

Monografías de Ingeniería Sísmica

Editor A.H. Barbat

**Ferrocemento:
Un acercamiento al diseño
sísmico**

Daniel A. Bedoya

Universidad de Medellín - Colombia

Facultad de Ingeniería Civil

Josef Farbiarz

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Centro de Proyectos e Investigaciones Sísmicas (CPIS)

Jorge E. Hurtado

Universidad Nacional de Colombia

Sede Manizales

Lluís G. Pujades

Universidad Politécnica de Cataluña

Barcelona - España

Ferrocemento: Un acercamiento al diseño sísmico

D. A. Bedoya
J. Farbiarz
J. E. Hurtado
Ll. G. Pujades

CENTRO INTERNACIONAL DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA
Edificio C1, Campus Norte UPC
Gran Capitán s/n
08034 Barcelona, España

MONOGRAFÍAS DE INGENIERÍA SÍSMICA
Editor A.H. Barbat

ISSN: 1134-3249

FERROCEMENTO: UN ACERCAMIENTO AL DISEÑO SÍSMICO
Monografía CIMNE IS 50
© Los autores

ISBN: 84-95999-23-4
Depósito legal: B-20309-2003

Índice General

PRESENTACIÓN	V
1 DEFINICIÓN, HISTORIA Y ACTUALIDAD	1
1.1 DESCRIPCIÓN.....	1
1.2 RECUENTO HISTÓRICO Y ACTUALIDAD.....	1
2 MATERIALES CONSTITUYENTES DEL FERROCEMENTO	5
2.1 CEMENTO.....	5
2.2 AGUA.....	6
2.2.1 Efecto de la relación agua – cemento en la mezcla.....	6
2.3 AGREGADOS INERTES.....	7
2.3.1 Efecto de la gradación de la arena en la mezcla.....	9
2.3.2 Efecto de la relación arena - cemento en la mezcla.....	10
2.4 REFUERZO PARA EL FERROCEMENTO.....	10
2.4.1 Malla de alambre.....	10
2.4.2 Acero de armazón.....	12
2.5 ADITIVOS PARA EL MORTERO DE FERROCEMENTO.....	12
2.5.1 Aditivo reductor de agua:.....	13
2.5.2 Aditivo retardante.....	13
2.5.3 Aditivo acelerante.....	13
2.5.4 Aditivo superplastificante.....	14
3 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL MORTERO PARA FERROCEMENTO	15
3.1 PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO.....	15
3.1.1 Manejabilidad.....	15
3.1.2 Retención de agua.....	15
3.1.3 Velocidad de endurecimiento.....	16
3.2 PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO.....	16
3.2.1 Retracción.....	16
3.2.2 Contracción y flujo bajo carga.....	16
3.2.3 Adherencia.....	16

3.2.4	<i>Resistencia</i>	17
3.2.5	<i>Fatiga</i>	17
3.2.6	<i>Impacto</i>	17
3.2.7	<i>Durabilidad</i>	17
3.2.8	<i>Apariencia</i>	18
3.3	EFFECTO DE LOS ADITIVOS EN MORTEROS PARA FERROCEMENTO.	18
4	ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DE FERROCEMENTO.	20
4.1	CARGAS SOBRE LAS ESTRUCTURAS PREFABRICADAS.	20
4.1.1	<i>Combinación de las cargas</i>	20
4.1.2	<i>Trayectorias de las cargas</i>	20
4.2	PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL DEL FERROCEMENTO.	20
4.2.1	<i>Intervalo elástico</i>	21
4.2.2	<i>Intervalo de agrietamiento</i>	21
4.2.3	<i>Intervalo de fluencia</i>	21
4.3	ANÁLISIS A TRACCIÓN DEL FERROCEMENTO.	22
4.3.1	<i>Comportamiento en el intervalo elástico</i>	22
4.3.2	<i>Comportamiento en el intervalo de agrietamiento</i>	22
	Resistencia a la primera grieta.....	22
	Mecanismo de formación de grietas.....	23
	Resistencia en el intervalo de agrietamiento.....	23
	Resistencia última:.....	23
4.4	ANÁLISIS A COMPRESIÓN DEL FERROCEMENTO.	24
4.4.1	<i>Resistencia en el intervalo elástico</i>	24
4.4.2	<i>Resistencia ultima a compresión</i>	24
4.5	ANÁLISIS A FLEXIÓN DEL FERROCEMENTO.	24
4.5.1	<i>Capacidad en el intervalo elástico</i>	24
4.5.2	<i>Capacidad en el intervalo de agrietamiento</i>	25
4.5.3	<i>Capacidad a momento último en flexión</i>	29
4.5.4	<i>Diagrama idealizado de momento-curvatura, $(M-\square)$, para una sección de ferrocemento</i>	30
4.6	ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A CORTANTE	31
4.7	SISTEMATIZACIÓN DEL DISEÑO.	32
5	PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN Y VACIADO DEL FERROCEMENTO.	35
5.1	PREPARACIÓN DE MOLDES Y ENCOFRADOS EN CASO NECESARIO.	35
5.2	PREPARACIÓN Y MONTAJE DEL REFUERZO.	35
5.3	MEZCLADO DEL MORTERO.	36

5.4	APLICACIÓN DEL MORTERO.....	36
5.4.1	<i>Aplicación manual.....</i>	36
	En una etapa:.....	36
	En dos etapas:.....	36
5.4.2	<i>Aplicación por medio de equipos.....</i>	37
	Vibración:.....	37
5.4.3	<i>Proyección del mortero.....</i>	38
5.5	CURADO DE LAS ESTRUCTURAS DE FERROCEMENTO.....	39
5.5.1	<i>Curado por humedad.....</i>	39
5.5.2	<i>Curado con membrana impermeable.....</i>	39
5.5.3	<i>Curado con vapor.....</i>	39
5.6	TRATAMIENTO SUPERFICIAL.....	39
5.7	INDUSTRIALIZACIÓN.....	40
6	CONFIGURACIÓN Y SISTEMA DE RESISTENCIA SÍSMICA.....	41
6.1	CRITERIOS BÁSICOS PARA LA CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL.....	41
6.1.1	<i>Planteamiento arquitectónico de la estructura.....</i>	41
6.2	SISTEMAS ESTRUCTURALES DE RESISTENCIA SÍSMICA.....	41
6.3	CRITERIOS DE RESISTENCIA SÍSMICA.....	42
6.4	DISPOSICIÓN DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE FERROCEMENTO.....	43
6.4.1	<i>Simetría.....</i>	43
6.4.2	<i>Continuidad.....</i>	43
6.4.3	<i>Integridad estructural.....</i>	43
6.4.4	<i>Dimensiones modulares.....</i>	43
6.4.5	<i>Elementos de amarre.....</i>	44
6.4.6	<i>Diafragmas.....</i>	44
6.4.7	<i>Peso de los elementos:.....</i>	44
6.5	DISTRIBUCIÓN DE LAS FUERZAS SÍSMICAS ENTRE LOS ELEMENTOS RESISTENTES.....	44
6.5.1	<i>Diafragma completamente rígido en su plano.....</i>	45
6.5.2	<i>Diafragma flexible.....</i>	45
7	CONEXIONES.....	47
7.1	SERVICIO.....	48
8	EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA ANTE CARGAS SÍSMICAS.....	49
8.1	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	50
8.1.1	<i>Obtención de las cargas verticales.....</i>	51
8.1.2	<i>Obtención de las cargas horizontales.....</i>	52

8.1.3	<i>Análisis de cargas horizontales considerando diafragma rígido.</i>	53
	Diseño de los elementos que conforman el sistema de resistencia sísmica.	55
	Revisión de la excentricidad crítica.	55
	Reacción en los apoyos del elemento estructural.	55
	Diseño de la conexión del panel a la cimentación de la estructura.	57
	Revisión del estado de tensiones en la base del elemento.	58
	Revisión de la capacidad del elemento estructural en cualquier punto.	59
8.1.4	<i>Análisis de cargas horizontales considerando diafragma flexible.</i>	60
8.1.5	<i>Diagramas de interacción para una sección de ferrocemento.</i>	63
8.2	ANÁLISIS MATRICIAL.	67
9	COMENTARIOS FINALES.	71
9.1	RECOMENDACIONES.	71
	BIBLIOGRAFÍA.	73

PRESENTACIÓN.

Desde que el hombre apareció en la tierra - cazador y recolector - hasta nuestros tiempos, ha estado en busca de un refugio y la naturaleza se lo ha proporcionado, pero a la vez y de forma aleatoria, se lo ha arrebatado. Así, en cada generación de su evolución ha aprendido a construirlos. De ese aprendizaje, que aún no acaba, surge la creación que lo lleva a edificar modernos refugios proyectados hacia el sol.

La vivienda es una necesidad básica del hombre. Suramérica (y en especial Colombia), presenta un alto déficit habitacional en la mayor parte de su territorio. Además no abundan los estudios e investigaciones para buscar soluciones idóneas, con materiales autóctonos, con tecnologías apropiadas y buen desempeño estructural.

Colombia está localizada a lo largo del borde de la placa tectónica Sur América, que está siendo subducida por la placa Nazca. Estos movimientos tectónicos generan una importante actividad volcánica y una variada actividad sísmica que hace que el país tenga zonas de amenaza sísmica alta, intermedia y baja.

La demanda de vivienda de muy bajo costo y la escasez de oferta en este renglón del mercado de la construcción promueve el desarrollo urbano informal con el consecuente incremento en el riesgo sísmico debido a la vulnerabilidad de las precarias construcciones hechas, en su mayoría, con mampostería no reforzada no confinada de pobre calidad.

Los sismos recientes en el país se han encargado de demostrar la dimensión del problema. Cerca de 350 personas perdieron la vida en enero de 1999, en la ciudad de Armenia, al colapsar casi por completo el barrio Brasilia.

El ferrocemento fue patentado por Joseph Louis Lambot, en 1852. Desde entonces, se ha utilizado de forma empírica en muchos países del tercer mundo, especialmente en el Asia. Sólo en la segunda mitad del siglo XX, a partir de la década de los 60, se desarrolla interés en la comunidad científica por estudiar su comportamiento. En la actualidad se considera un material alternativo en muchas sociedades. El comité ACI-549 está dedicado a su estudio. Es un material de bajo costo, que requiere mano de obra intensiva, pero no calificada, lo que lo hace un material ideal para un medio ávido de vivienda y empleo.

En la literatura internacional se puede encontrar un número de investigaciones e ilustraciones de aplicaciones del ferrocemento en la vivienda de interés social. En Colombia, en particular, se ha publicado relativamente poco material al respecto. Los autores han estudiado algunos aspectos del ferrocemento, incluyendo la optimización de mezclas de mortero [Farbiarz 85, Bedoya 96, Bedoya, 98].

El estudio que aquí se expone propone una alternativa al diseño y construcción de viviendas de interés social, ubicadas en zonas de alta sismicidad, utilizando como material de construcción el ferrocemento. En Colombia, y bajo la jurisdicción de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistentes, NSR-98 (Ley 400 de 1997, y sus decretos reglamentarios), la vivienda de bajo costo se construye generalmente con mampostería estructural, respaldada por el Título D, Mampostería Estructural, o por el Título E, Casas de uno y dos pisos, que desde febrero de 2002 incluye construcciones en mampostería confinada y construcciones en bahareque encementado.

El texto se presenta en ocho capítulos. En el primer capítulo se hace una descripción del material y un breve recuento histórico.

El segundo capítulo esta dedicado a los materiales constituyentes. Las propiedades físicas y mecánicas del mortero se estudian en el tercer capítulo. En el cuarto se describen las propiedades físicas y mecánicas del ferrocemento.

Los procedimientos de construcción y vaciado, el análisis y diseño estructural y las conexiones de los elementos prefabricados de ferrocemento, se tratan en los capítulos cinco, seis y siete, respectivamente.

En el capítulo ocho, se evalúa, bajo acciones sísmicas, un proyecto arquitectónico hipotético, para ilustrar una solución de vivienda de interés social estructurada con ferrocemento, con base en elementos prefabricados de ferrocemento tipo panel, ensamblados para conformar muros estructurales, en ambas direcciones principales.

Finalmente, se concluye el texto con la bibliografía y unos recursos disponibles en Internet.

Este trabajo se limita a la recopilación bibliográfica sobre el material en estudio y al análisis y diseño estructural de una propuesta hipotética. Se recomienda la evaluación del sistema propuesto, mediante la construcción de un modelo a escala real, que se someta a cargas horizontales cíclicas.

Este trabajo ha sido financiado por la Dirección de Investigaciones y la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Medellín, como parte de su política para el desarrollo de la investigación en la Facultad.

Los autores agradecen al Dr. Lluís G. Pujades B., Profesor y Director del Doctorado en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural, de la Universidad Politécnica de Cataluña, todo su apoyo administrativo y logístico, ofrecido en la elaboración del presente texto.

Daniel A. Bedoya R.
Facultad de Ingeniería Civil.
Universidad de Medellín, Colombia.

Josef Farbiarz F.
Centro de Proyectos e Investigaciones Sísmicas (CPIS).
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

1 DEFINICIÓN, HISTORIA Y ACTUALIDAD.

1.1 Descripción.

El ferrocemento se puede definir como la “fusión“ de un entramado de refuerzo de calibre pequeño con un material aglutinante (mortero), compuesto por material cementante (generalmente cemento Pórtland), material de relleno (arena), agua y, ocasionalmente, aditivos.

Un elemento de ferrocemento, cuya sección típica se presenta en la Figura 1, se obtiene mediante un adecuado diseño para obtener proporciones óptimas de los materiales, incluyendo la cantidad de refuerzo requerida, y un mezclado uniforme de la matriz cementante. Una vez endurecido, el ferrocemento presenta propiedades químicas físicas y mecánicas consistentes con un material de acción compuesta. A pesar de que la matriz cerámica 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.

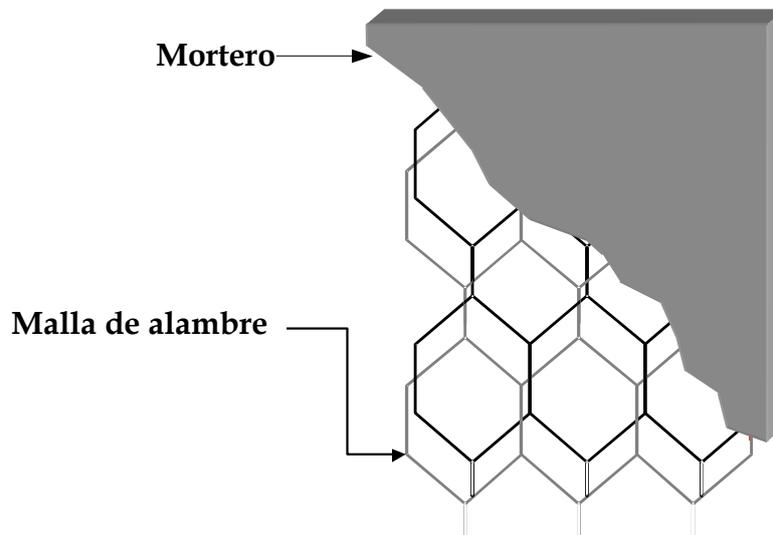


Figura 1. Sección típica de ferrocemento. [Farbiarz 2001].

1.2 Recuento 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, Joseph Louis Lambot produjo los primeros objetos construidos con mortero reforzado con malla de alambre, en Miraval, en el sur de Francia. Uno de los dos primeros botes que construyó en 1848 se observa en la Fotografía 1 [Pama 92, Bedoya 96].



Fotografía 1. Bote construido en ferrocemento por Joseph Louis Lambot en 1848. Lago de Miraval, Francia.

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. Lo patentó, con el nombre de "ferciment", en 1852.

Una alberca del zoológico de Amsterdam, llamada "La Piscina del Pelicano" fue el puerto, por muchos años, de un pequeño bote construido con ferrocemento en 1887. Existe también evidencia fotográfica que señala que en Italia, en la década de los años 90 del siglo XIX, el romano Carlos Gabellini construyó botes con este material [Farbiarz 2001].

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, aunque en su patente, Lambot se refiere también a mezclas de "brea bituminosa" [Pama 92].

Ya en el siglo XX, a principios de los años cuarenta, el arquitecto, ingeniero y constructor italiano, Pier Luigi Nervi, retoma las ideas de Lambot realizando estudios en concretos reforzados con capas de malla de alambre. Se asombra con sus observaciones 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 92]. Nervi procede a diseñar y construir diferentes modelos en ferrocemento, considerados racionales y estéticos dentro del diseño estructural.

En sus estudios, 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 fisuras y microfisuras. Su más destacada obra se considera la cobertura del salón principal del palacio de exposiciones de Turín, con una luz de 96 metros.

Con estas y otras aplicaciones, el ferrocemento se ha difundido desde entonces por todo el mundo.

En los últimos años, 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.

De este intercambio de conocimientos surgieron diferentes medios de información, con el objetivo de recabar, procesar y difundir estudios y avances de el ferrocemento, entre los cuales uno de los más importantes es el ACI Journal of Ferrocement, publicado originalmente en Nueva Zelanda y cedida al Centro internacional de información sobre ferrocemento en Bangkok, Tailandia.

El American Concrete Institute, entre 1976 y 1977, estableció el comité 549 sobre ferrocemento, para hacer una extracción y revisión de los documentos, y así elaborar un reglamento práctico para este material.

En 1979, la RILEM (Unión Internacional de Laboratorios de Pruebas e Investigación de Materiales y Estructuras), en Europa, estableció el comité 48-FC para examinar métodos de prueba para el ferrocemento.

El ferrocemento es un material adecuado para soluciones con tecnologías apropiadas, en aquellos países y zonas en que los demás materiales y conocimientos técnicos convencionales en países desarrollados no representan soluciones óptimas. [Pama 92, Bedoya 96, Bedoya 98, Naaman 00, Farbiarz 01].

Las aplicaciones constructivas del ferrocemento son extensas y variadas en el mundo: Bóvedas delgadas en Canadá; viviendas en la India, Filipinas y México; botes

pesqueros en China y Cuba; techos de estadios en la antigua Unión Soviética y silos para granos en Argentina y Tailandia. Sin embargo, su uso más frecuente se ha encontrado en la fabricación de cascos de embarcaciones, depósitos de aguas, techos y cúpulas geodésicas.

El ferrocemento es fácil de construir y reparar; generalmente no necesita encofrado ni requiere de mano de obra calificada; sus materiales constitutivos son, casi siempre, de cómoda adquisición; tiene gran resistencia al fuego, al impacto y a la flexión; posee bajo agrietamiento y es adaptable a cualquier forma geométrica. Estas singulares propiedades que ofrece lo convierten en un material alternativo idóneo, de amplios usos en la ingeniería y la arquitectura.

Durante las últimas dos décadas del siglo XX, varios países de América lo adoptaron para construcciones no convencionales. [Fabiarez 85, Cañigüeral 93, Bedoya 96]. Arquitectos Brasileños han desarrollado prefabricados de ferrocemento para urbanizaciones y escuelas, Cuba se especializó en la construcción de botes pesqueros, en Estados Unidos se han hecho varias aplicaciones arquitectónicas, en México se han construido varios programas piloto con este material especialmente en vivienda de bajo costo o reparación de edificaciones hechas con mampostería no reforzada.

En el siglo XXI, se desarrolla en Italia 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>].

En Colombia se han presentado aplicaciones del ferrocemento en los últimos 15 años, tales como tanques de fermentación de café, tanques de agua, losas y casas prefabricadas de uno y dos pisos [Farbiarez 82, Bedoya 96, Bedoya 98, Farbiarez 01].

En la actualidad, el ferrocemento se investiga con objetivos muy específicos, en empresas de la construcción, centros de investigación de materiales para la construcción y universidades, en diferentes lugares del mundo, en donde se espera nuevas y versátiles soluciones del material para los retos presentes y venideros en la ingeniería de las construcciones civiles.

2 MATERIALES CONSTITUYENTES DEL FERROCEMENTO.

La matriz aglomerante del ferrocemento consiste en un mortero hecho generalmente con cemento Portland, agregados finos, agua y, ocasionalmente, aditivos. 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 agua-cemento, son los parámetros que determinan las propiedades del mortero [Pama 92, Bedoya 96, Naaman 00].

2.1 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. El tipo de cemento Portland debe escogerse de acuerdo con las condiciones de trabajo:

- 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. Destinados a obras expuestas a la acción moderada de sulfatos y cuando se desee moderado 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 92, Bedoya 96, Sánchez 98, Naaman 00].

2.2 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 recomienda el uso de agua salada.

2.2.1 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 2, la resistencia a la compresión aumenta a medida que la relación agua – cemento disminuye [Bedoya 96].

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, como se muestra en la Fotografía 2.

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.

La relación agua - cemento debe 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 [Bedoya 96].

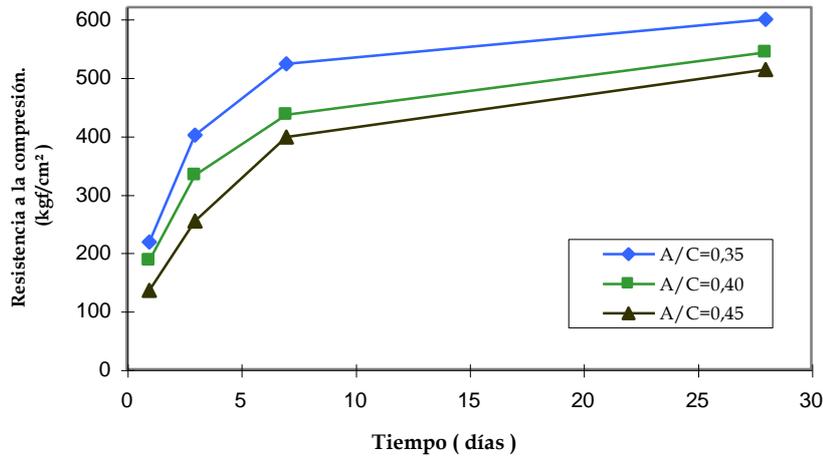


Figura 2. Efecto de la relación agua – cemento en la resistencia [Bedoya 96].



