> ⁴ <i>Strength MPa</i>	<i>Source</i> ⁶
1	3	0.5			yes	49	a
1	3	0.4			yes	47	h
1	2.5	0.6			no	39	b
1	2	0.55			no	52	c
1	2	0.5			yes	54	d
1	2	0.5			no	58	a
1	2	0.5			no	45	e
1	2	0.5	0.15		yes	52	p
1	2	0.4			yes	58	f
1	2	0.4			yes	50	o
1	2	0.4			yes	49	q
1	2	0.4		0.10	yes	55	q
1	2	0.4	0.30		yes	50	q
1	1.5	0.4			yes	60	g
1	1.5	0.4			yes	54	h
1	1.5	0.45	0.2		yes	41	i
1	1	0.4			no	43	j
1	1	0.35	0.2		yes	61	i
1	1	0.45			no	42	k
1	1	0.45			no	49	h
1	1	0.5			no	62	n
1	0.8	0.5	0.2		no	57	n
1	1	0.36			yes	71	h
1	0.6	0.47			yes	56	h
1	0.6 ²	0.3		0.15	yes	88	h
1	0.5 ²	0.25	0.2		yes	70	i
1	0.2 ²	0.3	0.2		yes	77	m
1	0.2 ²	0.24	0.2		yes	100	m

Como se puede ver para obtener una resistencia aproximada de 50 MPa se tienen una dosificación en peso como sigue:



Cemento	Arena	Agua	Aditivo Plastificante Acelerante
1	2	0,55	No se utiliza

Debido a que en lugar de un aditivo súper-plastificante acelerante se utilizó un aditivo que es acelerante con control sobre fraguado, y las especificaciones recomiendan que se reduzca las dosificaciones ya que al acelerar el fraguado no se llega a la resistencia esperada, por lo cual se decidió tomar la siguiente dosificación:

Cemento	Arena	Agua	Aditivo Plastificante Acelerante
1	1	0,3	No se utiliza

Los resultados se muestran a continuación:

Ensayos de Cubos		
Cubo #	Fuerza kg	Resistencia kg/cm²
1	9184	367,36
2	9170	366,8
3	9385	375,4
4	9789	391,56
5	8967	358,68
6	9196	367,84

La dimensión de todos los cubos era de 25 cm² aproximadamente, se obtuvo que la resistencia a compresión del mortero es de 371 kg/cm² que es mayor que la esperada que era de 350 kg/cm² lo que indica que las proporciones estuvieron bien concebidas, a continuación se muestran fotos de los ensayos de los cubos en el laboratorio.

3.1.4.4. ENSAYOS A LA COMPRESION DEL MORTERO



Se van a ensayar 6 elementos cubicos, cuyos lados son iguales a 5cm.



Se coloca debidamente cada uno de los elementos en la prensa.



Se procede a la compresión de los elementos hasta su rotura.



Resistencia a la cual giraron los resultados de los ensayos.

Preparación del mortero:



Se mezcla cemento, arena y agua, de acuerdo al diseño del mortero para obtener la resistencia esperada.



Se sacan las respectivas muestras para comprobar la resistencia a compresión del mortero.

3.1.4.5. Fundición de secciones tipo C:



Se coloca abundante aceite en los cofres para que no se pegue la mezcla.



Se vierte el mortero por toda la base del molde.



Se coloca acontinuacion la armadura y se cubre con la mezcla hasta cumplir con el recubrimiento.



De inmediato se pone el molde interior para formar la "C" y se vierte la mezcla.



A partir de este momento se requiere un reposo de 24 horas.

3.1.4.6. Desencofrado:



Se procedió a golpear suavemente las paredes para que el cofre no se quede pegado en la sección.



Uno a uno se procedieron a retirar las piezas del cofre.



Una vez retirado el cofre, se procede al curado por un periodo de 28 días.



Por ultimo se comprueba que los espesores cumplan con las medidas especificadas .

CAPITULO 4

4.1. ANALISIS DE RESULTADOS

4.1.1. ENSAYOS A COMPRESION:

Con el objetivo de analizar el comportamiento a compresión de los elementos de ferrocemento tipo C bajo carga en dirección vertical se tomaron cuatro de los tableros existentes construidos por mano de obra no calificada, estos especímenes se ensayaron en el “LABORATORIO DE SUELOS DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA EL DIA 30 DE SEPTIEMBRE DEL 2010”. Las fotografías se pueden ver en el **ANEXO B.3.**

AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.



