

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

SITUACION ACTUAL DEL FERROCEMENTO DE ACUERDO CON EL
COMITE 549 DE ACI Y ALGUNAS APLICACIONES ESTUDIADAS
EN GUATEMALA

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA

POR

MANUEL FRANCISCO MONZON SEVILLA

AL CONFERIRSELE EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL

Guatemala, abril de 1986

TESIS DE REFERENCIA
NO
SE PUEDE SACAR DE LA BIBLIOTECA
BIBLIOTECA CENTRAL - USAC.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

OB
T (1126)C



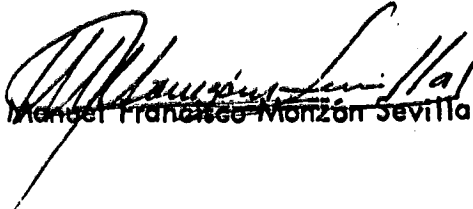
HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la
Universidad de San Carlos de Guatemala,
presento para su consideración mi trabajo de

Tesis titulado:

SITUACION ACTUAL DEL FERROCEMENTO DE ACUERDO CON EL
COMITE 549 DE ACI Y ALGUNAS APLICACIONES ESTUDIADAS EN
GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de
la Escuela de Ingeniería Civil.


Manuel Francisco Monzon Sevilla

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Roberto Mayorga R.
VOCAL 1	Ing. Jacinto Quan
VOCAL 2	Ing. Mario Morales
VOCAL 3	Ing. Pedro Aguilar
VOCAL 4	Br. Abel García
VOCAL 5	Br. Carlos Farfan

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN
GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Roberto Mayorga R.
EXAMINADOR	Ing. René González
EXAMINADOR	Ing. Carlos Fernández
EXAMINADOR	Ing. Eduardo Ramírez Saravia
SECRETARIO	Ing. René Andrino



REF. No. 043.86

Guatemala, febrero 20 de 1986

Ing. Jorge Mario Morales
Jefe Area de Materiales
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería - USAC
Presente

Ing. Morales

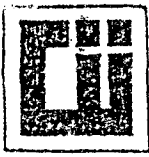
Tengo el agrado de someter a su consideración el trabajo de Tesis "Situación actual del Ferrocemento de Acuerdo con el Comité 549 de ACI y Algunas Aplicaciones Estudiadas en Guatemala", del estudiante de Ingeniería Civil, Manuel Francisco Monzón Sevilla, quien contó con la asesoría del suscrito.

El trabajo en cuestión es de mucha importancia ya que condensa los resultados obtenidos de las investigaciones realizadas sobre Ferrocemento a la fecha y presenta lineamientos de investigación para el futuro. Siendo corresponsable con el autor de los resultados y conclusiones logradas, me permito recomendar la aprobación correspondiente.

Atentamente,


Ing. Francisco Javier Quiñonez
ASESOR

/emr.-



Guatemala febrero 21 de 1986

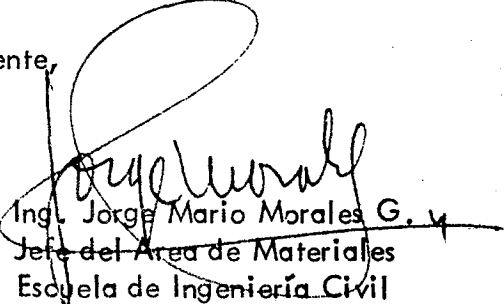
Ing. Rafael Angel Bolaños E.
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Presente

Señor Director:

Tengo el agrado de someter a su consideración el trabajo de tesis titulado "SITUACION ACTUAL DEL FERROCEMENTO DE ACUERDO CON EL COMITE 549 de ACI Y ALGUNAS APLICACIONES ESTUDIADAS EN GUATEMALA", del estudiante universitario Manuel Francisco Monzón Sevilla, quien contó con la asesoría del Ing. Francisco Javier Quiñónez.

El trabajo realizado presenta una actualización de la tecnología del ferrocemento a nivel internacional y nacional, por lo que resulta de mucho interés para la profesión y la docencia. Por lo tanto, me permito recomendar su aprobación correspondiente.