Fotografía 2. Ensayo de fluidez para una relación A/C = 0.35. [Bedoya 96].

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 96].

2.3 Agregados inertes

El agregado para morteros de ferrocemento debe ser duro, impermeable, libre de impurezas orgánicas, limpio y resistente. El ferrocemento se caracteriza por tener agregados con tamaños máximos relativamente pequeños consistentes con el de las arenas para la fabricación de concreto 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 [Bedoya 96].

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 1 se presenta la granulometría especificada por la ASTM para arenas utilizadas en la fabricación de morteros y hormigones, que ha probado ser adecuada para el ferrocemento [Bedoya 96].

Tabla 1. Especificación de la norma ASTM C - 33 para agregado fino.

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

En la figura 3, se muestra la banda deseada por las normas ASTM, para agregado fino. La curva G-5, corresponde a una arena colombiana [Bedoya 96].

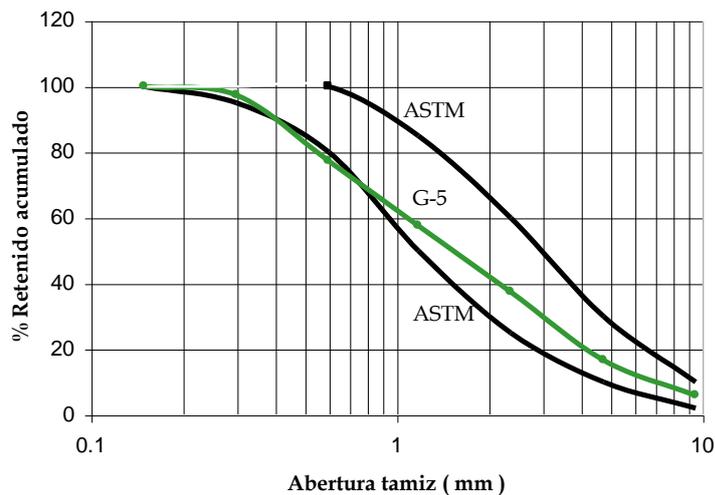


Figura 3. Límites deseables de la gradación del agregado [Bedoya 96].

2.3.1 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. [Bedoya 96].

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 fueron estudiados 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 96].

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 [Bedoya 96].

En general, la gradación adecuada de la arena para mezclas de ferrocemento, es aquella que presente una distribución uniforme de las 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 [Bedoya 96]. El mejor comportamiento, en

términos de resistencia y propiedades del mortero fresco, correspondió a mezclas con una relación 1 a 2 entre agregado fino y cementante. 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 finura no 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.

2.3.2 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. [Pama 92, Bedoya 96].

Algunas relaciones arena – cemento, en peso, se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Proporciones finos - cemento en peso, para el mortero [Bedoya 96].

Proporción fino cemento. (en peso)	Comentario
1 : 1.0	Mortero rico.
1 : 1.5	Mortero adecuado.
1 : 2.0	Relación óptima [Bedoya 96].
1 : 2.5	Mortero bombeado.
1 : 3.0 a 5.0	Estructuras con bajas solicitaciones

El intervalo de proporciones recomendado para mezclas de ferrocemento, va desde una relación, por peso, arena sobre cemento de 1.5 : 1 hasta 2.5 : 1 [Pama 92, Bedoya 96].

2.4 Refuerzo para el ferrocemento.

2.4.1 Malla de alambre.

Uno de los componentes principales del ferrocemento es la malla de alambres delgados, ya sean entretejidos o soldados. Deben ser lo suficientemente flexibles para poderlas doblar. En la fotografía 3 se muestran varias capas de malla de refuerzo en el momento en que se les aplica el mortero.

A diferencia del hormigón convencional, el ferrocemento puede fabricarse sin formaleta. En tal caso, la función del refuerzo dentro del ferrocemento consiste en dar

forma y sostener 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.



Fotografía 3. Refuerzo tipo malla hexagonal [Bedoya 96].

En ocasiones, se utilizan también barras de refuerzo convencionales, especialmente para armar el esqueleto de la pieza a construir, es decir, esencialmente para funciones de respaldo. 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 (secciones en *U*, en *Cajón*, etc.) las barras de refuerzo alejadas del eje neutro del elemento participan activamente en la respuesta estructural a la flexión [Pama 92, Bedoya 96, Naaman 00].

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.

Existen varios tipos de malla de refuerzo, entre los cuales se encuentra:

- Malla de alambre con tejido hexagonal.
- Malla de alambre soldado.
- Malla entretejida.
- Malla de metal desplegado o expandido.
- Malla Watson.

Las mallas tejidas son las más utilizadas, entre las que la malla hexagonal es la malla más usada, por su economía y fácil manipulación. Se conoce como malla de alambre de pollo o gallinero, dependiendo del tamaño de sus aberturas, y se fabrica con alambre estirado en frío.



Fotografía 4. Acero de armazón para una estructura de ferrocemento.

2.4.2 Acero de armazón.

Se emplea generalmente para hacer el armazón de la estructura y sobre ella colocar las capas de malla, como se muestra en la Fotografía 4. Su resistencia, acabado superficial, recubrimiento de protección y tamaño afectan su comportamiento como elemento de refuerzo del compuesto. En lo general, se usan varillas de acero dulce.

En los procesos de construcción el control de la calidad no debe alterar los propósitos constructivos y arquitectónicos; el control de fabricación debe estar dirigido por una persona experimentada, aunque la mano de obra no sea calificada.

2.5 Aditivos para el mortero de ferrocemento.

Son sustancias que incorporadas a la mezcla modifican o mejoran una o más propiedades del ferrocemento, obteniendo un mortero más adecuado para las condiciones de trabajo o más económico. Los aditivos ayudan a la trabajabilidad, reducen las exigencias de agua y prolongan o reducen los tiempos de fraguado del mortero [Pama 92, Bedoya 96, Naaman 00]. Sin embargo, sus aplicaciones no se limitan a estas modificaciones. El comité ACI 212 lista muchos de las modificaciones que se logran usando aditivos en las mezclas:

- Aumentar la trabajabilidad sin aumentar o reducir el contenido de agua.
- Acelerar las resistencias a edades tempranas y aumentar la resistencia.
- Retardar o acelerar el fraguado inicial o reducir el calor de hidratación.
- Modificar la velocidad de exudación.
- Mejorar la durabilidad o la resistencia bajo condiciones severas.
- Controlar la expansión causada por la reacción de los álcalis con ciertos constituyentes de los agregados.
- Reducir el flujo capilar de agua, la permeabilidad en los líquidos y el asentamiento.
- Producir mortero celular y de color.
- Mejorar la penetración y el bombeo.
- Aumentar la adherencia entre el mortero y el refuerzo, y entre morteros viejos y nuevos.
- Obtener morteros con propiedades fungicidas, germicidas o insecticidas.
- Inhibir la corrosión del refuerzo.
- Reducir el costo unitario del mortero.

La norma ASTM C - 494 presenta la clasificación que se muestra en la Tabla 3 para los aditivos.

Tabla 3. Tipos de aditivos.

Tipo	Descripción
A	Aditivos reductores de agua
B	Aditivos retardantes
C	Aditivos acelerantes
D	Aditivos reductores de agua y retardantes
E	Aditivos reductores de agua y acelerantes
F	Aditivos reductores de agua de alto intervalo
G	Aditivos reductores de agua de alto intervalo y retardantes

En la práctica es necesario hacer pruebas con anterioridad al uso de aditivos, debido a que los diferentes tipos de aditivos y sus efectos pueden variar con las propiedades de los otros materiales constituyentes de la mezcla y con la marca del aditivo. [Pama 92, Bedoya 96, Naaman 00].

2.5.1 Aditivo reductor de agua:

Los efectos en la mezcla pueden variar considerablemente, dependiendo de la marca del aditivo y la composición del cemento y de los demás materiales constitutivos.

Efecto en mortero fresco.

- Reduce la cantidad del agua de mezclado.
- Aumenta la manejabilidad, consistencia y plasticidad, con menor segregación y mejor respuesta de consolidación.
- Permite mayores tiempos para mezclado y colocación.
- Disminuye el calor de hidratación y temperatura para iguales contenidos de cemento.
- Modifica las velocidades de fraguado y endurecimiento y aumenta la exudación.

Efecto en mortero endurecido.

- Aumenta la resistencia a compresión y flexión en todas las edades
- Mejora la durabilidad, la adherencia, módulo de elasticidad
- Reduce el flujo plástico y la permeabilidad.

2.5.2 Aditivo retardante.

Efecto en mortero fresco

- Disminuye la solubilidad de los componentes causando un retardo en el fraguado.
- Permite un mayor tiempo de utilización del mortero en estado plástico.
- Retrasa el calor de hidratación del cemento; es decir disminuyen el aumento de temperatura.
- Modifica la velocidad de fraguado y endurecimiento del mortero.
- Facilita la colocación del mortero por bombeo.
- Ayuda en la colocación de morteros en climas cálidos.

Efecto en mortero endurecido

- Aumenta la resistencia a largo plazo.
- Reduce la permeabilidad y mejora la durabilidad.

2.5.3 Aditivo acelerante.

Se adiciona a la mezcla con el fin de reducir el tiempo de fraguado y acelerar la resistencia a temprana edad. No se debe utilizar en cantidad superior al 2 % [Bedoya 96].

Efecto en mortero fresco

- Acelera el desarrollo del calor de hidratación.
- Acelera los tiempos de fraguado inicial y final.

- Acelera la resistencia a temprana edad.

Efecto en mortero endurecido

- Aumenta los cambios de volumen.
- Aumenta la resistencia a compresión a edades tempranas, pero puede disminuirla a edades mayores.
- Aumenta la resistencia a flexión.
- Disminuye la resistencia al ataque de sulfatos.
- Acelera la expansión producida por la reacción agregado - álcali, cuando se presente.
- Si contiene cloruros, puede destruir la capa protectora de óxido inicial sobre el refuerzo, lo que facilita su corrosión.

2.5.4 Aditivo superplastificante.

Aumenta la manejabilidad y proporciona una gran reducción de agua. Es diferente a los reductores de agua normal y se emplea con niveles altos de dosificación sin causar problemas de retardo de fraguado o excesos de inclusión de aire. Se utiliza para morteros fluidos con relaciones de agua - cemento normales o en los que se requiera poca compactación y para evitar excesiva segregación y exudación.

Con este tipo de aditivos se puede producir morteros de alta resistencia con relaciones agua - cemento bajas, manteniendo la manejabilidad deseada para la aplicación de la mezcla; sin embargo la duración de su efecto es relativamente corta.

3 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL MORTERO PARA FERROCEMENTO.

3.1 Propiedades en estado fresco

3.1.1 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, al estado de fluidez del mortero.

Para determinar la manejabilidad, se acepta el ensayo de fluidez (ASTM C230 u otra equivalente); por medio del cual se califica qué tan seca o fluida es la mezcla.

En la Fotografía 5 se aprecia una prueba sobre una mezcla con fluidez aceptable [Bedoya 96].

La Tabla 4 presenta una propuesta para cuantificar la manejabilidad.



Fotografía 5. Consistencia del mortero para ferrocemento. [Bedoya 96].

Tabla 4. Clasificación de la consistencia.

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

3.1.2 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 el nivel de resistencia a la compresión a edades tempranas o la velocidad de fraguado.

3.1.3 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 son función de las condiciones ambientales y de la composición de la mezcla, y pueden ser controlados con adición de aditivos.

3.2 Propiedades en estado endurecido.

3.2.1 Retracción.

El agua libre en la mezcla fresca puede evaporarse. 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 buena granulometría, resultan en 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.

3.2.2 Contracción y flujo bajo carga.

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.

La contracción es una medida de estabilidad volumétrica en donde influyen muchos factores climáticos, cantidad de refuerzo, curado etc. El ferrocemento presenta niveles más bajos de contracción que el hormigón reforzado convencional, debido a sus pequeños espesores y la distribución uniforme del refuerzo. [Pama 92].

3.2.3 Adherencia.

Es la capacidad del mortero para absorber las tensiones normales y tangenciales a la superficie de contacto del mortero. 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.

3.2.4 Resistencia.

En estructuras de ferrocemento se requiere buena resistencia a compresión que se traduce en buena resistencia para esfuerzos de cortante y tracción. La resistencia a compresión la aporta principalmente el mortero y se mide por medio de cubos normalizados, como se indica en la Fotografía 6.



Fotografía 6. Ensayo de resistencia a la compresión [Bedoya 96].

La resistencia a compresión es función del tamaño de los agregados, la cantidad de cemento y las proporciones entre éstos.

Morteros hechos con un mismo agregado, un porcentaje mayor de cemento, por unidad de volumen, resulta en mayor resistencia e impermeabilidad; [Pama 92, Sánchez 98, Naaman 00].

3.2.5 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 es función de la fatiga 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. [Pama 92, Naaman 00].

3.2.6 Impacto.

Los estudios han mostrado que las propiedades del refuerzo, incluyendo las del acero del armazón, influyen de una manera importante en el comportamiento y la capacidad de resistencia de los elementos del ferrocemento.

3.2.7 Durabilidad.

Una estructura de ferrocemento es durable cuando puede soportar, en las condiciones para la cual fue diseñada, en 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 [Pama 92, Naaman 00].

Corrosión.

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.

3.2.8 Apariencia.

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 Fotografía 7. 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.



Foto 7. Vivienda poco convencional construida en ferrocemento.

3.3 Efecto de los aditivos en morteros para ferrocemento.

Debe usarse aditivo superplastificante y retardante, por separado, junto con relaciones fino –cementantes de 2 a 1 y agua – cemento de 0.4 a 1. Proporciones de

aditivo mayores al 1 % del peso del cemento pueden resultar en mezclas segregadas [Bedoya 96].

En la Figura 4 se muestra el resultado de variar la cantidad de aditivo en mezclas con diferentes relaciones agua – cemento, pero con relación fino – cementante constante de 2 a 1.

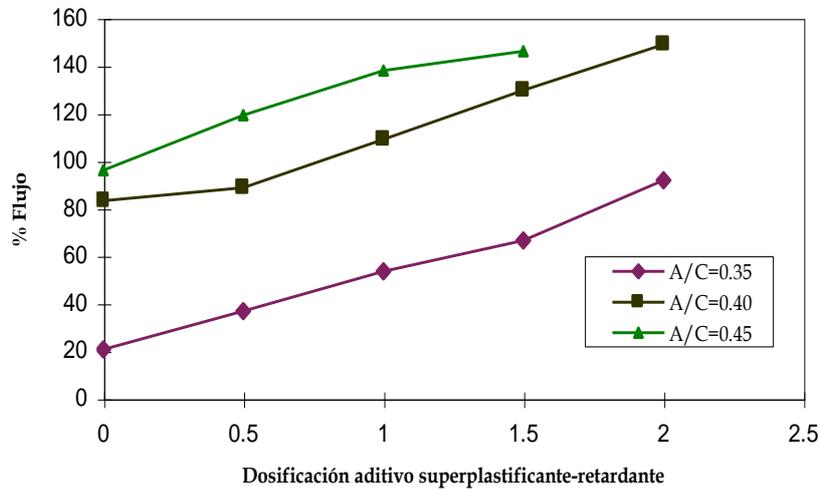


Figura 4. Efecto del aditivo en morteros para ferrocemento [Bedoya 96].

La trabajabilidad de los morteros es directamente proporcional al aumento de la dosificación de aditivo, superplastificante-retardante y retardante, para las diferentes relaciones agua-cemento.

Con el uso de aditivo superplastificante - retardante se obtienen manejabilidades y tiempo fraguado apropiados para el vaciado manual o con vibrado. La proporción ideal de aditivo retardante, para una relación F/C = 2 y A/C = 0.4, es 0.40 %, por peso del cemento [Bedoya 96].



Fotografía 8. Consistencia no deseada del mortero para ferrocemento [Bedoya 96].

No debe usarse una relación agua cemento de 0.45 con una dosificación de aditivo superplastificante-retardante del 20%. Produce una mezcla demasiado fluida y con segregación, como se muestra en la Fotografía 8.

4 ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DE FERROCEMENTO.

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 y tracción. El sistema de resistencia sísmica conformado por cada uno de los elementos estructurales de ferrocemento, debe poseer suficiente integridad, resistencia y rigidez para garantizar la transferencia de las cargas hasta la cimentación, de forma segura y económica.

4.1 Cargas sobre las estructuras prefabricadas.

Cualquier estructura construida con elementos prefabricados en ferrocemento, debe 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 este caso se hará de acuerdo con las NSR 98.

4.1.1 Combinación de las cargas.

Debe considerarse la posibilidad de que varias o todas las fuerzas descritas actúen simultáneamente. Para ello, las normativas de diseño, especifican las proporciones en las que se deben combinar las diferentes cargas, en función del método de análisis y del material utilizado. El diseño debe hacerse para la combinación que produzca sobre la estructura, el efecto más desfavorable. Este efecto se puede presentar cuando una o varias cargas no actúen.

Los efectos críticos de sismo y viento se deben considerar independientemente en el análisis.

Las cargas impuestas a una estructura prefabricada, (cargas mínimas de acabados, muros y particiones etc.), que especifica las normas, son cargas que superan ampliamente las cargas debidas a peso propio del ferrocemento. [Bedoya 98].

4.1.2 Trayectorias de las cargas.

Las cargas impuestas deben transferirse a la estructura a través de trayectorias continuas.

Debido al poco peso relativo de las secciones en ferrocemento, las fuerzas inerciales que se generan en un sismo son inferiores a las de otros materiales.

En algunas regiones, las cargas horizontales de viento pueden ser más relevantes que las de sismo, debido a la poca masa de la estructura.

4.2 Propiedades físicas y mecánicas en el diseño estructural del ferrocemento.

Los elementos prefabricados y sus componentes deben diseñarse para que tengan una rigidez adecuada para atender deflexiones verticales del elemento, desplazamientos horizontales ante cargas de sismo, gravitacionales o de viento, 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 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.

El ferrocemento se ha fabricado empíricamente por más de un centenar de años. En la segunda mitad del siglo XX se han desarrollado varias propuestas para el diseño de elementos en ferrocemento [Mansur 91, Pama 92, Guangjing 98, Naaman 00]. Se han publicado muchos estudios experimentales del comportamiento de elementos en ferrocemento, comparado con las predicciones teóricas. [Trejo 97, Naaman 00].

Para determinar la capacidad de absorber esfuerzos debidos a cargas externas, en los elementos prefabricados de ferrocemento, R. P, Pama [Pama 92] y el profesor Naaman [Naaman 2000], sugieren un procedimiento matemático, para el análisis y diseño de secciones de ferrocemento por el método de la rotura, cuando se somete a tensiones generadas por cualquier tipo de carga.

El método supone que el ferrocemento es un material homogéneo en el intervalo elástico, cuyo comportamiento pasa a través de tres fases, según el ancho de grietas.

A continuación se presenta una síntesis de un modelo para describir el comportamiento de elementos de ferrocemento, a medida que se les somete a incrementos de carga, obligándoles a deformarse a través del intervalo elástico hasta alcanzar deformaciones plásticas y, eventualmente, fallar. Los interesados en profundizar en este tema deben consultar la bibliografía sugerida al final del texto.

4.2.1 Intervalo elástico.

En este intervalo, el ferrocemento se comporta linealmente, 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.

Aunque existen microfisuras 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 [Pama 92, Naaman 2000].

4.2.2 Intervalo de agrietamiento.

Con el aumento en las tensiones rápidamente se excede la resistencia a la tracción del mortero; la malla de refuerzo atiende las tensiones de tracción subsecuentes. En este nivel 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, la distribución del refuerzo y el espesor de la capa del mortero.

4.2.3 Intervalo de fluencia.

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 fisuras 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 micrones. El refuerzo toma todas las tensiones de tracción y entra al intervalo de cedencia [Pama 92, Guangjing 98, Naaman 00].

4.3 Análisis a tracción del ferrocemento.

4.3.1 Comportamiento en el intervalo elástico.

Durante el intervalo elástico no se presentan deslizamientos entre el refuerzo y el mortero. Si la dirección de la carga es paralela a la dirección de las fibras de refuerzo, se asume que la fibra y la matriz toman la carga en conjunto, en forma directamente proporcional a sus áreas seccionales. 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, la obtención del módulo de elasticidad efectivo del compuesto para una sección típica del ferrocemento es un poco más complicada. 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 tensiones, y, de allí, obtener un módulo de elasticidad equivalente, así:

$$E_{ij} = \frac{E_{t1j}}{\Omega_{1j} + \frac{\Omega_{2j} E_{t1j}}{E_{t2j}}} \quad (4.1)$$

Donde:

E_{ij} : Módulo de elasticidad de la franja j del compuesto a tracción

E_{t1j} : Módulo de elasticidad del compuesto a tracción para la parte superior de un Módulo básico en serie de la franja j .