Según el cálculo hecho para el diseño del perfil el esfuerzo a compresión máxima a resistir viene dada por:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A}$$

El diseño nos da una fuerza de compresión máxima de 3100 Kg y un área de 63 cm² por lo tanto el esfuerzo a compresión máximo vendrá dado por:

$$\sigma_c = \frac{3100 \text{ kg}}{63 \text{ cm}^2}$$

$$\sigma_c = 49,2 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Los datos obtenidos en las prácticas fueron:

Elemento	Fuerza Max (Kg)	Área (cm ²)	σ_c Obtenida (Kg/cm ²)
1	4687	63	74,40
2	7757	63	123,13
3	11668	63	185,21
4	5881	63	93,35

Para más detalle de los resultados obtenidos en la práctica, revisar **ANEXO B.1.**

Según los datos obtenidos se puede ver que la sección cumple debido a que el mortero diseñado fue de buena calidad, se puede ver que la tensión a compresión media admitida por los perfiles es 120 Kg/cm², la cual es superior a la calculada.

Se omitió la colaboración de la malla electro soldada en la resistencia a compresión debido a que solo fue utilizada una capa de malla que serviría de esqueleto, por lo tanto se consideró imprescindible su adición en el cálculo.

4.1.2. ENSAYOS A FLEXION:

Para el análisis del comportamiento a flexión y tracción de los elementos de ferrocemento tipo C bajo carga en dirección vertical en el centro de la luz se tomaron ocho de los tableros existentes construidos por mano de obra no calificada, estos especímenes se ensayaron en el "LABORATORIO DE SUELOS DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA EL DIA 30 DE SEPTIEMBRE DEL 2010". Las fotografías se pueden ver en el **ANEXO B.3.**



UNIVERSIDAD DE CUENCA

De los ensayos a flexión realizados podemos obtener la tensión máxima a tracción que podrá resistir el elemento y la carga máxima a ser aplicada para un desarrollo óptimo.

Según los resultados obtenidos en el diseño se sabe que la tensión máxima que soportara el perfil será de 62.7 Kg/cm² y la fuerza máxima de tracción 1552 Kg y la carga máxima que puede ser aplicada en forma puntual es de 3100Kg.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los resultados obtenidos en los 8 ensayos.

Elemento	Fuerza Max (Kg)	Nt (Kg)	σ_{ft} (Kg/cm ²)
1	3137	1570,2	62,75
2	462	230,4	11,38
3	3593	1798,2	71,86
4	731	364,5	16,04
5	3190	1596,7	63,81
6	3318	1660,7	66,37
7	3662	1832,7	73,24
8	3121	1562,2	62,43

Para más detalle de los resultados obtenidos en la práctica, revisar **ANEXO B.2.**

De los resultados de la tabla anterior podemos observar que la mayoría de perfiles cumplen con parámetros estipulados en el diseño

- Carga máxima permisible en promedio de 3336.83 Kg.
- La fuerza de tracción promedio es de 1670.11 Kg.
- La tensión a tracción máxima permisible promedio es de 55,74 Kg/cm²

Hubo dos elementos que no cumplieron con el diseño, debido a que el hormigón utilizado en ellos no tuvo un buen curado, y como resultado de ese hormigón de mala calidad no ofrecieron la resistencia esperada.

CAPITULO 5

5.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se resumen a continuación las principales conclusiones que se derivan de los ensayos realizados sobre los elementos tipo C.

AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Se seleccionaron cuidadosamente, materiales, elementos y formas geométricas representativas de la práctica común en la construcción con elementos prefabricados de ferrocemento.
- Los elementos fueron concebidos, diseñados y construidos específicamente para este estudio. Ello permitió un control exhaustivo de la calidad de los materiales y de los procedimientos de ensamblaje y construcción.
- Se programó una campaña de ensayos, teniendo en cuenta las instalaciones, personal y equipos disponibles. El conjunto de experimentos realizados permitió caracterizar la respuesta a cargas que emulan los esfuerzos a los que estaría sometido el elemento en la vida diaria.
- A pesar de que los elementos se diseñaron a flexión se pudo observar que la respuesta que tienen a las cargas de compresión es muy eficiente, ya que su resistencia es siquiera el triple de la esperada por el diseño.

En cuanto a los ensayos a flexión y tracción se puede observar que la mayoría de los elementos cumplieron con los diseños previstos gracias a la buena calidad del mortero y el armado correcto de las mallas.



BIBLIOGRAFÍA:

Abdullah, A. (1995). *Applications of ferrocement as a low cost construction material in Malaysia*. Journal of ferrocement, Vol. 25, No. 2, pp. 123- 127.

Abdullah, Katsuki Takiguchi, Koshiro Nishimura, Shingo Hori. (2003). *Behavior of Ferrocement Subjected to Missile Impact*. Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17), Prague, Czech Republic, August 17 –22, Paper # J04-7.