Sin otro particular lo saluda, atentamente,


Ing. Jorge Mario Morales G.
Jefe del Área de Materiales
Escuela de Ingeniería Civil

JMRG/emr.



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-gradúo de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, Zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Francisco Javier Quiñónez y del Jefe del Area de Materiales de Construcción Ing. Jorge Mario Morales G., al trabajo de tesis del estudiante Manuel Francisco Monzón Sevilla, titulado SITUACION ACTUAL DEL FERRO CEMENTO DE ACUERDO CON EL COMITE 549 DE ACI Y ALGUNAS APLICACIONES ESTUDIADAS EN GUATEMALA, da por este medio su aprobación a dicha tesis.


Ing. Rafael Angel Bolaños E.



Guatemala, 5 de marzo de 1,986

RABE/bbdeb.



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

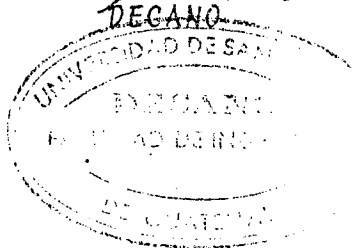
Ciudad Universitaria, Zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, Ing. Rafael Angel Bolaños Escobar, al trabajo de tesis SITUACION ACTUAL DEL FERROCEMENTO DE ACUERDO CON EL COMITE 549 DE ACI Y ALGUNAS APLICACIONES ESTUDIADAS EN GUATEMALA, del estudiante Manuel Francisco Monzón Sevilla, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:

R. Mayorga R.
Ing. Roberto Mayorga Rouge

DECANO



Guatemala, 5 de marzo de 1,986

bbdeb.

A C T O Q U E D E D I C O

A D I O S

A M I P A T R I A

A L A U N I V E R S I D A D
D E S A N C A R L O S

AGRADECIMIENTO

Al Ingeniero Francisco Javier Quiñonez, por su valiosa asesoría,
y a todas aquellas personas que de una u otra forma
ayudaron a la elaboración de esta tesis.

PROLOGO

Este trabajo tiene como principal interés, el proporcionar información sobre el material conocido como ferrocemento. Este material puede ser la alternativa, para ser utilizado en construcciones de viviendas de bajo costo, al igual que se le puede dar diversos usos como por ejemplo, depósitos de agua, silos, techos, etc. Y en esta forma podría solventar, de alguna manera el gran déficit de estos elementos y de vivienda que, actualmente, afecta tanto a Guatemala como a otros países en vías de desarrollo.

El conocer más sobre el ferrocemento y sus características, será de gran impulso para su desarrollo y aplicación en distintos países, que les sea de interés su utilización.

Se trata, en este trabajo, aspectos importantes del ferrocemento, como su composición y construcción, sus propiedades físicas y mecánicas, criterios de funcionamientos y da a conocer ciertas aplicaciones experimentadas en distintos países, todo esto de acuerdo al reporte del Comité 549 ACI.

En Guatemala se han realizado estudios directamente con este material y los resultados obtenidos han sido de gran ayuda en el conocimiento del ferrocemento. Aquí se hace mención de alguno de estos estudios realizados por el CII, Universidad de San Carlos.

Los problemas socio-económicos en Guatemala son grandes y tienden a crecer aún más, esto motiva a trabajar en distintas áreas profesionales para tratar de solventar este problema. El investigar y experimentar con nuevos materiales para distintos usos constructivos, de bajo costo y de fácil adquisición, en este caso el ferrocemento, es un aporte de la Ingeniería al proceso de desarrollo de nuestro país.