E_{t2j} : Módulo de elasticidad del compuesto a tracción para la parte inferior de un Módulo básico en serie de la franja j .

Ω_{1j} : Relación de la longitud en la dirección de la carga de la parte superior de un Módulo básico en la serie con la longitud total en la sección.

Ω_{2j} : Relación de la longitud en la dirección de la carga de la parte inferior de un Módulo básico en la serie con la longitud total en la sección.

4.3.2 Comportamiento en el intervalo de agrietamiento.

Resistencia a la primera grieta

Después de diversos análisis experimentales se ha concluido que la tensión que se presenta al formarse la primera grieta es función de la superficie específica del refuerzo. R. P, Pama. [Pama 92], propone la siguiente expresión para obtenerla:

$$\sigma_{cr} = 24.52S_1 + 0.39\sqrt{f'_c} \quad (4.2)$$

σ_{cr} : *Tensión del compuesto en la primera grieta.*

S_1 : *Superficie específica del refuerzo en dirección de la carga.*

f'_c : *Resistencia a compresión del mortero.*

Mecanismo de formación de grietas

Cuando la tensión uniforme de tracción excede la resistencia del mortero, se producen las primeras grietas en la sección, y un deslizamiento entre mortero y refuerzo. La matriz agrietada no aporta tensiones, lo que implica que la carga externa es atendida por el refuerzo a través de las grietas, mientras que el mortero continúa aportando tensiones entre grietas. Aparece una nueva grieta cuando al aumentar la tensión uniforme de la matriz, entre grietas existentes, se excede de nuevo la resistencia a la tracción del mortero.

La propagación de grietas se detendrá cuando su separación relativa no sea suficiente para permitir transmisión de mayores tensiones y la resistencia a tracción no se supera. El ancho de las grietas aumenta proporcionalmente con la tensión de tracción en el refuerzo.

Resistencia en el intervalo de agrietamiento

Cuando la tensión en la matriz agrietada no vuelve a exceder la resistencia a tracción, puede suponerse el siguiente modelo de trabajo:

1. La malla de refuerzo se reemplaza por fibras alineadas equivalentes del mismo tamaño, y forma, y es continua a través de toda la longitud de la muestra.
2. El compuesto fluye cuando el refuerzo en el compuesto alcanza el límite elástico aparente.
3. Se supone que la tensión de tracción en la matriz está distribuida uniformemente a través de la sección transversal.
4. Las deformaciones por tracción de la matriz son proporcionales a las tensiones.

Resistencia última:

Equivale a la resistencia última de las fibras del refuerzo, ya que la matriz, más débil que éstas, ya no aporta resistencia.

$$\sigma_{tu} = \sum F_i^2 \sigma_{f1} V_{f1} \quad (4.3)$$

σ_{tu} : *Tensión última a tracción del compuesto.*

F_i : *Coseno del ángulo entre la fibra i y la dirección de la carga.*

σ_{f1} : *Tensión en la fibra i*

V_{f1} : *Fracción de volumen total de fibras en una sección en una serie de la franja j.*

4.4 Análisis a compresión del ferrocemento.

4.4.1 Resistencia en el intervalo elástico.

El módulo de elasticidad en una sección típica sometida a compresión, en el intervalo elástico, está dado por:

$$E_c = \frac{\sum E_{cj} n_j A_{cj}}{\sum A_{cj}} \quad (4.4)$$

E_c : Módulo de elasticidad del compuesto a compresión.

E_{cj} : Módulo de elasticidad del compuesto a compresión de la fibra j .

n_j : Numero de capas de malla del tipo j .

A_{cj} : Área de la franja j de la sección del compuesto.

Los experimentos han mostrado que el módulo de elasticidad a compresión aumenta con el contenido del refuerzo. [Pama 92, Guangjing 98, Naaman 00].

4.4.2 Resistencia ultima a compresión.

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 ultima es menor que la del mortero puro equivalente.

La capacidad a compresión del ferrocemento está ligada a las características geométricas del elemento y de la estructura. La resistencia ultima a compresión del compuesto es aproximadamente el 85 % de la resistencia del mortero [Pama 92, Mansur 90, Guangjing 98, Naaman 00].

4.5 Análisis a flexión del ferrocemento.

Este comportamiento del ferrocemento se puede estudiar con base en la teoría del hormigón reforzado. 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 (k), el momento resistente de la sección (M) y la curvatura (\square), como se ilustra a continuación. Debe aclararse que la modelación puede realizarse similarmente cuando se utiliza acero de armazón [Pama 92, Guangjing 98, Naaman 00].

4.5.1 Capacidad en el intervalo elástico.

El compuesto está en el intervalo sin agrietamiento, como se aprecia en la Figura 5.

$$0 < \varepsilon_t < \varepsilon_{cr} ; 0 < \varepsilon_c < \varepsilon_{cy} \quad (4.5)$$

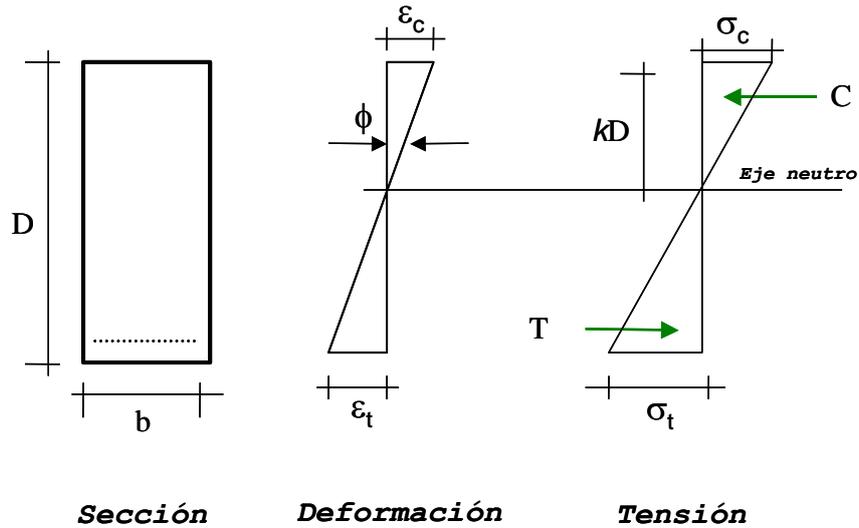


Figura 5. Distribución de deformaciones y tensiones en el intervalo elástico

Profundidad del eje neutro:

$$k = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{E_c}{E_t}}} \quad (4.6)$$

Momento resistente de la sección:

$$M = \frac{2D}{3} [T(1-k) + Ck] \quad (4.7)$$

Curvatura de la sección:

$$\phi = \frac{\epsilon_t}{(1-k)D} \quad (4.8)$$

4.5.2 Capacidad en el intervalo de agrietamiento.

1. El lado a tracción está en el intervalo de agrietamiento y el lado a compresión está en el intervalo elástico, como se muestra en la Figura 6.

$$\epsilon_{cr} < \epsilon_t < \epsilon_{ty} ; 0 < \epsilon_c < \epsilon_{cy} \quad (4.9)$$

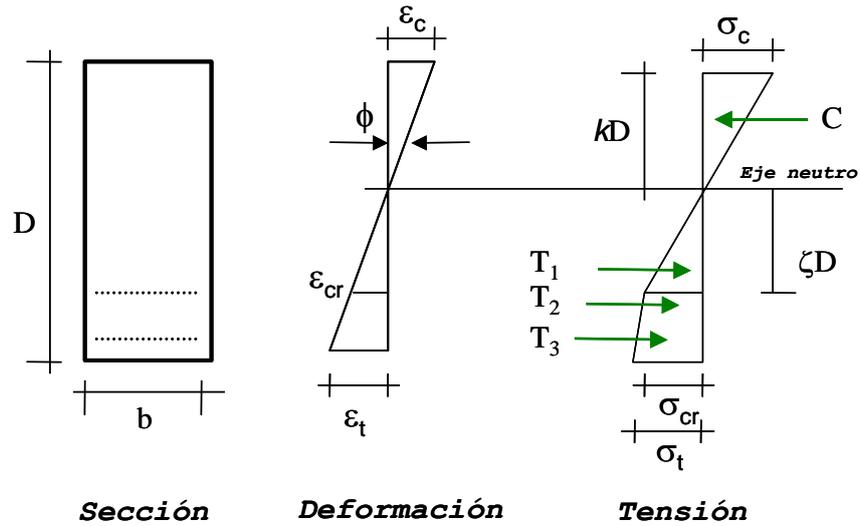


Figura 6. Distribución de deformaciones y de tensiones, cuando sólo el lado a tracción sale del intervalo elástico.

$$\text{Profundidad del eje neutro: } k = \frac{-q \pm \sqrt{m_1 q}}{(m_1 - q)} \quad (4.10)$$

Mom. Resistente. de la sección:

$$M = \frac{2D}{3}(Ck + T_1 \xi) + \frac{D}{3}\{T_2(1 - k + 2\xi) + T_3(2 - 2k + \xi)\} \quad (4.11)$$

$$\text{Curvatura de la sección: } \phi = \frac{\varepsilon_{cr}}{\xi D} \quad (4.12)$$

2. El lado a tracción está en el intervalo de agrietamiento y el lado a compresión está fluyendo, como se ve en la Figura 7.

$$\varepsilon_{cr} < \varepsilon_t < \varepsilon_{ty} ; \varepsilon_{cy} < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu} \quad (4.13)$$

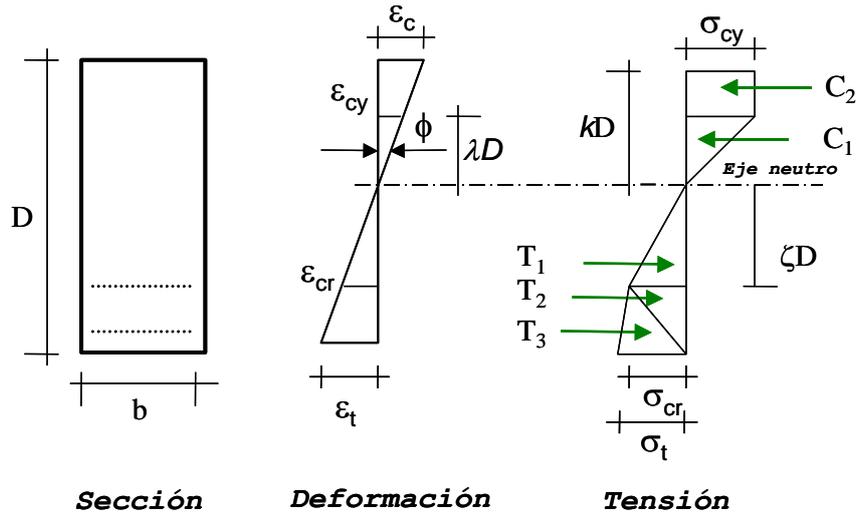


Figura 7. Distribución de deformaciones y tensiones cuando el mortero fluye a compresión y se agrieta a tracción.

Profundidad del eje neutro:

$$k = \frac{m_1 \frac{\beta^2}{\gamma} + q}{m_1 \frac{\beta}{\gamma} \left[2 + \frac{\beta}{\gamma} \right] + q} \quad (4.14)$$

Momento resistente de la sección:

$$M = \frac{2D}{3} (C_1 l + T_1 \xi) + \frac{DC_2}{2} (k + \lambda) + \frac{D}{3} \{ T_2 (1 - k + 2\xi) + T_3 (2 - 2k + \xi) \} \quad (4.15)$$

Curvatura de la sección:

$$\phi = \frac{\varepsilon_{cr}}{\xi D} \quad (4.16)$$

3. El lado a tracción está en el nivel de fluencia y el lado a compresión está en el campo elástico, como se muestra en la Figura 8.

$$\varepsilon_{ty} < \varepsilon_t < \varepsilon_{tu}; 0 < \varepsilon_c < \varepsilon_{cy} \quad (4.17)$$

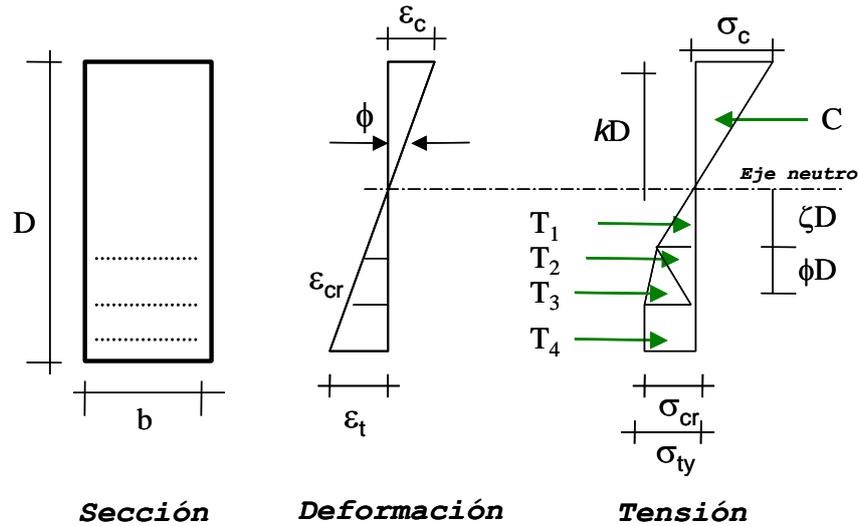


Figura 8. Distribución de deformaciones y de tensiones cuando el refuerzo está cediendo y el mortero a compresión está en el intervalo elástico.

Profundidad del eje neutro:

$$k = \frac{-t \pm \sqrt{m_1 t}}{(m_1 + t)} \quad (4.18)$$

Momento resistente de la sección:

$$M = \frac{2D}{3}(Ck + T_1\xi) + T_2D\left(\xi + \frac{1}{3}\psi\right) + T_3D\left(\xi + \frac{2}{3}\psi\right) + \frac{1}{2}T_4D(1 + \xi + \psi - k) \quad (4.19)$$

Curvatura de la sección:

$$\phi = \frac{\varepsilon_{cr}}{\xi D} \quad (4.20)$$

4. El lado a tracción y el lado a compresión están en el nivel de fluencia, como se aprecia en la Figura 9.

$$\varepsilon_{ty} < \varepsilon_t < \varepsilon_{tu} ; \varepsilon_{cy} < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu} \quad (4.21)$$

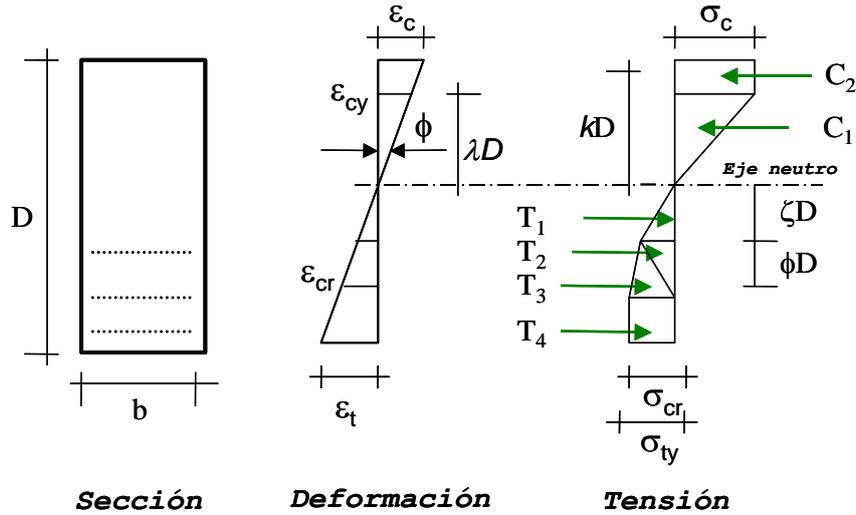


Figura 9. . Distribución de deformaciones y tensiones cuando el mortero y el refuerzo están cediendo.

Profundidad del eje neutro:

$$k = \frac{t - m_1 \frac{\alpha^2 \rho^2}{\gamma}}{t - 2m_1 \frac{\alpha\beta}{\gamma} - m \frac{\alpha^2 \beta^2}{\gamma}} \quad (4. 22)$$

Momento resistente de la sección:

$$M = \frac{2D}{3}(C_1\lambda + T_1\xi) + \frac{DC_2}{2}(k + \lambda) + \frac{D}{3}\{T_2(3\xi + \psi) + T_3(3\xi + 2\psi)\} + \frac{DT_4}{2}(1 + \xi + \psi - k) \quad (4. 23)$$

Curvatura de la sección:

$$\phi = \frac{\epsilon_{cr}}{\xi D} \quad (4. 24)$$

Donde:

ϵ_t : Deformación por tracción del compuesto

ϵ_{cr} : Deformación por tracción del compuesto en la primera grieta.

ϵ_c : Deformación por compresión en el compuesto en la fibra extrema.

ϵ_{cy} : Deformación por compresión del compuesto en fluencia.

ϵ_{ty} : Deformación por tracción en el compuesto en fluencia.

ϵ_{cu} : Deformación por compresión del compuesto en condición última.

ϵ_{tu} : Deformación por tracción en el compuesto en condición última.

4.5.3 Capacidad a momento último en flexión.

Es el momento máximo que puede resistir una sección, en el instante en que se alcanza la deformación última, ya sea por la fibra extrema a tracción o a compresión, cualquiera que ocurra primero.

Si se denota (M_{u1}), como el momento resistido por la sección cuando la fibra extrema en la zona a tracción alcanza la deformación última, y (M_{u2}), el momento resistido por la sección cuando la fibra extrema en la zona a compresión alcanza la deformación última, se tiene:

$$\text{Capacidad a momento último: } M_u = M_{u1} \quad \text{si } M_{u1} < M_{u2} \quad (4.25)$$

$$M_u = M_{u2} \quad \text{si } M_{u1} > M_{u2} \quad (4.26)$$

Con las ecuaciones propuestas en los casos 3 y 4 se obtienen los momentos últimos. La deformación última por tracción, $\varepsilon_t = \varepsilon_{tu}$ ($\varepsilon_{cy} < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu}$), puede también tomarse como la de la malla en la condición última. La deformación última por compresión, $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ ($\varepsilon_{ty} < \varepsilon_t < \varepsilon_{tu}$), puede considerarse igual a 0.006. [Pama 92, Naaman 00].

Dentro del proceso de diseño de un elemento estructural de ferrocemento a flexión debe considerarse el ancho máximo de las grietas, que debe mantenerse dentro de límites permisibles, al igual que las deformaciones. [Pama 92, Naaman 00].

4.5.4 Diagrama idealizado de momento–curvatura, ($M-\phi$), para una sección de ferrocemento.

A través de las expresiones deducidas para una sección de ferrocemento se puede elaborar un grafico que relaciona el momento resistente de la sección con la curvatura generada.

La Figura 10, muestra esta relación, que puede aproximarse con tres líneas rectas, sin perder precisión.

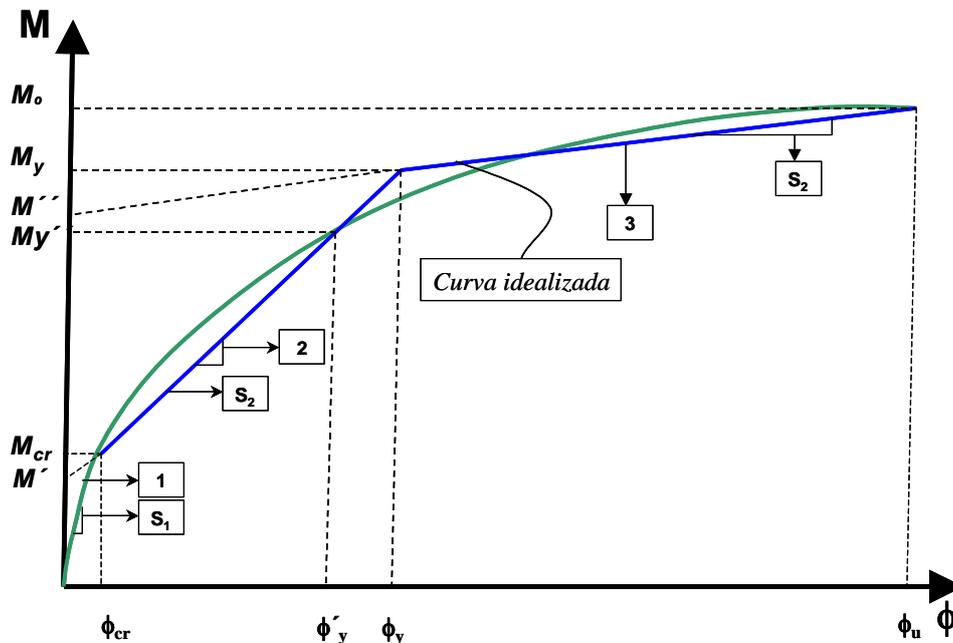


Figura 10. Diagrama idealizado de momento Curvatura. ($M - \phi$).

M'_y : Es el momento en el que se alcanza el límite plástico; controla la tensión en la fibra extrema a compresión o a tracción, dependiendo de la que tenga menor valor de ϕ'_y , así:

Momento en la fibra extrema a tracción: $M'_y = M_{ty}$ si $M_{ty} < M_{cy}$ (4.27)

Momento en la fibra extrema a compresión: $M'_y = M_{cy}$ si $M_{ty} > M_{cy}$ (4.28)

Para obtener el punto correspondiente a M_y , se utiliza la relación empírica:

$$M_y = M'_y + 0.7(M_u - M'_y) \quad (4.29)$$

y la respectiva curvatura por geometría [Pama 92, Naaman 00].