Abrams, D, P. (1992). *Strength and Behaviour of Unreinforced Masonry Elements*. 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, 475 – 485.

Abrams, D, P., Paulson, T. J. (1991). *Modeling Earthquake Response of Concrete Masonry Building Structures*. ACI Structural Journal, V. 88, 3475 – 3480.

ACI Committee 318. (1989). *Building code requirements for reinforced concrete (ACI 318-89) and commentary*. American Concrete Institute, Detroit.

ACI Committee 5491R-88. (1988). *Guide for the Design, Construction, and Repair of Ferrocement*. In Manual of Concrete Practice Institute, Farmington Hills, Michigan, 27 pages.

ACI Committee 5491R-93. (1993). *Guide for the Design, Construction, and Repair of Ferrocement*. In Manual of Concrete Practice Institute, Farmington Hills, Michigan, 27 pages.

ACI Committee 549-1R-97.(1997). *State of the Art Report on Ferrocement*. In Manual of Concrete Practice Institute, Farmington Hills, Michigan, 26 pages.

Naaman, A. E and Hammoud, H. (1992). *Ferrocement prefabricated housing: the next generation*, Journal of Ferrocement, V. 22, N. 1, 37.

Naaman, A. E. (2000). *Ferrocement and laminated cementitious composites*, Michigan, Ed. Techno Press 3000.



ANEXOS

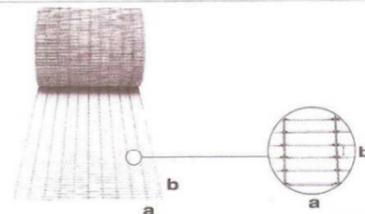


ANEXO A.1.

IDEAL-ALAMBREC S.A.
 Quito - Guayaquil - Cuenca
 Ecuador
 E-MAIL: ideal@uio.ideal.com.ec

MALLA SOLDADA LIVIANA

Malla elaborada con alambres de acero triplegalvanizado, soldados ortogonalmente por resistencia eléctrica en todos los cruces de alambres, formando cuadrados o rectángulos continuos, los cuales constituyen la abertura de la malla.



CARACTERISTICAS DEL ALAMBRE

Límite de fluencia:	$F_y = 31 \text{ kg/mm}^2 = 304 \text{ N/mm}^2(\text{MPa})$
Resistencia a la rotura:	$\sigma_R = 41 \text{ kg/mm}^2 = 402 \text{ N/mm}^2(\text{MPa})$
Módulo de elasticidad:	$E = 20000 \text{ kg/mm}^2 = 196000 \text{ N/mm}^2(\text{MPa})$
Densidad del acero:	$\gamma = 7,85 \text{ g/cm}^3$
Galvanización promedio:	Galv. = 270 g Zn/m ²

TIPO	ABERTURA		Diámetro (mm)	Area (mm ²)	N° alambres / m		En 1m ² de malla Soldada			Presentación en rollos		
	a(mm)	b(mm)			De ancho	De largo	Peso (kg)	Volumen de acero (cm ³)	Area de contacto con mortero (cm ²)	Largo (m)	Ancho (m)	Peso (kg)
25 x 25	25	25	2,05	3,142	40	40	2,15	273,9	5,478,0	30	0,475	30,65
50 x 15	50	15	2,05	3,142	20	66	2,37	301,9	6,038,0	30	0,50	35,60
50 x 25	50	25	2,05	3,142	20	40	1,60	203,8	4,076,0	30	0,65	31,10
50 x 25	50	25	2,05	3,142	20	40	1,60	203,8	4,076,0	30	0,75	36,00
50 x 50	50	50	2,05	3,142	20	20	1,07	136,3	2,726,0	30	0,75	24,13



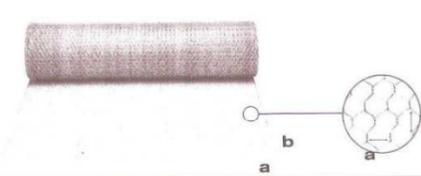
ANEXO A.2.

IDEAL-ALAMBREC S.A.
 Quito - Guayaquil - Cuenca
 Ecuador
 E-MAIL: ideal@uio.ideal.com.ec

MALLA EXAGONAL

Malla elaborada con alambres de acero galvanizado, entrelazados unidireccionalmente en triple torsión formando exágonos continuos, los cuales constituyen la abertura de la malla.