INDICE

	PAGINA
Parte I	
Reporte sobre la situación actual del Ferrocemento de acuerdo con el Comité 549 ACI	1
Capítulo I Introducción	2
1.1 Definición del ferrocemento	2
1.2 Tendencias del ferrocemento	3
Capítulo II Historia	5
Capítulo III Composición y Construcción	10
3.1 Introducción	10
3.2 Mortero	10
3.3 Refuerzo	12
3.4 Aditivos	13
3.5 Proporciones de las Mezclas	13
3.6 Recubrimientos	14
3.7 Proceso de Fabricación	15
Capítulo IV Propiedades Físicas y Mecánicas	18
4.1 Introducción	18
4.2 Resistencia Última Bajo Carga Estática	19
4.3 Resistencia a la Primera Grieta Bajo Carga Estática	32
4.4 Elasticidad y comportamiento Carga-Deformación	36
4.5 Resistencia Bajo Carga de Fatiga	40
4.6 Resistencia de Impacto	43
4.7 Desarrollo de Grietas y Filtraciones	44
4.8 Contracción y Flujo	46
4.9 Durabilidad	47
4.10 Resistencia al fuego	50

Capítulo V	Criterios de Funcionamiento	51
5.1	Introducción	51
5.2	Métodos de diseño	51
5.3	Definiciones	52
5.4	Esfuerzo de Tensión Permisible	53
5.5	Esfuerzo de Compresión Permisible	53
5.6	Fracción de Volumen y Superficie Específica del Refuerzo	53
5.7	Requisitos para el recubrimiento	54
5.8	Limitaciones de Anchos de Grietas	55
5.9	Pronóstico de Anchos y Espaciamientos de Grietas	55
5.10	Rangos de Esfuerzos	58
5.11	Durabilidad	58
Capítulo VI	Aplicaciones del Ferrocemento	59
6.1	Introducción	59
6.2	Barcos	59
6.3	Evaluación de Servicios de Barcos de Ferrocemento	61
6.4	Silos	62
6.5	Tanques	63
6.6	Techos	65
6.7	Resumen	66
Capítulo VII	Necesidades de Investigación	68
7.1	Introducción	68
7.2	Ambito de Necesidades de Investigación	68
7.3	Necesidades de Investigación Específica	69
7.4	Resumen	71

Parte II

Estudios sobre ferrocemento realizados en el Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 72