Obtenido el diagrama momento curvatura se puede calcular la curva momento - deflexión por alguno de los métodos tradicionales de la mecánica de materiales, en los tres intervalos definidos y verificar que estén dentro del límite prescrito.

Pama [Pama 92], sugiere el siguiente procedimiento para el diseño a flexión de secciones de ferrocemento:

1. Calcular el momento máximo.
2. Seleccionar una sección de prueba con una fracción de volumen conocida y con un refuerzo adecuado.
3. Obtener la curva idealizada de tensión-deformación.
4. Determinar la ubicación del eje neutro para un caso probable.
5. Determinar la deformación de la fibra extrema a compresión y su tracción correspondiente, verificar si estos valores corresponden al caso supuesto del paso 4.
6. Determinar la capacidad de momento de la sección.
7. Comparar el momento resistente de la sección de prueba con el momento aplicado: si es menor se repiten los pasos 2 al 6 para una nueva sección de prueba.
8. Determinar el ancho máximo de grieta y verificar si está dentro del límite permisible.
9. Calcular la deflexión máxima y verificar si está dentro del límite prescrito.

4.6 Análisis de la resistencia a cortante.

La resistencia a cortante en una sección de ferrocemento es la contribución de la matriz y las fibras y está dada por la siguiente expresión:

$$\tau_c = \tau_m A_m + \sum \left(\sqrt{1 - F_i^2} \right) \sigma_{fi} A_{fi} \quad (4.30)$$

Donde:

τ_c : Promedio de tensión cortante en el mortero.

τ_m : Promedio de tensión cortante en la matriz.

A_m : Área total del mortero.

A_{fi} : Área de la sección transversal de la fibra i .

El Módulo efectivo elástico para cortante está dado por la siguiente expresión:

$$G_c = G_m V_m + \sum F_i^2 E_{fi} V_{fi} (1 - F_i^2) \quad (4.31)$$

Donde:

G_c : Módulo efectivo elástico para cortante del compuesto.

G_m : Módulo efectivo elástico para cortante de la matriz.

V_m : Fracción de volumen de la matriz.

E_{fi} : Módulo de elasticidad de la fibra i .

4.7 Sistematización del diseño.

El procedimiento para el diseño de secciones de ferrocemento, descrito de manera general, en los apartes anteriores, se programó en C++ y se describe en Trejo 97, "Sistematización del Análisis y Diseño De Elementos Estructurales en Ferrocemento" [Trejo 97].

El programa posee la capacidad de analizar y diseñar secciones en U, en cajón, placas o paneles, con una entrada de datos geométricos básicos de la sección y unas propiedades específicas de los materiales a utilizar. Determina la capacidad para resistir momento, carga axial y cortante; Dicho procedimiento se efectúa con base en estudios e investigaciones de diferentes autores, citados en la bibliografía [ACI 88, Pama 92, Naaman 91, Mansur 92].

El ferrocemento, permite fabricar una variedad de formas geométricas, convencionales y no convencionales. Así, no sólo pueden fabricarse secciones en U, en cajón y laminares, sino también elementos ondulados, secciones en doble T, cúpulas y todas aquellas que la imaginación del arquitecto o del ingeniero conciba.

Con la ayuda de este u otros algoritmos sistematizados, se pueden elaborar Tablas de diseño para diferentes geometrías de la sección de ferrocemento, variando el número de capas de malla y las propiedades de los materiales.

Un ejemplo de estas ayudas de diseño se muestra en la Tabla 5, en la cual se muestra el momento resistente de las secciones U, en cajón y panel, respectivamente. Cada sección involucra una geometría y unos materiales.

Tabla 5. Ejemplo de ayuda de diseño para capacidad a momento.

Materiales	Resistencia a la compresión del mortero ($f'm$)	45 MPa
	Resistencia de la malla de refuerzo (f_{ym})	649,9 MPa
	Calibre de la malla hexagonal	20
	Diámetro de la malla	0,089 mm
	Angulo de la malla	52.5 °

Tipo de perfil	Ancho (mm)	Espesor (mm)	No.de capas de malla	Altura (mm)	Momento (kN m)
U	250	30	4	100	0,03
				150	0,05
				200	0,07
				250	0,10
				300	0,13
			6	100	0,56
				150	0,95
				200	1,38
				250	1,86
				300	2,36
			8	100	1,01
				150	1,72
				200	2,50
				250	3,34
				300	4,24
			10	100	1,39
				150	2,37
				200	3,43
				250	4,58
				300	5,81
Placa	1000	20	4	20	0,45
			6	20	0,54
			8	20	0,59
			10	25	0,92

5 PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN Y VACIADO DEL FERROCEMENTO.

Las cualidades del ferrocemento lo hacen un material versátil, adaptable a una gran diversidad de formas y técnicas de construcción. El ferrocemento requiere un mínimo trabajo especializado y materias primas de fácil disponibilidad; además, se ajusta a las necesidades del usuario.

En los procesos de construcción, el control de la calidad no debe alterar los propósitos constructivos y arquitectónicos; el control de fabricación debe estar dirigido por una persona experimentada, aunque la mano de obra no sea calificada.

5.1 Preparación de moldes y encofrados en caso necesario.

El ferrocemento puede fabricarse sin necesidad de utilizar formaletería. Sin embargo, en algunos elementos prefabricados la formaleta brinda mejores acabados externos, mejora la precisión de las dimensiones y facilita su ejecución. Los moldes para las unidades de ferrocemento pueden fabricarse con acero, madera, cerámica, hormigón, suelo-cemento, arcilla compactada cubierta con cemento, etc. La superficie de estos moldes debe tratarse antes del vaciado con aceites minerales, emulsiones asfálticas o aditivos desencofrantes para producir una superficie lisa e impermeable.

El encofrado de madera (Ver fotografía 9) tiene la ventaja de permitir la fijación de las mallas con elementos provisionales que deben ser retirados antes del endurecimiento de la mezcla [Bedoya 96].



Fotografía 9. Refuerzo sobre formaleta en madera para tanque cilíndrico [Bedoya 96]

5.2 Preparación y montaje del refuerzo.

Cuando no se utiliza formaleta, es usual utilizar un entramado de barras de acero. En general, las barras de acero no contribuyen significativamente a la resistencia estructural.

La malla de alambre se distribuye al lado interior y exterior de las barras de acero. El número de capas de malla se obtiene de acuerdo con el diseño estructural y se amarran a las varillas de acero en intervalos de 150 mm a 300 mm. La dirección de los alambres en las diferentes configuraciones de las mallas inciden en la respuesta del ferrocemento ante cargas. Los alambres de las mallas cuadradas, soldadas o tejidas,

siempre continuidades dirigen en la misma dirección, mientras que la malla hexagonal y la expandida tienen sus alambres desviados alternadamente en ángulos diferentes a 90°. Por lo tanto, las capas de estas mallas deben alternarse colocando cada capa rotada 90° con respecto a la anterior, para semejar un material isotrópico.

Las capas de malla deben amarrarse entre sí con alambres cortos, de manera firme y cuidadosa. Debe evitarse al máximo el movimiento del refuerzo durante la colocación del mortero y el vibrado. La colocación del refuerzo debe ser continua, dejando la suficiente longitud de traslapeo requerida para evitar la discontinuidad y permitir una libre acomodación de la malla.

5.3 Mezclado del mortero.

El mortero debe mezclarse en proporciones predeterminadas y de acuerdo con las especificaciones del ingeniero estructural.

El mezclado manual del mortero, se considera satisfactorio cuando se realiza cuidadosa y rigurosamente. Para estructuras de tamaño considerable y para elementos prefabricados en serie se recomienda utilizar una mezcladora de mortero para permitir una buena mezcla de alta calidad. Sin embargo, las mezcladoras convencionales de tambor giratorio pueden utilizarse con unas mínimas precauciones.

El proceso de adición de los materiales se considera apropiado cuando se mezcla la arena y el cemento y posteriormente se agrega el agua necesaria. Es conveniente realizar la mezcla siguiendo una norma estándar. El mortero debe mezclarse hasta obtenerse una mezcla uniforme y bien distribuida [Bedoya 96].

5.4 Aplicación del mortero.

Antes de realizar esta operación se debe verificar la limpieza del refuerzo (libre de polvo, rebaba del laminado, grasa y otros contaminantes). Esta es la etapa crítica y de mayor cuidado en el proceso constructivo. La aplicación del mortero se clasifica, según el procedimiento en la aplicación manual y aplicación con equipos.

5.4.1 Aplicación manual.

Es aquella en la que la aplicación del mortero se hace a mano ayudándose de herramientas de albañilería apropiadas. Se ejerce presión sobre el mortero para una mejor penetración del mortero a través del refuerzo. La colocación manual se puede hacer mediante dos procedimientos:

En una etapa:

La aplicación es monolítica dando los acabados interior y exterior a igual tiempo. Esta técnica es difícil y requiere gran habilidad para lograr una completa penetración hasta el otro lado y un buen terminado de las dos superficies. Es usual realizar esta operación colocando en el lado opuesto una formaleta vertical para aplicar el mortero sin que éste sea expulsado hacia el otro lado, asegurándose así una colocación correcta.

En dos etapas:

Se coloca el mortero en un lado, presionándolo hasta las superficies internas, como se ilustra en la Fotografía 10, se realizan los acabados y se deja curar en un ambiente húmedo por un período de tiempo no menor de 10 a 15 días. Después se limpia la superficie y se repite la operación por el lado posterior.



Fotografía 10. Colocación manual del mortero.

La calidad final de la estructura mediante esta técnica de colocación no ha sido evaluada en su totalidad. Aunque es un proceso más demorado ofrece más tiempo para dar los acabados.

5.4.2 Aplicación por medio de equipos.

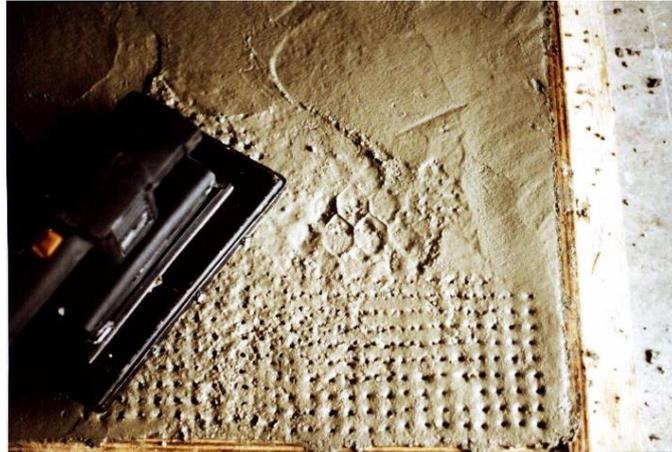
Vibración:

La presentación de morteros porosos y cubiertos en su superficie de burbujas, es consecuencia de una vibración inapropiada. El vibrado causa una agitación violenta dentro de las partículas de la mezcla, eliminando la fricción entre ellas. La mezcla se torna inestable y comienza a fluir bajo el efecto simultáneo de la vibración y la gravedad; el mortero se mueve más estrechamente contra el molde y el refuerzo. Los granos de la mezcla se reordenan llenando los vacíos entre los agregados gruesos y el aire atrapado es expulsado al exterior.

La mezcla puede segregarse por el vibrado cuando hay exceso de mortero para llenar los vacíos entre los agregados gruesos o cuando se usan tiempos excesivos de vibrado.

Existen dos formas de vibrar un mortero:

- Vibración interna: Donde el vibrador se sumerge en el mortero y las ondas vibratorias salen a la superficie, como se muestra en la Fotografía 11.



Fotografía 11. Vibración mecánica del mortero. [Bedoya 96].

- Vibración externa: La vibración se aplica a la superficie y las ondas penetran hacia el interior. Puede administrarse con vibradores de mesa, vibradores de prensa para formaleta de pared, vibradores de plataforma, reglas vibratorias para superficies planas

Los vibradores externos deben ser anclados rígidamente a la formaleta y espaciados para dar suficiente fuerza vibratoria, distribuida a todas las secciones. La formaleta debe tener un espesor apropiado, las juntas deben ser impermeables y resistentes.

La formaleta de madera tiende a reducir la fuerza vibratoria. Las reglas vibratorias ayudan al acabado de una pieza, amplia, plana y de poco espesor, aunque una acción violenta tiende a causar segregación.

Se debe tener cuidado en revisar el vibrador antes de su uso. Las profundidades de penetración y los tiempos de vibrado deben ser controlados para no perjudicar la calidad final del mortero y la vida útil del vibrador.

Para evitar interferencias entre las ondas cuando se usa más de un vibrador se debe escoger un radio de influencia apropiado. La revibración de la mezcla puede mejorar la calidad del mortero, si se hace a un tiempo oportuno.

En construcciones de ferrocemento es preferible utilizar vibradores portátiles, ligeros y que puedan ser operados con facilidad por una sola persona.

5.4.3 Proyección del mortero.

Equipos de proyección pueden lanzar el mortero con alto poder de penetración a través del refuerzo. Este tipo de equipo exige utilizar morteros de mayor manejabilidad, siendo necesario usar arenas de gradaciones adecuadas y aditivos para no elevar la relación agua - cemento. Además en superficies verticales o inclinadas con un pequeño número de mallas, este procedimiento se hace difícil.

El proceso de proyección por vía seca, donde los materiales secos son expulsados por aire comprimido y en la boquilla se adiciona el agua, es de operación bastante difícil; presenta a menudo problemas de segregación de los materiales, rebote de los granos, formación de bolas de arena debida a mala dosificación y desperdicios altos de material.

Otros equipos empleados han sido carros vibratorios para producción continua de elementos prefabricados, máquinas vibrocompactadoras, máquinas de extrusión y centrifugado y máquinas que colocan el mortero y la malla simultáneamente.

5.5 Curado de las estructuras de ferrocemento.

Para obtener morteros de buena calidad, la aplicación y el vibrado del mortero deben complementarse con un buen curado en un ambiente adecuado durante edades tempranas. La hidratación del cemento sólo ocurre en presencia del agua y por ende el desarrollo de la resistencia y la durabilidad.

Existen procedimientos de curado que dependen de las condiciones de la obra, tamaño, forma y posición de la estructura.

5.5.1 Curado por humedad.

Una vez fraguado el mortero se coloca en contacto con una fuente de suministro de agua por 10 a 14 días; Esto se logra mediante aspersión, anegamiento o cubrimiento de la superficie con arena, tierra, aserrín o paja mojados. El cubrir la superficie con mantas, costales y mojarlos con aspersores ha resultado el método más útil y el más popular.

5.5.2 Curado con membrana impermeable.

Se utiliza plástico o telas impermeables sobre la superficie expuesta, lo que evita la evaporación del agua del mortero. Los colores opacos de la membrana tienen efecto de sombrear el hormigón, los de color ayudan a absorber el calor lo que le acelerará el desarrollo del mortero. El curado debe continuarse mínimo durante siete días para evitar la contracción, agrietamiento o menor desarrollo de la resistencia debido a un secado prematuro.

5.5.3 Curado con vapor.

Este método es propicio para clima frío y cuando se necesiten desarrollos de resistencias a temprana edad. Es particularmente útil para la producción industrial de elementos prefabricados.

Las mezclas con relación agua - cemento bajas responden mucho mejor a este curado.

La experiencia ha demostrado que este curado reduce la contracción, aumenta la resistencia y la vida del concreto. El periodo de enfriamiento no debe ser brusco para no causar efectos perjudiciales a la estructura.

5.6 Tratamiento superficial.

Las estructuras de ferrocemento recubiertas adecuadamente no necesitan protección sofisticada. Si la estructura se encuentra bajo condiciones agresivas (ataques químicos, aguas negras o marinas) se necesita un tratamiento superficial para evitar el daño a la integridad de la estructura. Esta protección puede brindarse satisfactoriamente mediante revoques especiales como morteros modificados con acrílico, vinilo o epóxico. Cualquiera que sea el material debe tener las siguientes propiedades:

- Buena adhesión al mortero.
- Tolerancia a la alcalinidad.
- Alta resistencia química y a la abrasión.
- Aislamiento eléctrico.

- Impermeabilidad al agua.
- Atóxicidad y fácil manipulación.
- Secado rápido.
- Simple aplicación.
- Fácil mantenimiento.

5.7 Industrialización.

El concepto de la industrialización del ferrocemento esta ligado a la prefabricación. La prefabricación se concibe como un método industrial de construcción en el que los elementos son fabricados en serie, con técnicas de producción masiva. Las técnicas de prefabricación, sin embargo, no se limitan a la fabricación misma de los elementos en la industria, sino también al montaje de las piezas en la obra.

La producción en serie con técnicas, máquinas y métodos industriales resulta en construcción con precisión dimensional, lo que, a su vez, permite la automatización de otras fases, como el transporte, la colocación y el anclaje en el sitio.

Por sus características, especialmente su idoneidad para la fabricación de elementos de pared delgada, el ferrocemento es un material ideal para la prefabricación e industrialización.

De manera similar a los elementos fabricados con acero estructural, los elementos de ferrocemento se pueden construir con secciones transversales estandarizadas en elementos modulares de fácil almacenaje.

Por otra parte, el ferrocemento se presta para procesos semi-industriales, como la prefabricación en el sitio de la obra, con un mínimo de consumo energético, requiriendo herramientas mecánicas pequeñas como cortadoras de mano, alicates, martillos, sierras, palustres, llanas, etc. En países en desarrollo el ferrocemento puede fabricarse en pequeñas y medianas industrias con poca mano de obra especializada. La industrialización con ferrocemento constituye una importante opción en zonas en donde los materiales tradicionales se trabajan con formas de producción artesanales y lentas [Pama 92, Bedoya 96].

6 CONFIGURACIÓN Y SISTEMA DE RESISTENCIA SÍSMICA.

6.1 Criterios básicos para la configuración estructural.

El diseño en la ingeniería civil tiene por objeto final elaborar planos que le permitan al constructor edificar la obra bajo con criterios específicos de seguridad, economía y funcionalidad. La mayor parte de las sollicitaciones que la obra deberá enfrentar son relativamente fáciles de predecir y determinar y el ingeniero puede dimensionar la estructura para que no sufra daños bajo carga. Sin embargo, las cargas sísmicas están asociadas a grandes incertidumbres.

El ingeniero que diseñe estructuras sismo resistentes debe comprender la naturaleza del problema y su relación con sus efectos sobre las estructuras. De hecho, debido al carácter inherentemente impredecible de los fenómenos telúricos, la ingeniería sísmica hace uso de la disipación de energía a través de la generación de “*daños aceptables*” en la estructura, de acuerdo con el nivel de la sollicitación, de manera que se proteja, en primer lugar, la vida y, en segundo lugar y de manera razonable, la propiedad.

6.1.1 Planteamiento arquitectónico de la estructura.

¿Cómo puede influir el trabajo del arquitecto en el desempeño sísmico de una estructura? Es usual asumir que el ingeniero es responsable de definir la estructuración apropiada para garantizar la seguridad, de manera estable, duradera y económica, de un diseño arquitectónico preconcebido independientemente, con base en criterios económico-sociales de funcionalidad y estética. La realidad es que los problemas de estabilidad e integridad estructural no pueden desligarse del proceso inicial de diseño arquitectónico, pues de allí se obtienen los parámetros de rigidez, simetría, modulación, etc.

Una gran parte de la resistencia inherente de la estructura a fuerzas laterales está determinada por la distribución de su planta básica. Los arquitectos e ingenieros deben reconocer que la forma, la simetría y la distribución general del proyecto desarrollado en la etapa conceptual de la estructura, son más relevantes, o contribuyen de una manera más significativa en la determinación exacta de las fuerzas de diseño, que el propio análisis estructural. En una configuración deficiente, todo lo que puede hacer el ingeniero es tratar de mejorar una estructuración inadecuada, lo mejor posible, cosa que no siempre es practicable. En el diseño conceptual del sistema de resistencia sísmica, la sencillez, la continuidad y la simetría son tan importantes, o acaso más, que las fuerzas laterales de diseño. Una buena configuración aumenta la confiabilidad de la estructura y disminuye el riesgo de daños durante eventos sísmicos [Reitherman 98, Bozzo 2000].

6.2 Sistemas estructurales de resistencia sísmica.

El sistema de resistencia sísmica debe garantizar la adecuada transmisión de las cargas inerciales a través de toda la estructura, hasta la cimentación. De acuerdo con la mayoría de las normativas existentes, cada proyecto debe estructurarse con sistemas claramente definidos. Las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistentes, NSR-98, Ley 400 de 1997, y sus decretos reglamentarios, reconocen cuatro tipos de sistemas de resistencia sísmica: Sistema de muros de carga, sistema de pórticos resistentes a momento, sistema combinado y sistema dual.

Debido al carácter aleatorio de las sollicitaciones sísmicas, es conveniente no utilizar sistemas isostáticos para estructuraciones sismo resistentes, pues se aumenta el riesgo de colapso progresivo.

Es posible construir estructuras sismo resistentes con elementos prefabricados. Sin embargo, su carácter modular resulta en sistemas de ductilidad cuestionable, por lo que no se permite reducir las fuerzas del cálculo elástico en más de 1,5 ($R_0=1,5$). Además, para permitir el uso de sistemas prefabricados en zonas sísmicas, las NSR-98 exigen que el productor obtenga un “régimen de excepción”, otorgado por la Comisión Permanente Asesora de las normas, con base en estudios suficientemente argumentados, analítica y experimentalmente, que garanticen su idoneidad estructural ante cargas sísmicas.