CARACTERÍSTICAS DEL ALAMBRE



Límite de fluencia:	$F_y = 22 \text{ kg/mm}^2 = 216 \text{ N/mm}^2(\text{MPa})$
Resistencia a la rotura:	$\sigma_R = 36 \text{ kg/mm}^2 = 353 \text{ N/mm}^2(\text{MPa})$
Módulo de elasticidad:	$E = 20000 \text{ kg/mm}^2 = 196000 \text{ N/mm}^2(\text{MPa})$
Densidad del acero:	$\gamma = 7,85 \text{ g/cm}^3$
Galvanización promedio:	Galv. = 33 g Zn/m ²

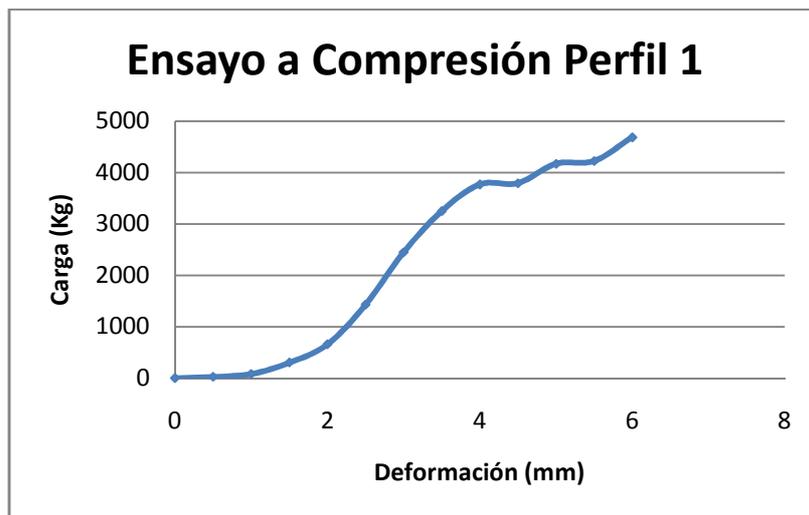
TIPO (pulg.)	ABERTURA		Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Nº alambres / m		En 1m ² de malla Exagonal			Presentación en rollos		
	a(mm)	b(mm)			De ancho	De largo	Peso (kg)	Volumen de acero (cm ³)	Área de contacto con mortero (cm ²)	Largo (m)	Ancho (m)	Peso (kg)
1/2"	15	19	0,56	0,246	132	78	0,33	42,0	3.000,0	50	1,00	16,65
										30	1,50	15,60
5/8"	18	22	0,71	0,396	112	66	0,43	54,8	3.086,0	50	1,00	21,50
										30	1,50	20,00
3/4"	21	26	0,71	0,396	96	57	0,38	48,4	2.726,0	30	1,00	11,95
										30	1,50	17,35
1"	26	33	0,71	0,396	74	44	0,33	42,0	2.365,0	30	1,00	9,95
										30	1,50	14,75
1 1/2"	40	50	0,89	0,622	48	28	0,34	43,3	1.946,0	30	1,00	10,30
										30	1,50	15,30



ANEXO B

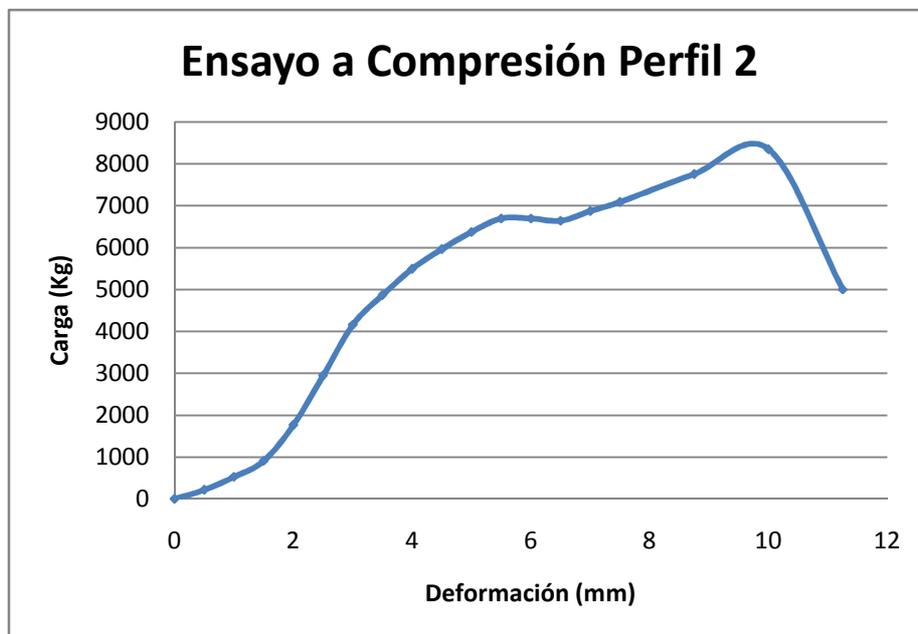
ANEXO B.1.