Capítulo I Introducción 72

Capítulo II Láminas de Ferrocemento 73

2.1 Características del modelo investigado 73

2.2 Ensayos Realizados 77

2.3 Resumen 83

Capítulo III Bóvedas de Ferrocemento 84

3.1 Características del modelo investigado 84

3.2 Ensayos Realizados 86

3.4 Resumen 89

Capítulo IV Ensayos con ferrocemento con concreto liviano a base de pómez 90

4.1 Características del Estudio 90

4.2 Ensayos Realizados 92

4.3 Resumen 94

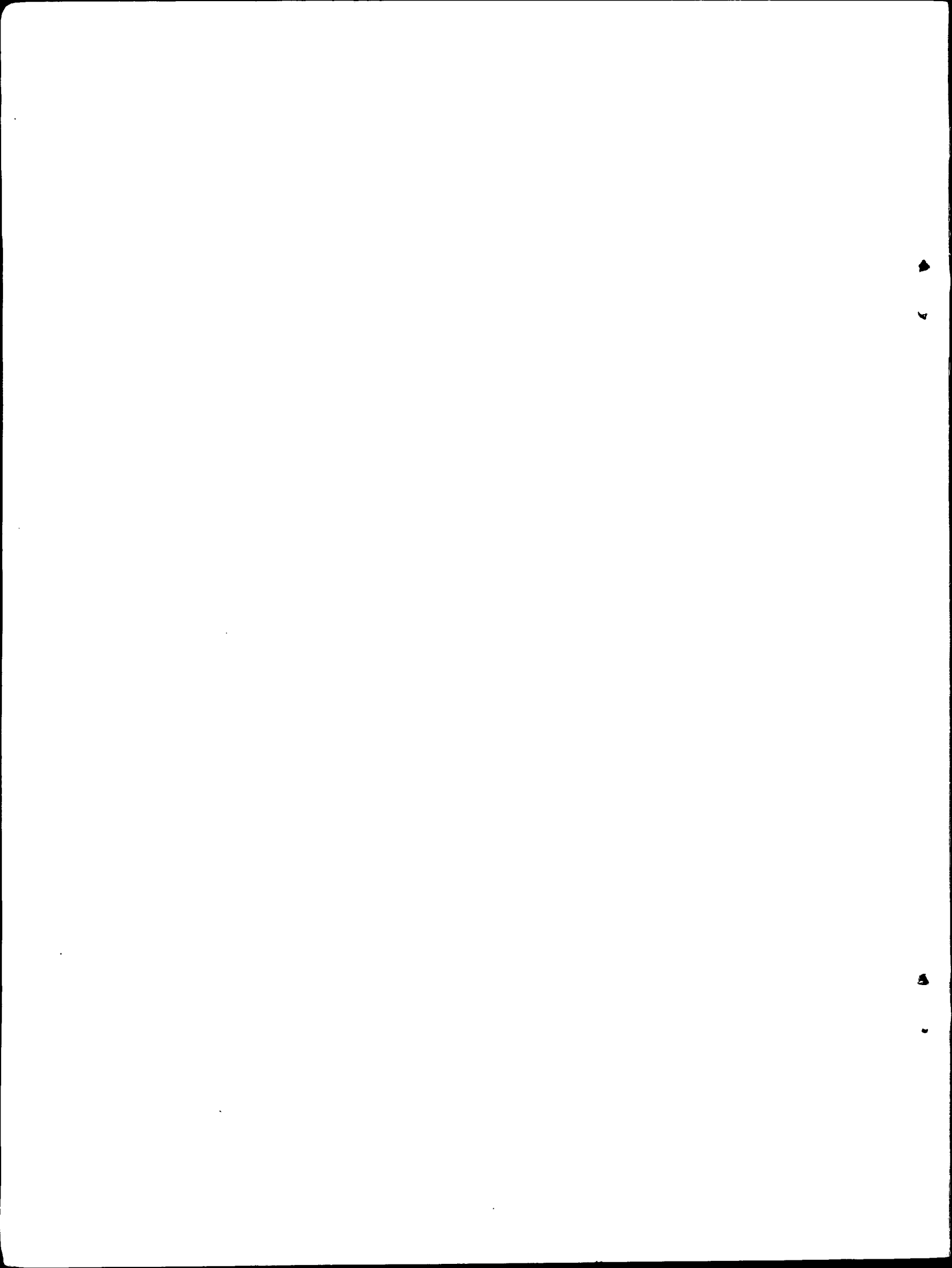
Parte III

Conclusiones y Recomendaciones generales 95

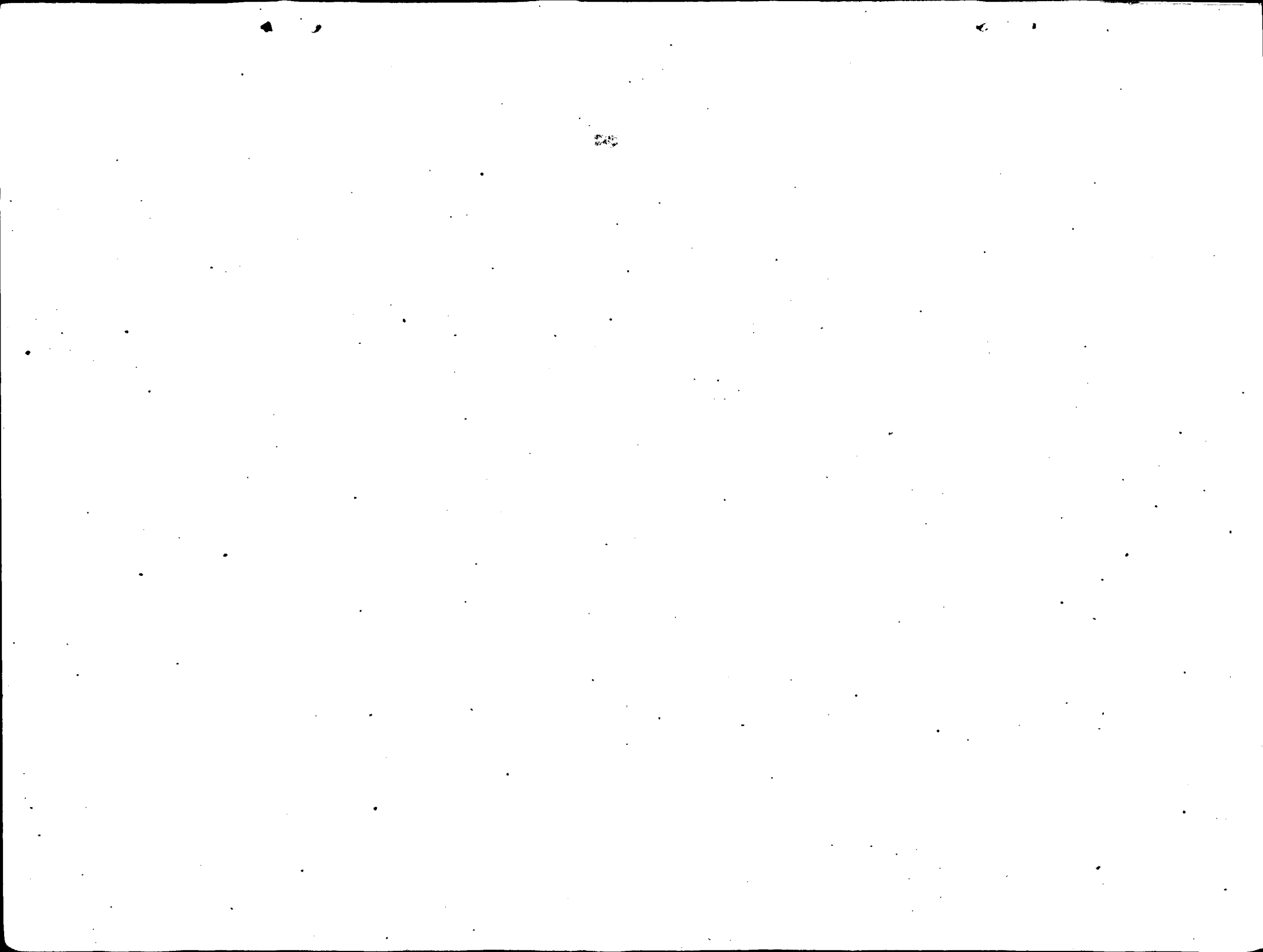
Capítulo I Conclusiones 95

Capítulo II Recomendaciones 98

Referencias (Bibliografía) 100



PARTE I



Reporte del Grado de Avance del Ferrocemento de acuerdo al Comité 549 ACI.

El reporte del grado de avance y la publicación SP-61 Ferrocemento Materiales y Aplicaciones, provee de información técnica sobre las propiedades mecánicas, comportamiento y aplicaciones del Ferrocemento. La intención es promover el uso más eficiente del Ferrocemento como un material de construcción para estructuras terrestres en contraste con estructuras marinas, donde ha sido más ampliamente usado.

CAPITULO I

INTRODUCCION.

1.1 DEFINICION DEL FERROCEMENTO.