El ferrocemento se presta para prefabricar tanto perfiles estructurales para la construcción de sistemas apertados, como para prefabricar paneles modulares para la construcción de sistemas estructurales de muros. El objeto del desarrollo que aquí se presenta está se basa en sistemas con muros construidos con paneles prefabricados de ferrocemento.

6.3 Criterios de resistencia sísmica.

En todo sistema estructural con base en muros, los diafragmas horizontales deben ser capaces de transmitir ambas cargas gravitacionales y laterales a los muros estructurales. Todos los muros comparten la responsabilidad de transmitir las sollicitaciones verticales hasta la cimentación, en función del área aferente del diafragma que se las transmite.

Si los muros en direcciones ortogonales no están rígidamente conectados entre sí, los muros alineados en una dirección son responsables de transmitir las cargas horizontales que los diafragmas le transmiten en esa dirección, en función de su propia rigidez relativa o en función al área aferente del diafragma, si éste se puede considerar rígido o flexible en su propio plano, respectivamente.

Para que la transmisión de cargas se logre con eficiencia y seguridad, el sistema de resistencia sísmica deberá garantizar el comportamiento, tanto individual como de conjunto, ante cargas verticales y horizontales. Esto se puede lograr a través de los siguientes mecanismos:

- a) Un conjunto de muros estructurales, , dispuestos de tal manera que provean características de resistencia y rigidez suficientes, en las dos direcciones principales, para resistir adecuadamente las cargas verticales y laterales sin generar giros en planta por torsión global de la estructura. En el caso de elementos prefabricados, los muros estructurales atienden solamente las sollicitaciones horizontales paralelas a su propio plano, desde el nivel donde se generan, hasta el nivel de la cimentación.
- b) Un sistema de diafragmas en el nivel de cada piso y en el nivel de cubierta, que obligue al trabajo conjunto de los muros estructurales, mediante amarres que transmitan a cada muro la fuerza lateral que le corresponda.
- c) Un sistema de cimentación que transmita al suelo las cargas derivadas de la función estructural de cada muro. Este sistema debe tener una rigidez adecuada para prevenir asentamientos diferenciales inapropiados y, además, deberá constituir un diafragma. [AIS 98, CORVIDE 99, García 98].

6.4 Disposición de los elementos estructurales de ferrocemento.

Debido a que los muros resisten las cargas horizontales paralelas a su propio plano, es conveniente la colocación de muros en las dos direcciones ortogonales. Es preferible siempre tener longitudes similares en ambos sentidos.

Debe tenerse cuidado con los casos frecuentes en que el entrepiso trabaja en una dirección, por la tendencia a colocar muros de carga en una sola dirección. Es necesario utilizar muros de rigidez suficientes en la dirección ortogonal [Bedoya 98, Reitherman 98, García 98].

6.4.1 Simetría.

Para evitar torsiones en toda la edificación, ésta debe tener una planta lo más simétrica posible. La edificación como un todo y los módulos que la conforman deben ser simétricos respecto a sus ejes.

Los diseños de planta arquitectónica asimétrica deben concebirse por medio de módulos simétricos adyacentes, separados entre sí por medio de juntas con dimensiones apropiadas para permitir el desempeño independiente de cada módulo. Así mismo, los vanos de puertas y ventanas distribuirse lo más homogéneamente posible para evitar concentraciones rigidez inadecuadas [Reitherman 98].

6.4.2 Continuidad.

El trabajo de conjunto se ve afectado por la continuidad horizontal y vertical de los muros estructurales:

- a) *Continuidad vertical*: Cada muro se considera estructural, si existe continuidad vertical desde la cimentación hasta un diafragma superior. Si pierde la continuidad vertical en más de la mitad de su longitud, ya no es considerado estructural.
- b) *Continuidad horizontal*: Existe continuidad horizontal cuando los muros estructurales están alineados horizontalmente al menos por parejas. Cuando no exista alineamiento horizontal, los muros deben amarrarse [Bedoya 98, Reitherman 98].

6.4.3 Integridad estructural.

Para garantizar el trabajo en conjunto de los elementos que conforman el sistema de resistencia sísmica es necesario que, además de continuidad de los muros, exista integridad estructural. Para lograrlo se debe emplear amarres longitudinales y transversales, para conectar los elementos prefabricados al sistema de resistencia sísmica.

En todo elemento estructural vertical prefabricado, hay necesidad de cumplir amarre vertical. No se permite el uso de detalles de conexión que dependan únicamente de la fricción causada por las cargas verticales.

6.4.4 Dimensiones modulares.

El buen funcionamiento de la estructura y la capacidad mecánica de los muros estructurales dependen principalmente de la calidad de los materiales y de la mano de obra. El uso de elementos enteros permite mejorar la calidad de la obra, racionaliza el uso de los materiales y conserva la integridad de los elementos.

Por lo tanto, el diseño arquitectónico de un proyecto que se construya con elementos prefabricados debe basarse en dimensiones ñeque permitan la coordinación modular con las dimensiones estándar de los perfiles o los paneles estándares.

6.4.5 Elementos de amarre.

Son aquellos elementos que confinan horizontal y verticalmente a los muros estructurales. Su diseño se basa en las especificaciones de confinamiento requeridas por el diseño estructural.

Los paneles prefabricados de ferrocemento se deben amarrar entre sí y al sistema general para conformar los muros del sistema de resistencia sísmica.

6.4.6 Diafragmas.

Un diafragma es un sistema estructural que amarra los muros de la estructura de manera que actúan como un conjunto. El entrepiso o la cubierta podrán considerarse como diafragmas cuando cumplan con una serie de requisitos que garanticen su efectividad.

Si el diafragma es rígido en su propio plano, distribuye las fuerzas sísmicas entre los diferentes muros en cada dirección, en función de su rigidez relativa con respecto a la rigidez total de los muros en la dirección atendida.

La rigidez de cada muro en su plano depende, entre otros factores, del material que lo constituye, su geometría, y del grado de conectividad con los demás elementos.

En general, el diafragma, independientemente del grado de rigidez en su propio plano, debe ser resistente, debe tener integridad estructural entre sus elementos y debe estar adecuadamente amarrado a los elementos verticales que transmiten las fuerzas a los niveles inferiores.

Si el diafragma no puede considerarse rígido en su plano, las fuerzas se distribuyen a cada muro en función del área aferente del diafragma que le corresponde por su distribución en planta, con respecto a los demás muros [A. I. S 98, Bedoya 98].

6.4.7 Peso de los elementos:

Las fuerzas que genera el sismo son fuerzas inerciales y por lo tanto, mientras mayor sea la masa, mayor será la fuerza generada.

Las estructuras de ferrocemento son estructuras relativamente livianas, lo que, asistido de un buen diseño, las puede beneficiar en su comportamiento sísmico.

6.5 Distribución de las fuerzas sísmicas entre los elementos resistentes.

Las normas NSR-98 [AIS 98] establecen los siguientes requisitos, cuando el comportamiento del sistema requiere que se transfieran fuerzas que actúan en el plano de los elementos de un sistema de entrepiso, o de un muro, prefabricados:

- a) En el diseño deben identificarse las trayectorias de las fuerzas que actúan en el plano del elementos y en las conexiones. Además, debe verificarse su continuidad.
- b) Debe identificarse en el diseño la trayectoria de las fuerzas de tracción a través del acero de refuerzo.
- c) Las fuerzas ocasionadas por deformaciones debidas a retracción de fraguado, flujo plástico y variación de temperatura deben incluirse en el diseño de las conexiones.

- d) El diseño de los elementos prefabricado que hacen parte de una estructura prefabricada, deben diseñarse de acuerdo con las normas y títulos correspondientes, para sistemas prefabricados.

En todo caso, la distribución de las fuerzas horizontales, entre los elementos resistentes, depende de las rigideces relativas de los muros, y también de las rigideces de los muros frente a las de los diafragmas horizontales [AIS-98, Bedoya 98]. Cuando se considera diafragma rígido las cargas son distribuidas de acuerdo con la rigidez de los elementos estructurales y cuando se considere diafragma flexible la distribución se realiza en función de las áreas aferentes a los elementos estructurales.

6.5.1 Diafragma completamente rígido en su plano.

Cuando la configuración geométrica y la calidad de los materiales de los diafragmas horizontales son tales que le aportan una rigidez mucho mayor que la de los muros, se suelen suponer completamente rígidos frente a ellos. El reparto de las fuerzas horizontales, en este caso, es un problema hiperestático, en función de la rigidez relativa de cada muro.

Existen cuatro niveles de enfoque posible para la solución de este problema:

- a) Utilizar un modelo tridimensional, con elementos finitos, modelando el diafragma rígido y los muros, incluyendo el efecto de las aberturas.
- b) Modelar a mano el muro con aberturas, considerando tanto la flexibilidad cortante como la flexibilidad en flexión de los elementos con las aberturas. Luego, llevar a cabo un análisis clásico, considerando el edificio como un tubo, y calcular los cortes mediante el flujo de cortantes. Tal análisis rendirá, no solamente cortes en los muros que van paralelos a la carga, sino también cortes en los muros perpendiculares, debido al giro de la estructura en planta, si existe.
- c) Modelar a mano el muro con aberturas considerando solamente el aporte de rigidez por tensiones de corte. Luego, se lleva a cabo un análisis clásico considerando el edificio como un tubo, y se calcula el flujo de cortantes.
- d) Modelar a mano el muro con aberturas, calculando su rigidez con base en los aportes de las tensiones de flexión y las tensiones de corte y repartiendo la fuerza solamente a los muros que van paralelos a la carga [AIS-98, Bedoya 98]. La respuesta torsional del edificio se calcula de forma independiente, con base en la posición relativa entre el centro de rigidez y el centro de masa en cada nivel.

Cuando se puede suponer el diafragma completamente rígido en su propio plano, la distribución de las fuerzas depende de su rigidez. La rigidez de un panel se define como la relación entre la fuerza cortante aplicada en un tramo y la deformación relativa producida entre el nivel superior e inferior del tramo.

6.5.2 Diafragma flexible.

Cuando la configuración geométrica y la rigidez material de los diafragmas horizontales son tales que no le aportan rigidez considerablemente mayor que la de los muros, se suelen considerar flexibles. Entonces se calcula el reparto de cortes entre los muros considerando a los entresijos como diafragmas flexibles en sus propios planos. Los muros se consideran como apoyos y el diafragma, como una viga que yace encima de ellos.

En este caso la distribución de las fuerzas horizontales, son un problema isostático, en función de la masa que cada elemento debe cargar [AIS-98, Bedoya 98].

7 CONEXIONES.

El concepto de conexión en estructuras prefabricadas está ligado, al concepto de integridad estructural. En el diseño de elementos prefabricados en general y específicamente en elementos de ferrocemento, este debe involucrar, todas las condiciones de carga y restricciones desde la fabricación hasta el uso final en la estructura, incluyendo desencofrado de los elementos, almacenamiento, transporte y montaje.

Una falla en cualquiera de las conexiones puede poner en peligro la integridad de la estructura ante sollicitaciones de cualquier tipo, ocasionar retrasos en el proceso constructivo, e, inclusive la pérdida de vidas. Obviamente, la falla o la ineficiencia de las conexiones genera también pérdidas económicas. En el mercado se ofrecen en la actualidad muchos sistemas de conexión para diseñar la conectividad entre uno o varios elementos prefabricados, capaces de resistir las acciones impuestas.

Por lo general, el diseño de estas conexiones se realiza según el criterio del ingeniero calculista, pero teniendo en cuenta factores como costos, disponibilidad de materiales en el mercado, procesos constructivos y métodos de anclaje, entre otros. Este es uno de los pasos de más cuidado y de mayor importancia en el diseño de estructuras prefabricadas de ferrocemento.

Desde el inicio mismo del análisis de la estructura, se debe visualizar las rutas por donde circularán las cargas, los nudos a los cuales llegarán y los elementos que se deben ensamblar. Esto permite conocer y verificar las fuerzas para el diseño de las conexiones.

Las NSR-98 incluyen las siguientes consideraciones adicionales para conexiones y anclajes en sistemas con estructuras prefabricadas:

- a) Se permite transferir las fuerzas entre los elementos por medio de juntas de mortero, llaves de cortante, conectores mecánicos, conexiones utilizando acero de refuerzo, o combinación de estos medios.
- b) La bondad de las conexiones para transferir las fuerzas entre los elementos puede determinarse por análisis o ensayo.
- c) Cuando se diseñen conexiones que contengan materiales con propiedades mecánicas diferentes entre sí, debe tomarse en cuenta la rigidez, resistencia y ductilidad relativas.
- d) Cuando los elementos prefabricados se coloquen dentro de un sistema estructural existente, las fuerzas y las deformaciones que ocurran en las conexiones y sus cercanías, deben ser incluidas en el diseño.
- e) El diseño de los elementos prefabricados y sus conexiones debe incluir el efecto de las tolerancias especificadas para la fabricación e instalación y las tensiones temporales de instalación.
- f) En los planos se debe incluir, los detalles de los refuerzos, aditamentos, elementos de izaje, y la resistencia del material utilizado para resistir las cargas temporales de manejo almacenamiento, transporte y montaje.

En estructuras prefabricadas, la integridad, continuidad, funcionalidad y vida útil de la estructura dependen estrictamente del sistema de conectividad elegido para cada uno de los elementos.

Los sistemas de anclaje y de conexión suelen conseguirse comercialmente en una amplia gama de posibilidades. Sin embargo, el ingeniero calculista no puede delegar la responsabilidad de verificar la idoneidad estructural de los elementos que especifique.

7.1 Servicio.

En el diseño de los elementos prefabricados de ferrocemento, sus conexiones y anclajes, debe tenerse en cuenta todas las fuerzas y distorsiones que se puedan presentar durante las condiciones de servicio. Estas fuerzas y distorsiones pueden aparecer en las etapas de curado, desencofrado, almacenaje, transporte y erección.

El diseño de las conexiones deben incluir las sollicitaciones de los procesos almacenaje, transporte o colocación, aunque sean de ocurrencia temporal.

Especial cuidado debe aplicarse al análisis de las sollicitaciones de izaje de los elementos prefabricados, en las diferentes etapas de salida de producción, almacenamiento en bodega, transporte y almacenamiento e instalación en obra.

8 EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA ANTE CARGAS SÍSMICAS.

La estructura de una edificación debe diseñarse para que tenga resistencia y rigidez adecuada ante las cargas a las que se pueda ver sometida durante su vida de servicio, por encima de las cargas mínimas de diseño prescritas en las normas pertinentes y verificarse que dispone de una apropiada rigidez para que las deformaciones no afecten la funcionalidad de la estructura o su integridad.

Las NSR-98 [AIS 98], exigen un procedimiento para el diseño estructural del sistema de resistencia sísmica y los métodos aceptados para el análisis dinámico son: Método de la fuerza horizontal equivalente, método de análisis elástico y métodos de análisis inelástico.

A continuación se presenta el análisis y diseño de una estructura de ferrocemento, con un sistema de resistencia sísmica de muros, hechos con paneles prefabricados de dicho material, para uso de vivienda en Medellín, Colombia. El diseño se realiza con base en los requerimientos mínimos especificados por las NSR-98, [AIS 98].

En las figuras 11 y 12 se presentan la fachada principal y la planta arquitectónica del proyecto, respectivamente.

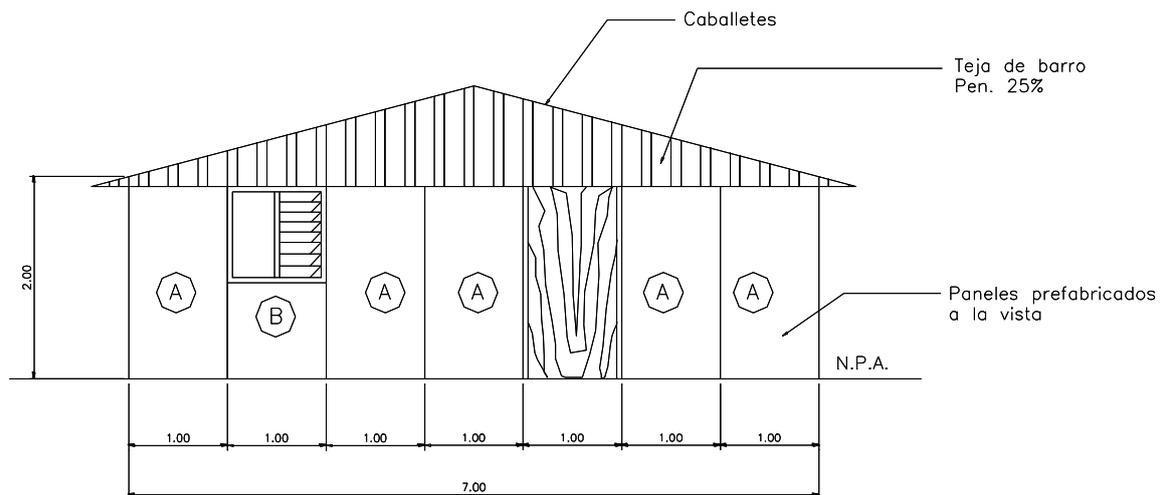


Figura 11. Fachada principal [Bedoya 98].

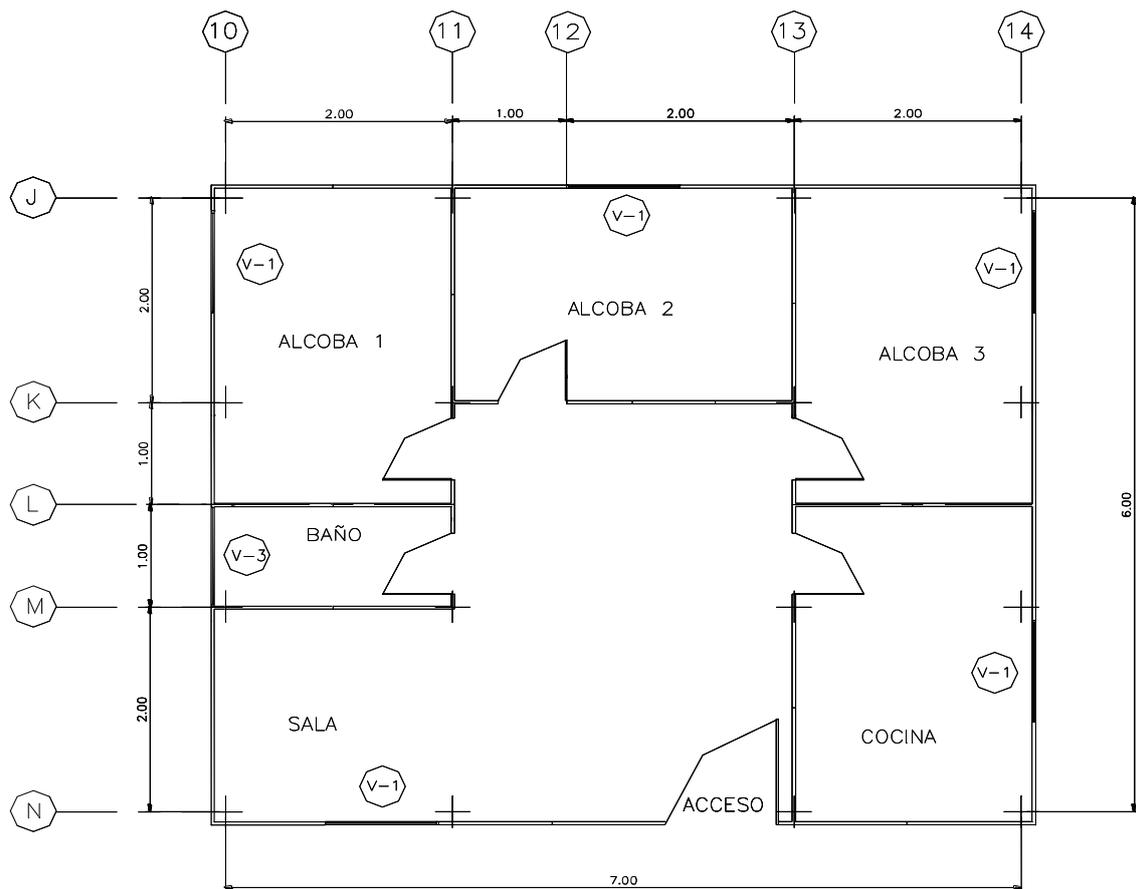


Figura 12. Planta arquitectónica primer piso [Bedoya 98]

Los resultados del análisis del sistema de resistencia sísmica propuesto se comparan con los resultados de una modelación del proyecto con un programa de elementos finitos para computadora.

8.1 Análisis estructural.

El análisis estructural se realiza considerando los efectos más desfavorables sobre la estructura, en las dos direcciones principales.

De acuerdo con el planteamiento arquitectónico, de las Figuras 11 y 12, todos los muros, fabricados con los paneles que se muestran en la Figura 13, conforman el sistema de resistencia sísmica, en las dos direcciones principales en planta, mostrado en la planta estructural de la Figura 14.