PERFIL 1		
Compresión		
Carga (kg)	Deformación (0.001pulg)	def (mm)
0	0	0
24	20	0,5
82	40	1
303	60	1,5
659	80	2
1430	100	2,5
2450	120	3
3250	140	3,5
3770	160	4
3794	180	4,5
4171	200	5
4225	220	5,5
4687	240	6



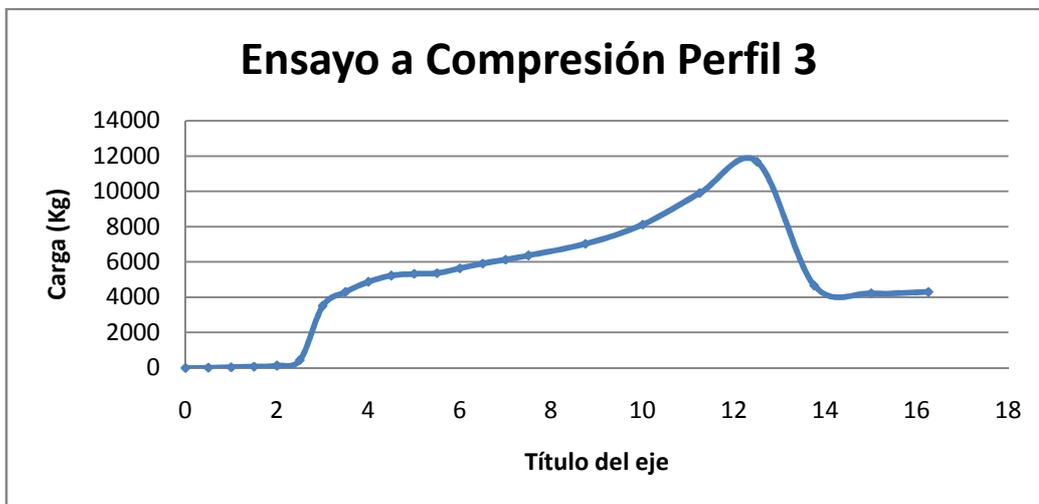


PERFIL 2		
Compresión		
Carga (kg)	Deformación (0.001pulg)	def (mm)
0	0	0
218	20	0,5
527	40	1
908	60	1,5
1765	80	2
2947	100	2,5
4157	120	3
4867	140	3,5
5493	160	4
5965	180	4,5
6373	200	5
6696	220	5,5
6696	240	6
6640	260	6,5
6873	280	7
7090	300	7,5
7757	350	8,75
8348	400	10
5000	450	11,25





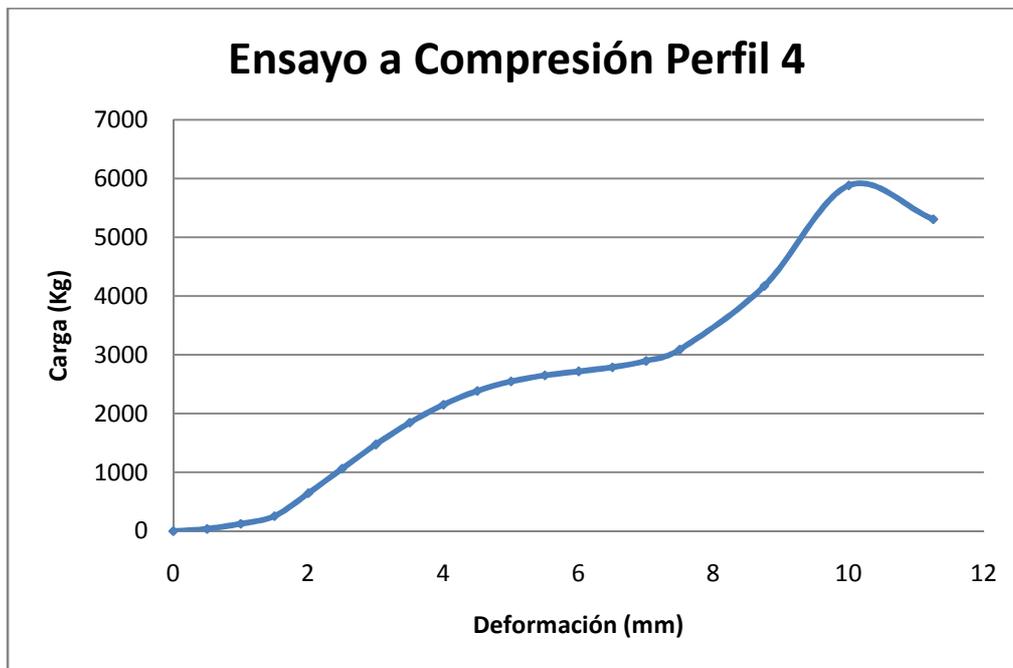
PERFIL 3		
Compresión		
Carga (kg)	Deformación (0.001pulg)	def (mm)
0	0	0
17	20	0,5
37	40	1
75	60	1,5
136	80	2
445	100	2,5
3513	120	3
4305	140	3,5
4872	160	4
5228	180	4,5
5323	200	5
5367	220	5,5
5639	240	6
5909	260	6,5
6129	280	7
6367	300	7,5
7029	350	8,75
8111	400	10
9902	450	11,25
11668	500	12,5
4664	550	13,75
4223	600	15
4301	650	16,25



AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.



PERFIL 4		
Compresión		
Carga (kg)	Deformación (0.001pulg)	def (mm)
0	0	0
36	20	0,5
125	40	1
256	60	1,5
645	80	2
1064	100	2,5
1475	120	3
1845	140	3,5
2152	160	4
2385	180	4,5
2547	200	5
2650	220	5,5
2719	240	6
2787	260	6,5
2896	280	7
3091	300	7,5
4170	350	8,75
5881	400	10
5305	450	11,25



ANEXO B.2.

AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.



PERFIL 1		
Flexión		
Deformación (0.001pulg)	Def (mm)	Carga (Kg)
0	0	0
20	0,508	0
40	1,016	7
60	1,524	7
80	2,032	7
100	2,54	17
120	3,048	20
140	3,556	27
160	4,064	41
180	4,572	112
200	5,08	228
220	5,588	340
240	6,096	500
260	6,604	676
280	7,112	874
300	7,62	1178
350	8,89	1198
400	10,16	1619
450	11,43	1945
500	12,7	2117
550	13,97	2161
600	15,24	2119
650	16,51	2253
700	17,78	2289
750	19,05	2406
800	20,32	2412
850	21,59	2436
900	22,86	2440
950	24,13	2566
1000	25,4	2692
1050	26,67	2643
1100	27,94	2656
1150	29,21	2758
1200	30,48	2818
1250	31,75	2836
1300	33,02	2976
1350	34,29	3137
1400	35,56	3085
1450	36,83	3018
1500	38,1	2975
1550	39,37	2806
1600	40,64	2767

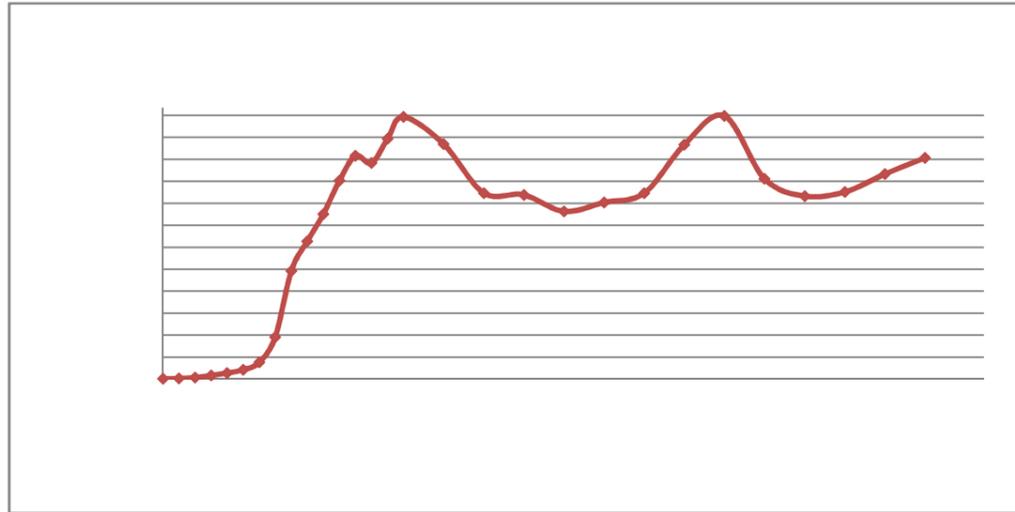


PERFIL 2		
Flexión		
Deformación (0.001pulg)	Def (mm)	Carga (Kg)
0	0	0
20	0,508	24
40	1,016	10
60	1,524	24
80	2,032	27
100	2,54	34
120	3,048	34
140	3,556	37
160	4,064	41
180	4,572	41
200	5,08	41
220	5,588	48
240	6,096	65
260	6,604	82
280	7,112	105
300	7,62	133
350	8,89	143
400	10,16	150
450	11,43	231
500	12,7	309
550	13,97	462
600	15,24	163
650	16,51	129
700	17,78	112

AUTORES: Bruno Guzmán D.
Israel Salcedo A.