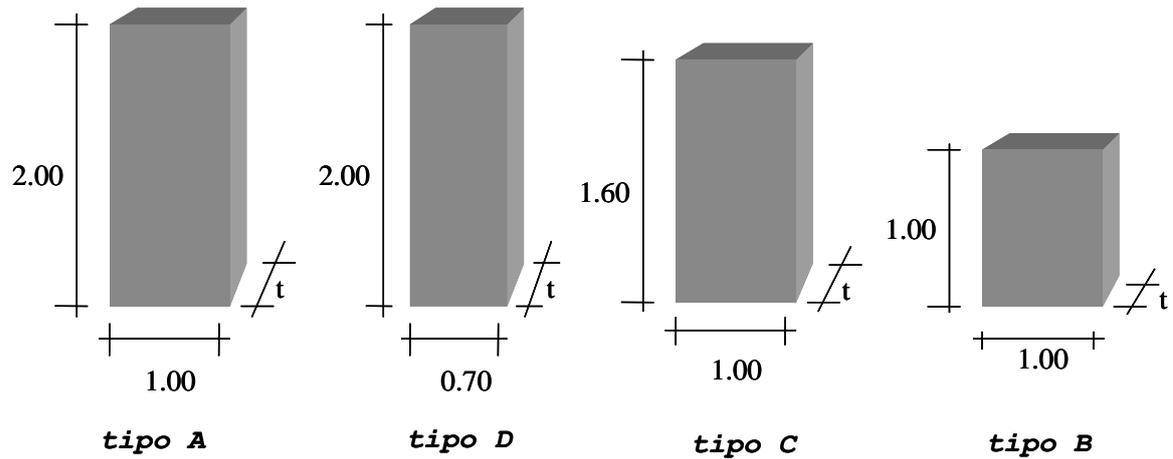


Figura 13. Elementos estructurales típicos en ferrocemento.

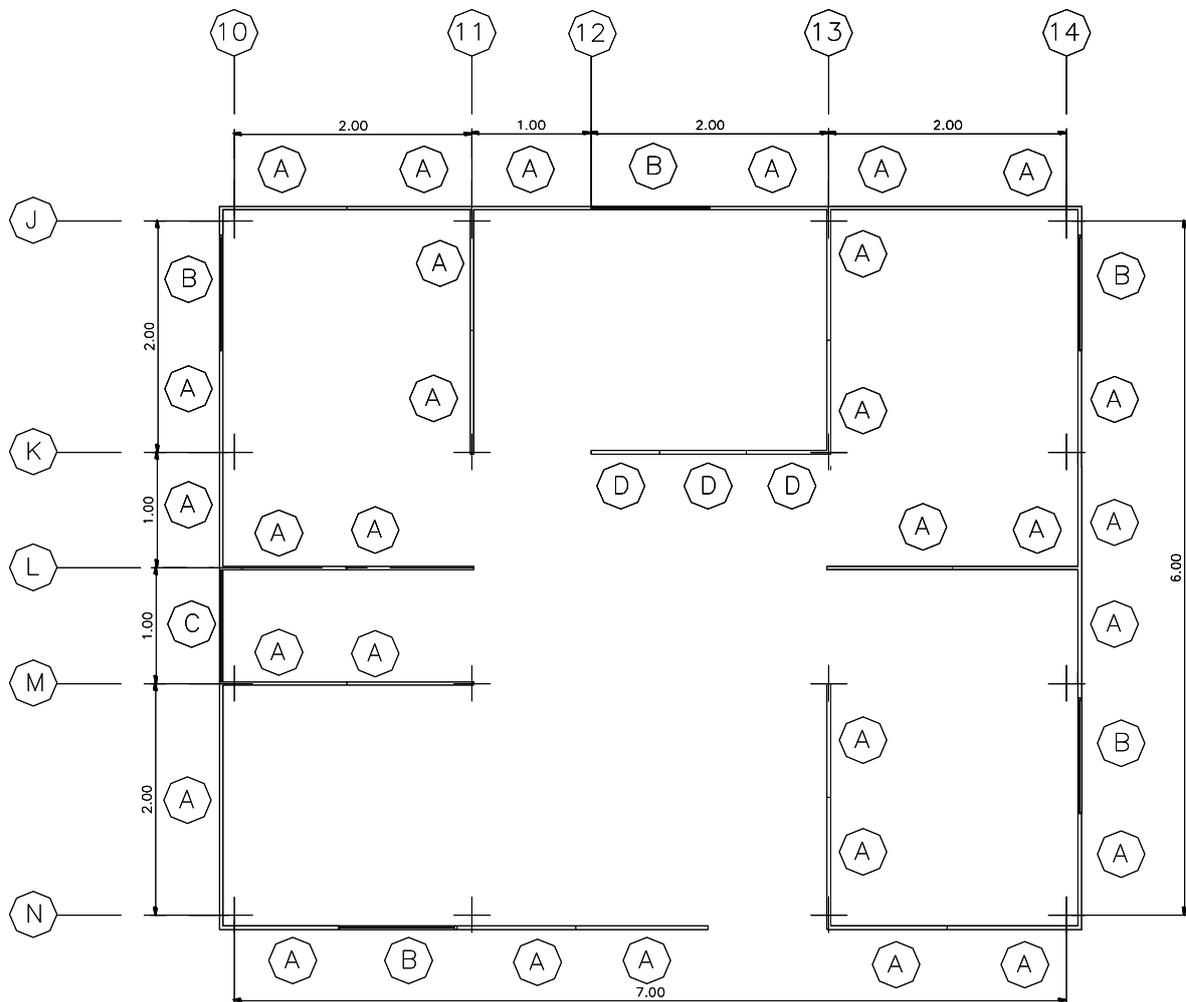


Figura 14. Planta estructural del sistema de resistencia sísmica.

8.1.1 Obtención de las cargas verticales.

Las cargas verticales del modelo corresponden al peso propio del sistema estructural y al de los elementos no estructurales, que en esta caso se limitan al peso de la cubierta. Todos los muros de ferrocemento hacen parte del sistema estructural para

la transmisión de las cargas verticales hasta la cimentación. El modelo se desarrolla con la mayor carga de cubierta posible que, en Colombia, corresponde a un techo en teja de barro, apoyada sobre tela asfáltica y tablilla, clavada a su vez sobre alfardeas de madera soportadas directamente por el sistema de muros.

En la tabla 6, se listan las cargas gravitacionales para la estructura bajo estudio.

Tabla 5. Cargas verticales del sistema de resistencia sísmica.

Cargas verticales sobre la estructura.			
<i>carga muerta de cubierta</i>	<i>D</i>	1.50	kN/m ²
<i>carga viva de cubierta</i>	<i>L_c</i>	0.35	kN/m ²
<i>carga viva de entrepiso</i>	<i>L</i>	1.80	kN/m ²
Peso de los muros estructurales.			
<i>peso específico del material</i>	<i>γ</i>	24	(kN/m ³)
<i>base del muro</i>	<i>b</i>	1.00	m
<i>espesor del muro</i>	<i>t</i>	0.02	m
<i>altura del muro</i>	<i>H</i>	2.0	m
<i>longitud de los muros</i>	<i>L</i>	32	m
<i>peso de los muros estructurales</i>	<i>P_m</i>	15.4	kN
Peso de la estructura primer nivel.			
<i>área de la cubierta</i>	<i>A_c</i>	42.00	m ²
<i>peso de la cubierta</i>	<i>P_c</i>	63.00	kN
<i>peso de los muros estructurales</i>	<i>P_m</i>	15.36	kN
<i>peso total</i>	<i>P_t</i>	78.36	kN

8.1.2 Obtención de las cargas horizontales.

Las NSR-98 [AIS 98] permiten considerar las cargas sísmicas por medio de análisis dinámico (análisis modal) o por medio del método de la fuerza horizontal equivalente; en este trabajo se utiliza éste último.

El método se basa en la distribución lineal en altura de la cortante basal calculada como la fuerza inercial debida a la masa total de la estructura sometida a la aceleración espectral de la estructura en el sitio del proyecto.

En la Tabla 6, se desarrollan los cálculos correspondientes.

Tabla 6. Cargas horizontales del sistema de resistencia sísmica.

Método de la Fuerza Horizontal Equivalente.					
Localización geográfica o Zona de amenaza sísmica	1	Medellín		1	
	2	Bogota			
	3	Cali			
Amenaza sísmica		Aa		0.20	
Tipo de perfil del suelo				S2	
Coefficiente de sitio		S		1.20	
Grupo de uso				I	
Coefficiente de importancia		I		1.00	
Coefficiente para calcular el período		Ct		0.05	
Numero de pisos de la edificación				1	
Altura típica de entrepiso		H		2.00	m
Altura total.		Hn		2.00	m
Período de vibración fundamental aproximado.		Ta		0.08	s
Período de vibración, en zona de transición	$T_c = 0.48 S$			0.58	s
Período de vibración, para períodos largos	$T_L = 2.4 S$			2.88	s
Espectro elástico de diseño.		Sa		0.50	
$Sa = 2.5 Aa I$	$Si T < T_c$			0.50	
$Sa = 1.2 Aa S I / T$	$Si T_c < T < T_L$			3.42	
$Sa = Aa I / 2$	$Si T > T_L$			0.10	
Calculo de la cortante sísmica en la base.					
Peso total de la edificación.		Pt		78.36	kN
Cortante sísmico en la base	$V_s = Sa Pt$	Vs		39.18	kN
Exponente para el período fundamental.		k		1.00	
$k = 1.0$	$Si T < 0.50$			1.00	
$k = 0.75 + 0.5 T$	$Si 0.5 < T < 2.5$			0.79	
$k = 2.0$	$Si T > 2.5$			2.00	
Calculo de las fuerzas sísmicas horizontales.					
Nivel	hx (acumulada)	P_x	$P_x h_x^k$	C_{vx}	F_x
	m	kN		%	kN
Cubierta	2.00	78	156.72	1.00	39.18
Total	2.00	78.36	156.72	1.00	39.18

8.1.3 Análisis de cargas horizontales considerando diafragma rígido.

Si se pudiese asumir que el diafragma horizontal al nivel del enrase de la cubierta es rígido en su propio plano, las solicitaciones horizontales, serán distribuidas a la estructura de acuerdo con la rigidez relativa de cada elemento con respecto a la rigidez de todos los elementos en cada una de las dos direcciones ortogonales en planta de la estructura.

Esta metodología es válida siempre y cuando el diafragma sea indeformable en su plano.

No se considera el aporte de los paneles tipo B para este análisis, ni la fuerza de fricción generadas en el machihembrado de las juntas.

Los muros se identifican de acuerdo con el eje a lo largo del cual se encuentran y los ejes perpendiculares que los limitan, en función de la numeración de ejes que se presenta en la Figura 12. Cada muro está constituido por paneles que trabajan independientemente, de manera que cada panel aporta su rigidez en cada dirección. Como todos los paneles tienen las mismas dimensiones, la carga lateral se distribuye por igual a cada uno de los paneles. En la Tabla 7, se presenta el análisis de la distribución de la cortante sísmica en la base, al sistema de resistencia sísmica conformado por los muros prefabricados, en las dos direcciones principales.

El cálculo de la fuerza sísmica sobre el elemento estructural, prefabricado de ferrocemento, se obtuvo por medio de las ecuaciones 8. 1 y 8. 2.

$$F_x = \frac{V_s}{N_p} \quad (8. 1)$$

Donde F_x es la fuerza sísmica en el elemento estructural, V_s es la cortante sísmica en la base, y N_p es el número de paneles en la dirección considerada.

Tabla 7. Distribución de la carga al sistema de resistencia sísmica.

Análisis de las cargas horizontales en el sentido X, (muros paralelos a los ejes literales).

ubicación de muros	longitud cubierta	ancho cubierta	área aferente	# paneles	% de carga (área)	cortante por muro	cortante por panel
	m	m	m ²			kN	kN
Cubierta			42.00	20	1.00	39.2	
J (10 - 14)	7.00	1.00	7.00	6	0.17	11.75	1.96
K (12 - 13)	7.00	1.50	10.50	3	0.25	5.88	1.96
L (10 - 11)	3.50	1.00	3.50	2	0.08	3.92	1.96
L (13 - 14)	3.50	1.00	3.50	2	0.08	3.92	1.96
M (10 - 11)	7.00	1.50	10.50	2	0.25	3.92	1.96
N (10 - 14)	7.00	1.00	7.00	5	0.17	9.80	1.96

Análisis de las cargas horizontales en el sentido Y, (muros paralelos a los ejes numericos).

ubicación de muros	longitud cubierta	ancho cubierta	área aferente	# paneles	% de carga (área)	cortante por muro	cortante por panel
	m	m	m ²			kN	kN
Cubierta			42.00	14	1.00	39.18	
10 (J - N)	6.00	1.00	6.00	4	0.14	11.19	2.80
11 (J - K)	6.00	2.50	15.00	2	0.36	5.60	2.80
13 (J - K)	3.00	2.50	7.50	2	0.18	5.60	2.80
13 (M - N)	3.00	2.50	7.50	2	0.18	5.60	2.80
14 (J - N)	6.00	1.00	6.00	4	0.14	11.19	2.80

Con las expresiones 8. 2a y 8. 2b, se determinó el centro de masa y de rigidez del sistema de resistencia de sísmica. Los resultados se muestran en las Tabla 8.

$$X_R = \frac{\sum_{i=1}^n V_{yi} X_i}{\sum_{i=1}^n V_{yi}} \quad (8. 2a)$$

$$Y_R = \frac{\sum_{i=1}^n V_{xi} Y_i}{\sum_{i=1}^n V_{xi}} \quad (8. 2b)$$

X_i y Y_i son las coordenadas al centro de masa de cada uno de los elementos estructurales de ferrocemento.

Tabla 8. Centros de masa y rigidez del sistema de resistencia sísmica.

Ubicación de muros	Vm	Xi	VmX	Yi	Vm Yi
	kN	m	kN m	m	kN m
J (10 - 14)	11.75	3.50	41.14	7.00	82.28
K (12 - 13)	5.88	3.95	23.21	4.00	23.51
L (10 - 11)	3.92	1.00	3.92	3.00	11.75
L (13 - 14)	3.92	6.00	23.51	3.00	11.75
M (10 - 11)	3.92	1.00	3.92	2.00	7.84
N (10 - 14)	9.80	3.50	34.28	0.00	0.00
10 (J - N)	11.19	0.00	0.00	3.00	33.58
11 (J - K)	5.60	2.00	11.19	5.00	27.99
13 (J - K)	5.60	5.00	27.99	5.00	27.99
13 (M - N)	5.60	5.00	27.99	1.00	5.60
14 (J - N)	11.19	7.00	78.36	3.00	33.58
Total	78.36		275.51		265.86
Centros de:		X		Y	
Masa		3.50		3.00 m	
Rigidez		3.52		3.39 m	

Diseño de los elementos que conforman el sistema de resistencia sísmica.

Conocidas las cargas verticales y horizontales que actúan sobre cada uno de los elementos, se procede al diseño estructural del sistema.

Revisión de la excentricidad crítica.

La fuerza horizontal en cada panel ocasiona un momento de vuelco que puede amenazar la estabilidad del elemento. Si la relación entre el momento aplicado Mu , que es el producto de la fuerza horizontal aplicada por la altura del elemento estructural en estudio y Pu , que es la carga última vertical, es menor que la mitad de la longitud del panel, su cimentación está sometido completamente a compresión. De lo contrario, es necesario anclar el panel con una conexión resistente a tracción.

$$e_{cr} = \frac{Mu}{Pu} \leq \frac{b}{2} \quad (8.3)$$

Si es necesario anclar el elemento estructural a la estructura de cimentación del sistema de resistencia sísmica, debe revisarse de nuevo la excentricidad anclada.

$$e_a = \frac{Mu}{Pu + \phi Pn} \leq \frac{b}{2} \quad (8.4)$$

La fuerza admisible en la conexión se define como: $\phi Pn = \phi A_{st} F_y$

En la Tabla 9 se presenta un ejemplo.

Reacción en los apoyos del elemento estructural.

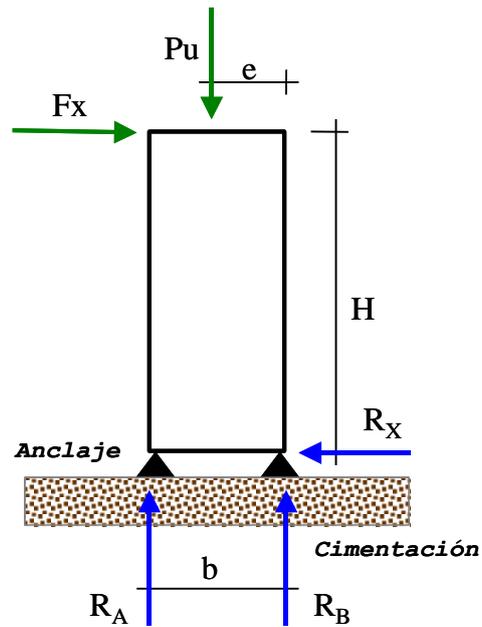


Figura 15. Reacciones del elemento estructural.

Aplicando las condiciones de equilibrio externo planteado en la Figura 15, se obtienen las reacciones, con las cuales se diseñan las conexiones de cada elemento con la cimentación. En la Tabla 9 se presenta una síntesis de todos los cálculos necesarios para calcular las reacciones, de un elemento estructural perteneciente al muro 14(J – N) en el sentido Y, que debe anclarse a la cimentación.

Tabla 10. Cargas y reacciones en los elementos del sistema de resistencia sísmica.

Propiedades geométricas del elemento estructural			
base del elemento.	b	1.00	m
espesor del elemento.	t	0.02	m
altura del elemento	H	2.00	m
Propiedades elásticas del elemento estructural			
peso específico del material	γ	24.00	kN/m ³
resistencia a compresión del matero	f'_m	35.00	MPa
modulo de elástico del mortero	E_m	8933.28	MPa
resistencia de la malla de refuerzo.	f_{ym}	420.00	MPa
resistencia de las barras de anclaje en acero.	f_y	420.00	MPa
Estado de cargas verticales sobre el elemento estructural			
tipo de cubierta o en teja de:		barro	
carga muerta de cubierta	D	1.50	kN/m ²
carga viva de cubierta	L	0.35	kN/m ²
carga mayorada de cubierta	C_u	2.70	kN/m ²
área aferente para el elemento	A_f	1.50	m ²
peso de la cubierta sobre elemento	P_{cu}	4.04	kN
peso propio del elemento estructural	P_{pu}	1.34	kN
peso total vertical sobre el elemento	P_u	5.39	kN
Estado de cargas horizontales sobre el elemento estructural			
ubicación del panel a analizar	ejes	14 (J - N)	
coeficiente de reducción fuerza sísmica	ϕ	1.50	
fuerza cortante de sismo en 14 (J - N)	F_s	11.19	kN
número de paneles	n	4.00	
fuerza cortante de sismo del elemento	F_x	2.80	kN
Combinación de estados de carga sobre el elemento estructural			
carga ultima a compresión	P_u	5.39	kN
momento último	M_u	5.60	kN m
Revisión de la excentricidad crítica			
excentricidad	e	1.04	m
excentricidad crítica $\leq b/2$	e_{cr}	0.50	m
excentricidad del panel anclado	e_a	0.32	m
Reacciones en el elemento estructural.			
reacción vertical izquierda	Tracción	R_A	-2.90 kN
reacción vertical derecha	Compresión	R_B	8.29 kN
cortante		R_x	2.80 kN
momento de inercia de la sección		I	0.0017 m ⁴
esfuerzo generado a compresión		σ_c	19.48 MPa

Diseño de la conexión del panel a la cimentación de la estructura.

El sistema de fijación planteado inicialmente, consiste en dos barras colocadas en los extremos del elemento prefabricado de ferrocemento, antes de su vaciado. En el sitio, los ganchos se fundirán monolíticamente con el concreto de la losa de cimentación, el anclaje se muestra en la Figura 16.

$$A_{st} = \frac{R_A}{\phi f_y} \quad (8.5a)$$

$$A_{sv} = \frac{R_x}{\phi f_y} \quad (8.5b)$$

ϕ es 0.90 para tracción y 0.6 para corte.

Los resultados del diseño se muestran en la Tabla 10.

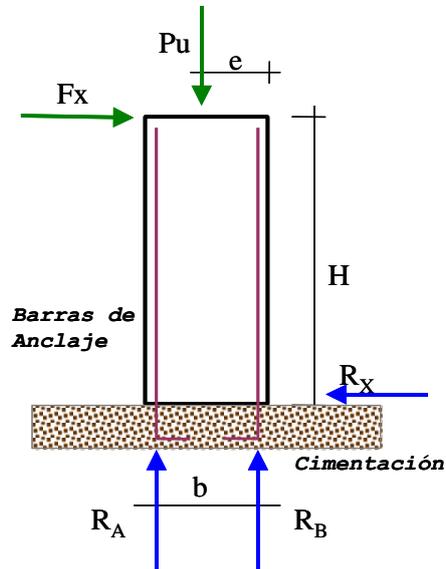


Figura 16. Reacciones y anclaje del elemento a la cimentación.

Revisión del estado de tensiones en la base del elemento.

De acuerdo con los resultados de la Tabla 10, existe un extremo trabajando a tracción y otro a compresión en la base del elemento estructural. La tracción será resistida por el anclaje mecánico y la compresión por el mortero del ferrocemento. La Figura 17, ilustra los estados de tensiones y las expresiones 8.6, 8.7 y 8.8, permiten revisar el estado de tensiones generados en la base del elemento estructural.

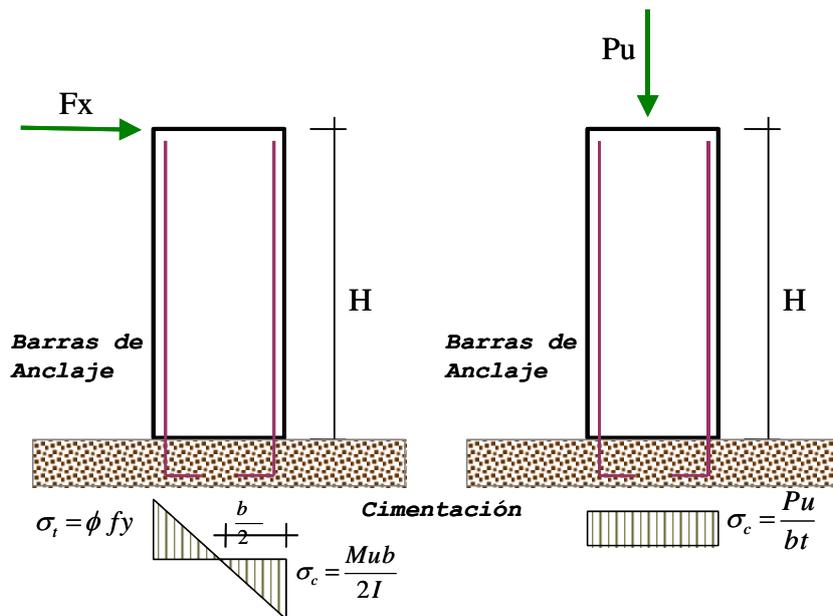


Figura 17. Estado de tensiones en la base del elemento estructural.

$$R_t \leq \phi P_n = \phi f_y A_c \quad (8.6)$$

$$\sigma_c = \frac{Mu b}{2I} + \frac{Pu}{bt} \leq 0.85 f'_m \quad (8.7)$$

$$R_x \leq \phi_c R_n = \phi_c f_y A_c \quad (8.8)$$

Revisión de la capacidad del elemento estructural en cualquier punto.

El panel lleva dos barras No. 2 (o dos barras 6M) en sus extremos y cuatro capas de malla hexagonal, como se especifica en las propiedades elásticas y geométricas de la estructura consignadas en la Tablas 10, distribuidas como se muestra en la Figura 18. El elemento estructural se revisa en una sección cualquiera a lo largo de su eje vertical, para verificar que tenga las propiedades de resistencia y rigidez adecuadas, y que pueda transmitir las cargas debidas al peso de la cubierta, peso propio y sismo, a la cimentación, a través del sistema de conexión diseñado.

Este análisis se realiza con la ayuda del software referenciado en el capítulo 4. En la Tabla 10, se presentan los resultados.

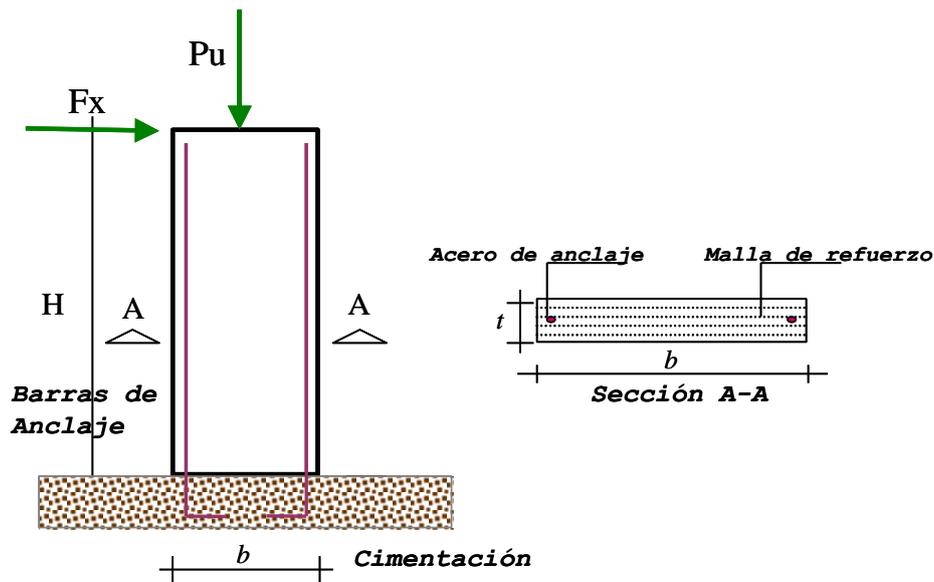


Figura 18. Refuerzo longitudinal del elemento estructural.

Tabla 10. Diseño de la conexión y revisión de tensiones .

Diseño de la conexión del panel a la cimentación			
recubrimiento de las barras.	d'	0.05	m
coeficiente de reducción a tracción	ϕ	0.90	
coeficiente de reducción a corte.	ϕ_c	0.60	
área a tracción requerida	A_{st}	0.08	cm ²
área de acero a corte requerida	A_{sv}	0.11	cm ²
área de acero colocado.	A_c	0.32	cm ²
número de barras	nb	2	
diámetro de la barra longitudinal.	D	0.64	cm ²
número de designación.	No	2 (1/4)	
Revisión de la capacidad del elemento estructural			
coeficiente de reducción a compresión.	ϕ_{co}	0.85	
esfuerzo ultimo a compresión del mortero	$\phi f'_m$	29.75	Mpa
momento resistente de la sección	ϕMn	11.70	kN m
tracción admisible en la conexión.	ϕP_n	12.10	kN
cortante admisible del anclaje.	ϕR_n	8.06	kN

8.1.4 Análisis de cargas horizontales considerando diafragma flexible.

Si no puede asumirse que el diafragma a nivel del enrase de la cubierta es rígido, entonces es necesario considerarlo flexible. En tal caso, las solicitaciones horizontales, serán distribuidas a la estructura de acuerdo con las áreas tributarias de techo a cada uno de los muros estructurales y en los dos sentidos principales ortogonales de la estructura. (Ver Figuras 11 y 12).

En este caso el diafragma es deformable en su plano. Bajo este supuesto se considera que los muros toman carga de acuerdo con las áreas aferentes de cubierta, por ello la fuerza cortante para cada muro es diferente. En la Tabla 11 se presenta el análisis de la distribución de la cortante sísmica de la base al sistema de resistencia sísmica conformado por los muros prefabricados.

Tabla 11. Distribución de la carga sísmica al sistema de resistencia sísmica.

Análisis de las cargas horizontales en el sentido X, (muros paralelos a los ejes literales).

Ubicación de muros	longitud cubierta	ancho cubierta	área aferente	# paneles	% de carga (área)	cortante por muro	cortante por panel
	m	m	m ²			kN	kN
Cubierta			42.00		1.00	39.2	
J (10 - 14)	7.00	1.00	7.00	6	0.17	6.5	1.1
K (12 - 13)	7.00	1.50	10.50	3	0.25	9.8	3.3
L (10 - 11)	3.50	1.00	3.50	2	0.08	3.3	1.6
L (13 - 14)	3.50	1.00	3.50	2	0.08	3.3	1.6
M (10 - 11)	7.00	1.50	10.50	2	0.25	9.8	4.9
N (10 - 14)	7.00	1.00	7.00	5	0.17	6.5	1.3

Análisis de las cargas horizontales en el sentido Y, (muros paralelos a los ejes numericos).

Ubicación de muros	longitud cubierta	ancho cubierta	área aferente	# paneles	% de carga (área)	cortante por muro	cortante por panel
	m	m	m ²			kN	kN
Cubierta			42.00		1.00	39.2	
10 (J - N)	6.00	1.00	6.00	4	0.14	5.6	1.4
11 (J - K)	6.00	2.50	15.00	2	0.36	14.0	7.0
13 (J - K)	3.00	2.50	7.50	2	0.18	7.0	3.5
13 (M - N)	3.00	2.50	7.50	2	0.18	7.0	3.5
14 (J - N)	6.00	1.00	6.00	4	0.14	5.6	1.4

Siguiendo un procedimiento similar al caso de cubierta rígida, en la Tabla 12 se presentan las reacciones generadas sobre la estructura en la dirección de los ejes numéricos, (eje Y), dado que el sistema de resistencia sísmica, presenta menor rigidez en ese sentido. Se elige el muro 13(M-N), el cual recibe una fuerza cortante de sismo de 7.00 kN y una carga vertical de 11.25 kN.

Tabla 12. Cargas y reacciones en los elementos del sistema de resistencia sísmica.

Propiedades geométricas del elemento estructural			
base del elemento.	b	1.00	m
espesor del elemento.	t	0.02	m
altura entrepiso libre.	H	2.00	m
Propiedades elásticas del elemento estructural			
peso específico del material	γ	24.00	kN/m ³
resistencia a compresión del material	f'_m	35.00	MPa
modulo de elasticidad del mortero	E	8933.28	MPa
resistencia de la malla de refuerzo.	f_{ym}	420.00	MPa
resistencia de las barras de anclaje en acero.	f_y	420.00	MPa
Estado de cargas verticales sobre el elemento estructural			
tipo de cubierta o en teja de:		barro	
carga muerta de cubierta	D	1.50	kN/m ²
carga viva de cubierta	L	0.35	kN/m ²
carga mayorada de cubierta	Cu	2.70	kN/m ²
área aferente para el elemento	Af	3.75	m ²
peso de la cubierta sobre elemento	P_{cu}	10.11	kN
peso propio del elemento estructural	P_{pu}	1.34	kN
peso total vertical sobre el elemento	P_u	11.45	kN
Estado de cargas horizontales sobre el elemento estructural			
ubicación del panel a analizar	ejes	13 (M - N)	
coeficiente de reducción fuerza sísmica	ϕ	1.50	
fuerza cortante de sismo en 13 (M - N)	F_s	7.00	kN
número de paneles	n	2	
fuerza cortante de sismo del elemento	F_x	3.50	kN
Combinación de estados de carga sobre el elemento estructural			
carga ultima a compresión	P_u	11.45	kN
momento ultimo	M_u	7.00	kN m
Revisión de la excentricidad crítica:			
excentricidad	e	0.61	m
excentricidad critica $\leq b/2$	e_{cr}	0.50	m
excentricidad panel anclado	e_a	0.30	m
Reacciones en el elemento estructural.			
reacción vertical izquierda	Tracción	R_A	-1.27 kN
reacción vertical derecha	Compresión	R_B	12.72 kN
cortante		R_x	3.50 kN
momento de inercia de la sección		I	0.002 m ⁴
esfuerzo generado a compresión		σ_c	26.71 MPa

En la Tabla 13, se consigna el diseño de la conexión, y la comparación de las cargas aplicadas con las resistidas por la sección del elemento estructural de ferrocemento.

Tabla13. Diseño de la conexión y revisión de tensiones.

Diseño de la conexión del panel a la cimentación			
recubrimiento de las barras.	d'	0.05	m
coeficiente de reducción a tracción	ϕ	0.90	
coeficiente de reducción a corte.	ϕ_c	0.60	
área a tracción requerida	A_{st}	0.03	cm ²
área de acero a corte requerida	A_{sv}	0.14	cm ²
área de acero colocado.	A_c	0.32	cm ²
número de barras	nb	2	
diámetro de la barra longitudinal.	D	0.64	cm ²
número de designación.	No	2 (1/4)	
Revisión de la capacidad del elemento estructural			
coeficiente de reducción a compresión.	ϕ_{co}	0.85	
esfuerzo ultimo a compresión del mortero	$\phi f'_m$	29.75	MPa
Momento resistente de la sección	ϕMn	11.70	kN m
Tracción admisible en la conexión.	ϕP_n	12.10	kN
Cortante admisible del anclaje.	ϕR_n	8.06	kN

Como puede verse en las tablas 11 y 14, el diseño de la conexión es el mismo, considerando diafragma rígido o flexible para la cubierta.

8.1.5 Diagramas de interacción para una sección de ferrocemento.

Cuando el sistema de resistencia sísmica es solicitado por un movimiento telúrico cada uno de los elementos estructurales están bajo unas condiciones de cargas críticas. A continuación se realiza un análisis estructural al panel o elemento estructural, para determinar su capacidad a momento flexionante, M_u , y carga axial, P_u .

El análisis se realiza de una manera general para la sección, donde se considera la contribución del acero de anclaje del elemento a la cimentación y la malla de refuerzo.

Procedimiento e hipótesis de diseño: En el análisis se estudio la flexión uniaxial.

- El método de diseño es el método de estado límite de resistencia o método de rotura.
- El análisis para determinar las fuerzas internas de la sección se realiza similarmente al de secciones de hormigón reforzado, sometidas a flexión uniaxial, de acuerdo a las normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistentes y de los procedimientos de diseño para elementos de ferrocemento. [Pama 92, Trejo 97, AIS 98, Naaman 2000].
- Se desprecia la resistencia a tracción del mortero para ferrocemento.
- La deformación de la compresión del mortero es considerada hasta 0.004.
- La deformación en el acero de armazón es igual a la del mortero que lo rodea.
- Las secciones planas permanecen planas.
- En la zona elástica es aplicable la ley de Hooke
- El modulo de elasticidad de evaluará de acuerdo a la resistencia del mortero:

$$E_c = 15100 \sqrt{f'_m} \quad (8.9)$$

- La tensión uniforme del mortero a compresión se toma:
 $\sigma_u = 0.85 f'_m$, distribuida sobre una área igual a: $A_m = t a$; $a = \beta_1 c$.
- β_1 se tomará siguiendo los criterios de la NSR-98 [AIS 98].
- No se tiene en cuenta la contribución de la malla a compresión, ni los volúmenes de mortero desalojados por la malla y el acero del armazón.
- La fuerza a tracción de la malla se toma como la resultante del bloque triangular de tensiones de todas las fuerzas en cada alambre, ubicada a una distancia

$$dm = \frac{d - c}{3} \quad (8.10)$$

del acero inferior de armazón.

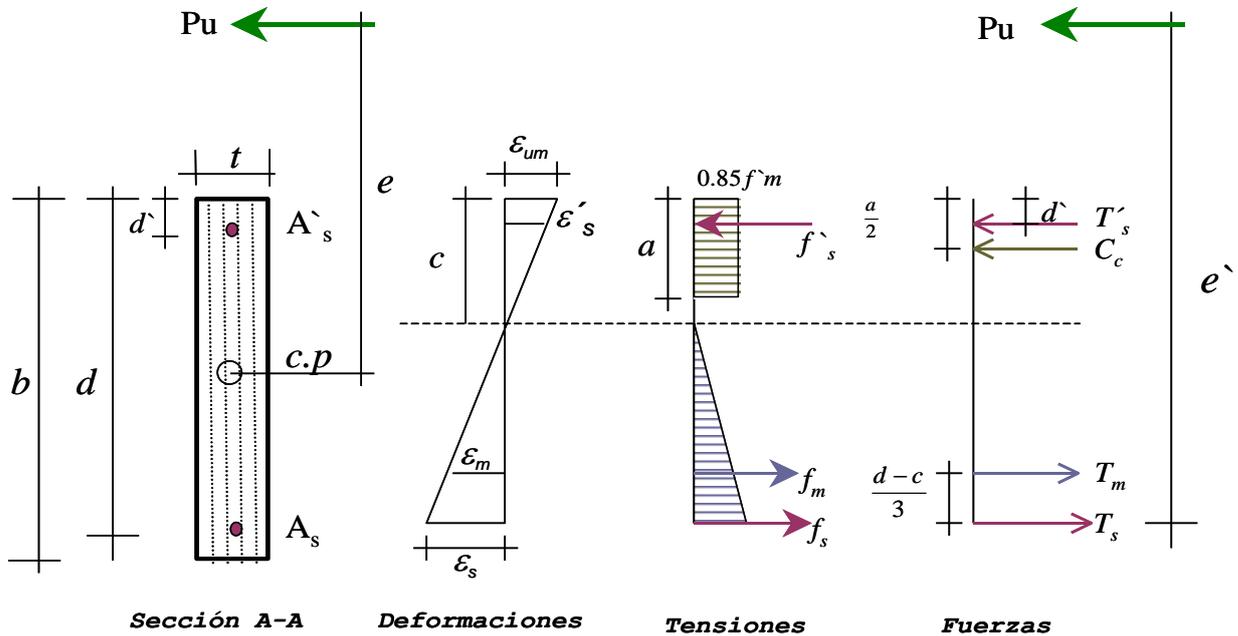


Figura 19. Diagramas de equilibrio interno y externo para una sección de ferrocemento.

De acuerdo a la Figura 19, se obtienen las expresiones que representan la capacidad del elemento estructural de ferrocemento, para soportar las cargas externas.

Realizando equilibrio externo e interno:

$$Pu \leq \phi Pn = \phi [Cc + Cs - Ts - Tm] \quad (8.11)$$

$$Pu \leq \phi Pn = \phi [0.85 f'_c \beta_1 c t + As' fs' - As fs - Am f_m] \quad (8.12)$$

$$Mu \leq \phi Mn = P u e' = \phi \left[0.85 f'_c \beta_1 c t \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + As' fs' (d - d') - Am f_m \left(\frac{d - c}{3} \right) \right] \quad (8.13)$$

Análisis de la falla balanceada de la sección: Es cuando en un elemento estructural falla simultáneamente el acero por fluencia y el mortero por aplastamiento.

Del diagrama de deformaciones de la Figura 19, $\epsilon_s = \epsilon'_s = \epsilon_y$,

$$\varepsilon_u = 0.004; \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$$

$$Cb = \left(\frac{0.004}{0.004 + \varepsilon_y} \right) d \quad (8.14)$$

$$Pu \leq \phi Pn = \phi [0.85 f'c \beta_1 c_b t + A_s f_s - A_s f_s - A_m f_{ym}] \quad (8.15)$$

$$Mu \leq \phi Mn = \phi \left[0.85 f'c \beta_1 c_b t \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) + A_s f_s (d - d') - A_m f_{ym} \left(\frac{d - c_b}{3} \right) \right] \quad (8.16)$$

Análisis de la falla a tracción de la sección: Sí $c < c_b$ en la sección se presenta:

- El acero de la zona a tracción presenta una deformación unitaria: $\varepsilon_s > \varepsilon_y$; Luego $f_y = f_s$.
- Y el acero de la zona a compresión tiene una deformación unitaria: $\varepsilon_s < \varepsilon_y$; Luego $f_s < f_y$.

Por compatibilidad de deformaciones se obtiene:

$$\varepsilon_s = \frac{0.004(c - d')}{c} \Rightarrow f_s = \varepsilon_s E_s \quad (8.17)$$

Análisis de la falla a tracción de la sección: Sí $c > c_b$ en la sección se presenta:

- El acero de la zona a tracción presenta una deformación unitaria: $\varepsilon_s < \varepsilon_y$; Luego $f_y < f_s$.
- Y el acero de la zona a compresión tiene una deformación unitaria: $\varepsilon_s > \varepsilon_y$; Luego $f_s = f_y$.

Por compatibilidad de deformaciones se obtiene:

$$\varepsilon_s = \frac{0.004(d - c)}{c} \Rightarrow f_s = \varepsilon_s E_s \quad (8.18)$$

Con las propiedades geométricas y elásticas del elemento estructural de la Tabla 14, las expresiones 8.11 y 8.12 y determinando el respectivo tipo de falla en la sección, que pueden generar las cargas externas, se procede a realizar la construcción del diagrama de interacción.

La Tabla 15, contiene el algoritmo para los cálculos del diagrama de interacción, para cualquier sección de ferrocemento. En los procesos de prediseño se pueden variar u omitir los diferentes tipos de refuerzo, al igual que variar las propiedades elásticas y geométricas de la sección de ferrocemento.

El diseño y la revisión, de las Tablas 15 y 16 corresponde a un elemento estructural prefabricado de ferrocemento, que conforma un muro en la dirección de los ejes numéricos, (eje Y), dado que el sistema de resistencia sísmica configurado, presenta menor rigidez en ese sentido. Se elige el muro 14 (J - N), el cual recibe una fuerza cortante de sismo de 11.19 kN y una carga vertical de 5.39. 7 kN. En el análisis y

diseño no se consideró el aporte de los paneles tipo B, ni la fuerza de fricción generadas en el machihembrado de las juntas. (Ver Tablas 14 y 15).

Tabla15. Propiedades del elemento estructural.

Deformaciones ultimas en los materiales			
deformación ultima del mortero	ε_{um}	0.004	
deformación ultima del malla	ε_{um}	0.003	
coeficiente	β_1	0.8	
Areas de refuerzo			
numero de barras	nb	2	
área total del refuerzo superior	As'	0.08	cm ²
área total del refuerzo inferior	As	0.71	cm ²
numero de capas de malla	nc	2	
área total del refuerzo malla	Asm	1.00	cm ²
coeficiente de reducción	ϕ	0.7	
Análisis para la falla balanceada			
factor		8000	
profundidad del eje neutro.	cb	62.30	cm
carga vertical balanceada	P_b	13.90	t
momento balanceado	M_b	17.40	t m
excentricidad	e	80.17	cm
momento balanceado al centro plástico	M_{bp}	11.14	t m
carga ultima a compresión	P_u	0.54	t
momento último	M_u	0.56	t m

Tabla16. Construcción del diagrama dimensional de interacción.

Análisis para la falla a:

$$f's = fy = 4200, fs=6000(d-c)/c$$

$$fs = fy = 4200, f's=6000(c-d')/c$$

Compresión

Tracción

carga axial máxima	valores de c (cm)	fs (Kgf/m ²)	fsm (Kgf/m ²)	Pumax 39.58 t		e (cm)	Pumax (t)
				Mumax al cp (t - m)	Mumax (t - m)		
Compresión	100.08	-406.08	-270.72	0.71	18.54	1.81	39.60
	95.08	-6.73	-4.49	3.89	18.25	12.19	31.91
	90.08	436.94	291.30	4.49	17.91	15.05	29.82
	85.08	932.77	621.85	5.05	17.50	18.24	27.68
	80.08	1490.51	993.67	5.58	17.04	21.89	25.47
Balanceada	75.08	2122.54	1415.02	6.08	16.52	26.22	23.20
	62.30	4200.00	2800.00	7.34	14.96	43.36	16.94
Tracción	47.30	4200.00	4200.00	7.73	12.66	70.54	10.96
	37.30	4200.00	4200.00	7.29	10.72	95.59	7.63
Pumin	27.30	4200.00	4200.00	6.58	8.51	153.31	4.29
	18.70	4200.00	4200.00	5.76	6.40	403.07	1.43
Cargas externas							
				0.56			0.54

En la Figura 20, se presenta un diagrama construido con este algoritmo.