PERFIL 3		
Flexión		
Deformación (0.001pulg)	Def (mm)	Carga (Kg)
0	0	3
20	0,508	7
40	1,016	20
60	1,524	48
80	2,032	82
100	2,54	129
120	3,048	228
140	3,556	574
160	4,064	1475
180	4,572	1880
200	5,08	2250
220	5,588	2710
240	6,096	3050
260	6,604	2950
280	7,112	3280
300	7,62	3580
350	8,89	3210
400	10,16	2540
450	11,43	2515
500	12,7	2290
550	13,97	2413
600	15,24	2540
650	16,51	3200
700	17,78	3593
750	19,05	2736
800	20,32	2498
850	21,59	2556
900	22,86	2800
950	24,13	3022



PERFIL 4		
Flexión		
Deformación (0.001pulg)	Def (mm)	Carga (Kg)
0	0	17
20	0,508	41
40	1,016	17
60	1,524	58
80	2,032	105
100	2,54	146
120	3,048	194
140	3,556	255
160	4,064	309
180	4,572	340
200	5,08	374
220	5,588	479
240	6,096	595
260	6,604	674
280	7,112	591
300	7,62	731
350	8,89	621
400	10,16	683
450	11,43	656
500	12,7	523



PERFIL 5		
Flexión		
Deformación (0.001pulg)	Def (mm)	Carga (Kg)
0	0	0
20	0,508	6
40	1,016	13
60	1,524	21
80	2,032	122
100	2,54	222
120	3,048	387
140	3,556	440
160	4,064	586
180	4,572	728
200	5,08	865
220	5,588	997
240	6,096	1125
260	6,604	1250
280	7,112	1367
300	7,62	1481
350	8,89	1641
400	10,16	1866
450	11,43	2053
500	12,7	2201
550	13,97	2310
600	15,24	2382
650	16,51	2421
700	17,78	2433
750	19,05	2529
800	20,32	2619
850	21,59	2710
900	22,86	2802



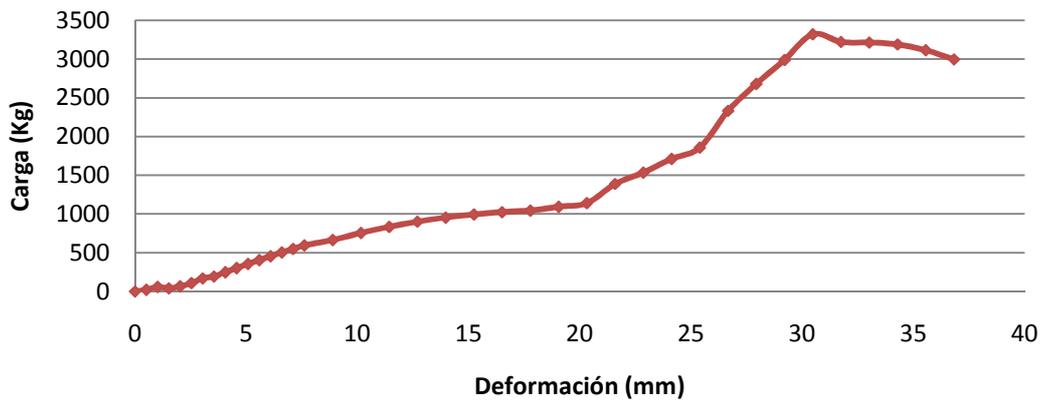
950	24,13	2980
1000	25,4	3067
1050	26,67	2964
1100	27,94	3190
1150	29,21	3052
1200	30,48	2980
1250	31,75	2950
1300	33,02	2929
1350	34,29	2875
1400	35,56	2829
1450	36,83	3018
1500	38,1	2975
1550	39,37	2806





PERFIL 6		
Flexión		
Deformación (0.001pulg)	Def (mm)	Carga (Kg)
0	0	0
20	0,508	22
40	1,016	58
60	1,524	40
80	2,032	67
100	2,54	107
120	3,048	169
140	3,556	193
160	4,064	249
180	4,572	303
200	5,08	355
220	5,588	406
240	6,096	455
260	6,604	503
280	7,112	549
300	7,62	594
350	8,89	664
400	10,16	755
450	11,43	834
500	12,7	900
550	13,97	953
600	15,24	994
650	16,51	1024
700	17,78	1044
750	19,05	1093
800	20,32	1140
850	21,59	1387
900	22,86	1534
950	24,13	1710
1000	25,4	1856
1050	26,67	2330
1100	27,94	2678
1150	29,21	2987
1200	30,48	3318
1250	31,75	3219
1300	33,02	3211
1350	34,29	3187
1400	35,56	3112
1450	36,83	2994