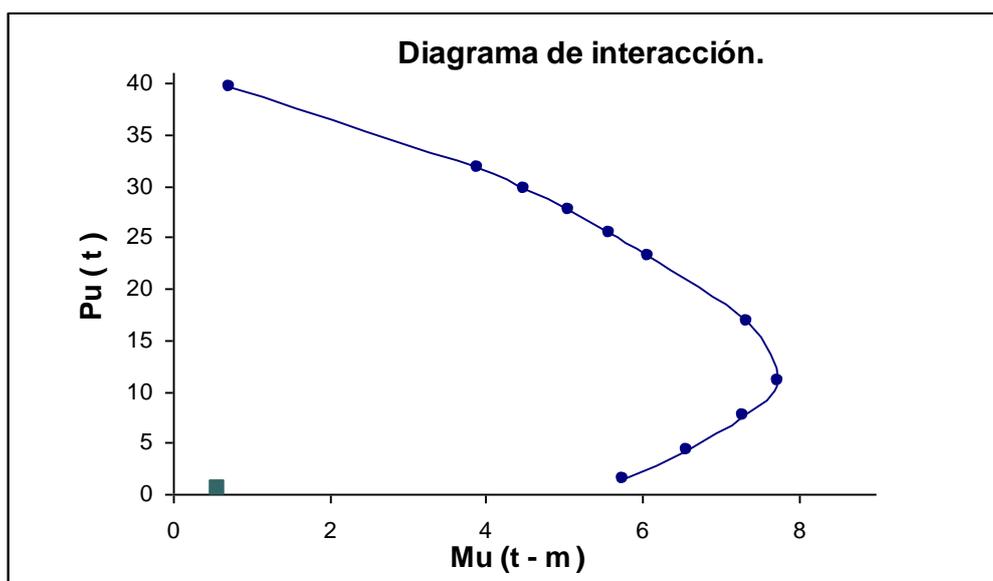


Figura 20. Diagrama de interacción para una sección de ferrocemento.

8.2 Análisis matricial.

Se realizó un análisis matricial utilizando un programa de computador (ETABS PLUS®) donde la estructura se modela con paneles independientes. En la Tabla 16 se presenta un resumen de los desplazamientos y las derivas máximas arrojadas por el análisis matricial.

Tabla 16. Desplazamientos y derivas máximas

Método de la fuerza horizontal equivalente.

Nivel	Dirección	Despl. Superior (mm)	Despl. Inferior (mm)	Deriva máxima (mm)	Deriva máx. admisible. (mm)
CUBIERTA	X (eje N-10)	0.140	0.000	0.140	2000

Nota: En los demás ejes y para los dos sentidos las derivas son menores.

Nivel	Dirección	Despl. Superior (mm)	Despl. Inferior (mm)	Deriva máxima (mm)	Deriva máx. admisible. (mm)
CUBIERTA	Y (eje N-10)	0.170	0.000	0.170	2000

Nota: En los demás ejes y para los dos sentidos las derivas son menores.

En la Tabla 18 se muestra la comparación de resultados entre el cálculo manual y el matricial, suponiendo el diafragma rígido. Los resultados son similares.

Sin embargo, como se aprecia en la Tabla 19, cuando se comparan el cálculo manual con el cálculo matricial, para diafragma flexible, los resultados difieren.

Tabla 18. Comparación de resultados, diafragma rígido.

Análisis de las cargas horizontales en el sentido X.

(muros paralelos a los ejes literales).

Tipo de análisis	Análisis manual		Análisis matricial	
Ubicación de muros	cortante por muro kN	cortante por panel kN	cortante por muro kN	cortante por panel kN
Total cubierta	39.2		39.2	
J (10 - 14)	11.8	1.96	11.04	1.84
K (12 - 13)	3.9	1.96	4.00	2.00
L (10 - 11)	3.9	1.96	4.16	2.08
L (13 - 14)	3.9	1.96	4.16	2.08
M (10 - 11)	3.9	1.96	4.30	2.15
N (10 - 14)	9.8	1.96	11.55	2.31

Análisis de las cargas horizontales en el sentido Y.

(muros paralelos a los ejes numericos)

Tipo de análisis	Análisis manual		Análisis matricial	
Ubicación de muros	cortante por muro kN	cortante por panel kN	cortante por muro kN	cortante por panel kN
Total cubierta	39.2		39.2	
10 (J - N)	14.0	2.8	14.1	2.8
11 (J - K)	5.6	2.8	5.4	2.7
13 (J - K)	5.6	2.8	5.0	2.5
13 (M - N)	5.6	2.8	5.0	2.5
14 (J - N)	11.2	2.8	9.6	2.4

Tabla 19. Comparación de resultados, diafragma flexible.

Análisis de las cargas horizontales en el sentido X.

(muros paralelos a los ejes literales).

Tipo de análisis	Análisis manual		Análisis matricial	
Ubicación de muros	cortante por muro kN	cortante por panel kN	cortante por muro kN	cortante por panel kN
Total cubierta	39.18		38.8	
J (10 - 14)	6.53	1.09	10.92	1.82
K (12 - 13)	9.80	4.90	3.94	1.97
L (10 - 11)	3.27	1.63	4.10	2.05
L (13 - 14)	3.27	1.63	4.10	2.05
M (10 - 11)	9.80	4.90	4.26	2.13
N (10 - 14)	6.53	1.31	11.45	2.29

Análisis de las cargas horizontales en el sentido Y.

(muros paralelos a los ejes numericos)

Tipo de análisis	Análisis manual		Análisis matricial	
Ubicación de muros	cortante por muro kN	cortante por panel kN	cortante por muro kN	cortante por panel kN
Total cubierta	39.18		39.18	
10 (J - N)	5.60	1.12	13.80	2.76
11 (J - K)	13.99	7.00	5.34	2.67
13 (J - K)	7.00	3.50	5.10	2.55
13 (M - N)	7.00	3.50	5.10	2.55
14 (J - N)	5.60	1.40	9.84	2.46

Un esquema del modelo analizado por el método matricial se ve en la Fig. 21.

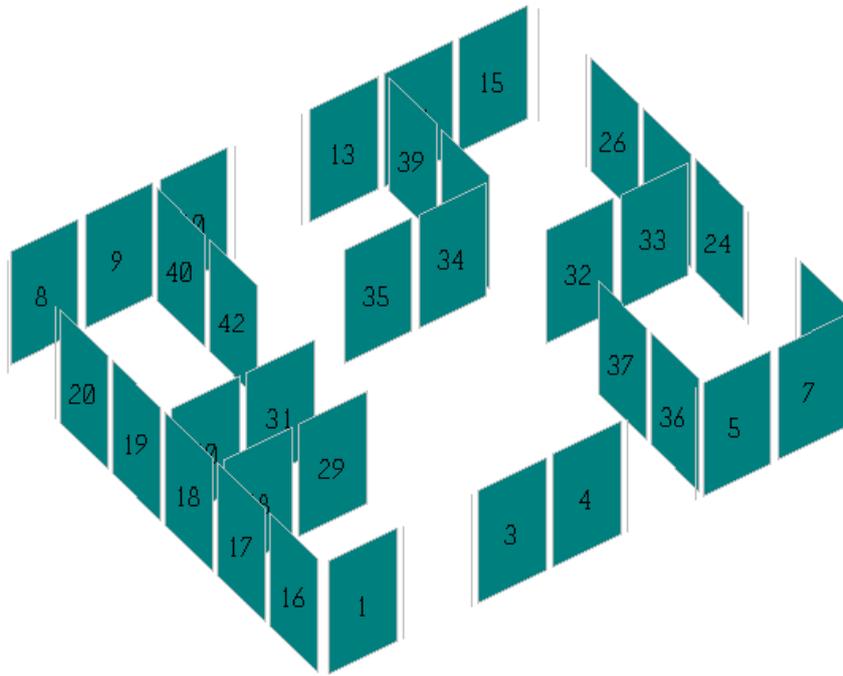


Figura 21. Modelo tridimensional para el análisis matricial del sistema de resistencia sísmica con paneles prefabricados de ferrocemento.

9 COMENTARIOS FINALES.

A partir de los planteamientos, de los análisis y diseños desarrollados en este estudio se encontró:

- Es teóricamente posible obtener sistemas de resistencia sísmica a partir de elementos prefabricados de ferrocemento.
- La configuración arquitectónica y estructural del sistema de resistencia sísmica se basa en muros.
- Si se garantiza un diafragma de cubierta, rígido en su propio plano, la distribución de fuerzas entre los muros es más uniforme que si el diafragma es flexible.
- Las cargas impuestas a una estructura prefabricada, que especifican las norma NSR-98, son cargas que superan ampliamente las cargas debidas a peso propio del ferrocemento. Esto muestra que la estructura de ferrocemento es liviana.
- Debido al poco peso del ferrocemento la capacidad de atraer cargas de sismo, es inferior que el de otras estructuras. Esto implica bajos efectos de sollicitación en la estructura, pero ella debe estar en capacidad de absorber todas las cargas horizontales debido a todas las cargas muertas impuestas por normatividad y eventuales.
- Los paneles propuestos (1 m x 2 m x 0,02 m) tienen rigidez y resistencia suficientes para tomar las sollicitaciones calculadas, de acuerdo con los cálculos y los diagramas de interacción utilizados.
- El sistema estructural basado en paneles independientes resulta en deformaciones teóricas totales muy inferiores al límite de deriva permitido del 1 % de la altura de piso, de acuerdo con la NSR-98.
- La sistematización de los procesos matemáticos que contienen los algoritmos de análisis y diseño, de las estructuras prefabricadas de ferrocemento, permite un rápido predimensionamiento, análisis y diseño de los elementos y de la estructura.
- Cada elemento componente del sistema de resistencia sísmica, debe ser anclado al sistema de cimentación.
- Las conexiones en estructuras prefabricadas de ferrocemento representan el vínculo débil en el diseño. Toda la integridad, continuidad, funcionalidad y vida útil de la estructura dependen estrictamente del sistema de conectividad elegido para cada uno de los elementos.
- Aunque las conexiones sean diseñadas por el fabricante, el diseñador estructural no debe delegar la responsabilidad de verificar su idoneidad estructural.
- En estructuras prefabricadas de ferrocemento se debe contemplar el diseño particular de ventanas y puertas (anclajes, espesores, etc.), debido a los espesores de muros que se trabajan.

9.1 Recomendaciones.

- Estudiar el problema del pandeo y del flujo plástico.

- Idear conexiones de bajo costo y fácil montaje para las estructuras prefabricadas
- Estudiar la incidencia de las cargas horizontales producidas por viento en zonas geográficas donde existan altas velocidades de viento.
- Estudiar la incidencia de la fricción entre paneles o la posibilidad de conexión entre ellos.

BIBLIOGRAFÍA.

1. A. C. I committee 549. “*Guide For The Design, Construction, And Repair Of Ferrocement*”. Structural Journal, Vol. 85, May. 1988, pp. 325 – 351.
2. A. I. S, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. “*Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistentes. NSR-98*”. Bogotá. 1998.
3. Bazan, E. Meli, R. “*Diseño Sísmico De Edificios*”. México, Ed. Limusa. 1999.
4. Bedoya R, D. A. “*Ferrocemento: Optimización De Mezclas Y Mecanismos De Construcción y Vaciado*”. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 137p. 1996.
5. Bedoya R, D. A. . “*Diseño sismo resistente de un sistema estructural modular con elementos prefabricados de Ferrocemento*”. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 110p. 1998.
6. Berg, Glen. “*Elements Of Structural Dynamics*”. University of Michigan, Ed. Prentice Hall. 1989.
7. Bozzo M, L. Barbat, A. H. “*Diseño Sismo Resistente de Edificios*”. Ed. Reverté S. A. Barcelona. 2000.
8. CañigueraL, A. “*Experiencias Con Ferrocemento En El Chocó*”. Materiales no convencionales para construcciones rurales. CINDEC. Medellín. Nov. 1993.
9. Cardona, F. , Farbiarz, J. , Londoño, C. “*Vivienda Flotante Construida Con Ferrocemento*”. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 102 p. 1982.
10. CORVIDE. “*Manual De Sismo Resistencia: Elementos De Diseño, Construcción y Rehabilitación De Vivienda En Uno Y Dos Pisos*”. Medellín. 1999.
11. Chancellor W. J. “*Ferrocement Floating House: Thermal Comfort*”. Journal of Ferrocement, Vol. 26,Nº 4, Oct. 1996, pág. 251 – 257.
12. Chardchart, Sittipunt and Sharon L. Wood. “*Influence of Web Reinforcement on the Cyclic Response of Structural Walls*”. ACI. Structural Journal, Nov. 1995, pp. 745 – 755.
13. Chopra A K, “*Dynamics Of Structures*”. Prentice-Hall, Upper saddle River. 1995.
14. Farbiarz F, J. “*Housing Using Ferrocement Panels, Design Details*”. University of Texas at Austin. 1985.
15. Farbiarz, J. “*Hormigón, El Material*. Universidad Nacional de Colombia, 2001.
16. García, L. E. “*Dinámica Estructural Aplicada Al Diseño Sísmico*”. Universidad de los Andes. Bogotá. 1998.
17. Gómez R, J. D. Molina C, C. M. “*Ferrocemento: Propiedades Mecánicas Y Aplicación En Elementos Tipo Perfil*”. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 1994.
18. Guangjing Xiong and Gurdev Singh. “*Rational Evaluation of Flexural Behavior of Weldmesh Ferrocement in Normal and Corrosive Environments*”. Structural Journal, Vol. 95, Nov. 1998, pp. 647 – 653

19. Guangjing, Xiong, Gurdev. “*Singh. Rational Evaluation Of Flexural Behavior Of Weldmesh Ferrocement In Normal And Corrosive Environments*”. Structural Journal, Nov. 1998, pp. 647 – 653.
20. Hamoud, A. et al. “*Durability Performance Of Repaired Reinforced Concrete Beams*”, Materials Journal, Vol. 91, March 1994.
21. Hiroshi, Hosoya, Isamu Abe, Yoshikazu, Kitagawa and Tsuneo Okada. “*Shaking Table Tests of Three-Dimensional Scale Models of Reinforced Concrete High-Rise Frame Structures with Wall Columns*”. ACI. Structural Journal. . Nov. 1995, pp. 765–780.
22. Hurtado, J. E, Orozco, L, Barbat, A. H, Galindo, M. “*Definición De La Acción Sísmica*”. CIMNE. Barcelona. 1994.
23. Hurtado, J. E. “*Dinámica De Estructuras, Aplicaciones A La Ingeniería Sísmica*”. CIMNE. Barcelona. 2000.
24. Instituto del Concreto, Sánchez. D. “*Colección Básica Del Concreto, Tomo I Tecnología Y Propiedades*”. Ed. Asocreto. Bogotá. 1998.
25. Katsuki Takiguchi and Abdullah. “*Shear Strengthening of Reinforced Concrete Columns Using Ferrocement Jacket*”. Structural Journal, Vol. 98, Sep. 2001.
26. Lee, s. l. , Paramasivam et al Ferrocement: “*Alternative Material For Secondary Roofing Elements*”, Materials Journal, Vol. 87, Jul. 1990.
27. Logan, S. P. “*Moment Capacity And Cracking Behavior Of Ferrocement In Flexure*”, Journal of ACI, dec. 1973, No. 1, Proceedings, Vol. 70 pp 799-804
28. M. Neelamegam, Y. Ohama, K. Demura, S. Suzuki, and A. Shirai. “*Deformation and Durability of Polymer-Impregnated Ferrocement*”. Journal Proceedings, Vol. 81, November 1984
29. Mansur, M. A. and Ong. K. C. G. “*Shear strength of Ferrocement*”. ACI Structural Journal, vol. 88, No. 4, Jul. 1991, pp. 458 - 464
30. Mansur, M. A. and Paramasivam, P. “*Ferrocement Short Columns Under Axial And Eccentric Compression*”, Structural Journal, Vol. 87, Sep. 1990.
31. Mansur, M. A. Abdullah, and Alwis, W. A. M. “*Strength Of Bolted Joints In Ferrocement*”. Structural Journal, Vol. 91, May. 1994.
32. Mansur, M. A. Ahmad I. and P. Paramasivam. “*Punching Shear Behavior Of Restrained Ferrocement Slabs*”. Structural Journal, Vol. 97, Sep. 2000.
33. Mansur, M. A. , Ong, K. C. G. “*Shear Strength Of Ferrocement*”, ACI Structural Journal, vol. 88, No. 4: - 464. Jul. 1991, pp. 458.
34. Mansur, M. A. , Ong, K. C. G. “*Shear Strength Of Ferrocement*”. ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 4: Jul. 1991, pp. 458 – 464.
35. Mansur, M. A. , “*Design and Construction of an Elevated Ferrocement Water Tank,*” Concrete International: Design and Construction, American Concrete Institute, U. S. A. , Vol. 12, No. 4, Apr. 1990, pp. 37-41
36. Mansur, M. A. , Paramasivam, P. and Lee, S. L. , “*Ferrocement Sunscreens on High-Rise Buildings,*” Concrete International: Design and Construction, American Concrete Institute, U. S. A. , Vol. 9, Sept. 1987, pp. 19-23.
37. Mansur, M. A. , Tan, K. L. , Naaman, A. E. and Paramasivam, P. “*Bolt Bearing Strength of Thin-Walled Ferrocement,*” ACI Structural Journal, Vol. 98, No. 4, Jul. 2001, pp. 563-571.

38. Murata, T. , et al. “*Mechanical Characteristics Of Ferrocement And Applications To Offshore Structures*”, Journal of Ferrocement, Vol. 12, N° 2, Abr. 1982, Pág. 145 – 158.
39. Naaman, A. E. “*Ferrocement And Laminated Cementitious Composites*”. Ed. Techno Press 3000. Michigan. 2000.
40. Naaman, A. E and Hammoud,H. , “*Ferrocement prefabricated Housing: The next generation*”, Journal of Ferrocement, Vol. 22, No. 1, Jan. 1992, pp 37
41. Nawy, E. G. “*Concreto Reforzado*”. México. Prentice. 1997.
42. Neven Krstulovic-Opara and Antoine E. Naaman. “*Self-Stressing Fiber Composites*”. Structural Journal, Vol. 97, Mar. 2000.
43. Nilson, A. “*Diseño De Estructuras de Concreto*”. Bogotá. Ed. McGraw Hill. 1999.
44. Pama, R. P y Paul, B. K. “*Ferrocemento*”. México D. F, Ed. Abeja, S. A, 1992.
45. Paramasivam, P and r. sri ravindrarajah. “*Effect Of Arrangements Of Reinforcements On Mechanical Properties Of Ferrocement*”, Structural Journal, Vol. 85, Jan. 1988.
46. Paramasivam, P. and G. K. Nathan. “*Prefabricated Ferrocement Water Tank*”. Journal Proceedings, Vol. 81, Nov. 1984.
47. Paramasivam, P. and Tan, K. H. “*Punching Shear Strength Of Ferrocement Slabs*”. Structural Journal, Vol. 90, May. 1993.
48. Park, R. T. and Pauly. “*Estructuras de Concreto Reforzado*”, Nueva Zelanda. 1989.
49. Quek, S. T. ,paramasivam, s. h. on, and s. l. Lee. “*Early-age reliability of ferrocement slabs*”, Materials Journal, Vol. 88, Nov. 1992.
50. Ray, C. Penzien, J. “*Dynamics Of Structures*” .
51. Reitherman, A. “*Configuración y Diseño Sísmico de Edificios*”. México. Ed. Limusa. 1998.
52. RocheL A. R. “*Hormigón Reforzado*”, tomo I y II. Ed. Digital Express. Medellín. 1999.
53. S. Nagataki, M. A. Mansur, and H. Ohga. “*Carbonation Of Mortar In Relation To Ferrocement Construction*”, Materials Journal, January , 1988
54. Sarria, A. “*Ingeniería Sísmica*”. Bogotá. 1998.
55. Sigit-Arifin I. E. L, Yap Kioe Sheng, Nimityongskul P. “*Ferrocement Floating House For Low - Income Families Of Klong Toey, Bangkok, Thailand* “. Journal od Ferrocement, Vol. 20, N°2, Abr. 1990, pág. 133 - 142
56. Trejo A, L. M. , Martinez N. S. “*Sistematización del análisis y el diseño de elementos estructurales en ferrocemento*”. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 85 p. 1997.

RECURSOS EN INTERNET.

El Internet se ha convertido en una herramienta poderosa, por ello se cita acá algunos sitios que han resultado muy útiles y desde los cuales se puede iniciar una búsqueda que sin duda llevará muchos otros sitios de interés.

<http://habitat.aq.upm.es/dubai/98/bp076.html>

<http://www.ciudadconcreto.com/Ferrocemento.htm>

<http://www.ferrocement.com>

<http://www.ferrocement.net/links-books.htm>

<http://www.sitioferrocemento.com/>