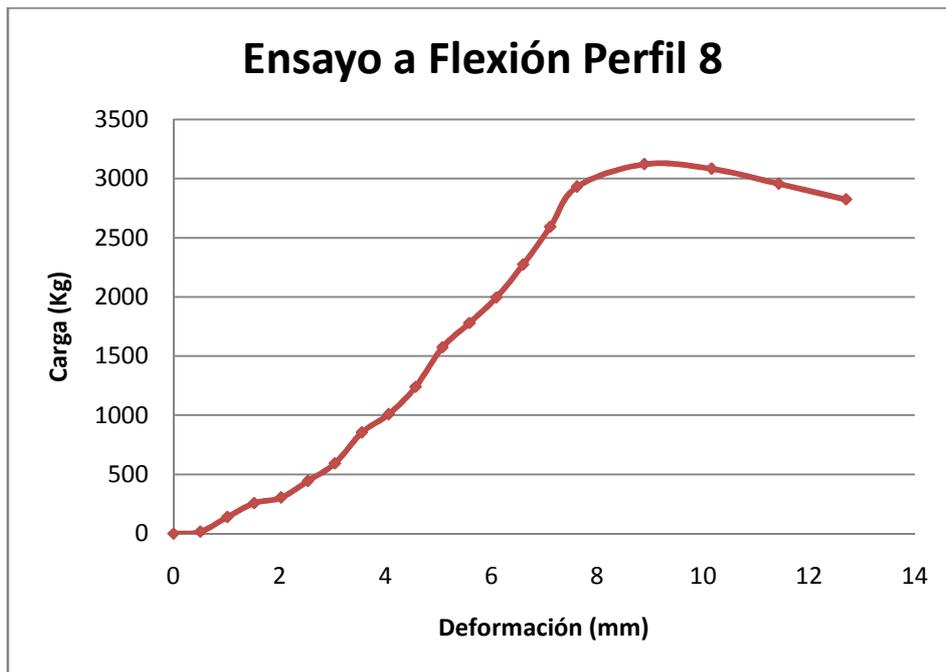
Ensayo a Flexión Perfil 6



PERFIL 7		
Flexión		
Deformación (0.001pulg)	Def (mm)	Carga (Kg)
0	0	0
20	0,508	124
40	1,016	210
60	1,524	424
80	2,032	627
100	2,54	834
120	3,048	834
140	3,556	837
160	4,064	1041
180	4,572	1149
200	5,08	1261
220	5,588	1488
240	6,096	1765
260	6,604	2082
280	7,112	2105
300	7,62	2233
350	8,89	2343
400	10,16	2450
450	11,43	2831
500	12,7	3209
550	13,97	3662
600	15,24	3463
650	16,51	2829
700	17,78	2412



PERFIL 8		
Flexión		
Deformación (0.001pulg)	Def (mm)	Carga (Kg)
0	0	0
20	0,508	17
40	1,016	141
60	1,524	258
80	2,032	305
100	2,54	446
120	3,048	594
140	3,556	855
160	4,064	1009
180	4,572	1240
200	5,08	1574
220	5,588	1779
240	6,096	1995
260	6,604	2274
280	7,112	2591
300	7,62	2931
350	8,89	3121
400	10,16	3083
450	11,43	2956
500	12,7	2823



ANEXO B.3.

ENSAYO DE ELEMENTOS TIPO C



Se alistan los elementos para su ensayo.



No se nos permitió ensayar los elementos en las formas indicadas en los gráficos ya que en el laboratorio no existía un elemento más ancho que las secciones para que nos sirvan de apoyo.

ENSAYOS A COMPRESION



Se ubican los elementos correctamente en la prensa para garantizar que trabajen adecuadamente.



Con la ayuda del deformimetro se leeran las cargas cada 0.02 pulgadas



Se ensayaron 4 elementos a compresion, cuyas reacciones se muestran en las imágenes.

ENSAYOS A FLEXION Y TRACCION



Se ubican los elementos correctamente en la prensa para garantizar que trabajen adecuadamente.



Se ensayaron 8 elementos a flexion, cuyas reacciones se muestran en las imágenes.

NOTA: De los ensayos a flexion se obtiene la tension maxima a traccion que podrá soportar el perfil.