Ferrocemento es un término usado para describir una forma de concreto reforzado, que difiere del concreto reforzado convencional y el pretensado, básicamente por la manera en la cual el refuerzo está disperso y colocado. La colocación del refuerzo es tal, que se forma un material compuesto el cual exhibe un comportamiento suficientemente diferente del concreto reforzado convencional, en resistencia, deformación y aplicaciones potenciales de tal forma que es clasificado como un material diferente. Difiere del concreto reforzado convencional en que su refuerzo consiste de espaciamentos muy pequeños y de múltiples capas de mallas impregnadas por completo con un mortero de cemento. Con este material pueden hacerse paneles delgados o secciones de menos de 1 pulgada (25 mm.) de espesor, con una delgada capa de mortero que proporciona un recubrimiento a las mallas de refuerzo. El concreto convencional, generalmente, es moldeado en secciones de varias pulgadas de espesor; usualmente, con el uso de formaletas, y, con el refuerzo doblado en la posición rígida requerida; el refuerzo del ferrocemento puede ser colocado en la forma deseada y repellido (cubierto) en el mismo lugar, directamente.

El término Ferrocemento implica estrictamente, la combinación de un producto ferroso con cemento. Generalmente esta combinación toma la forma de múltiples capas de mallas de acero cubiertas de un mortero de cemento portland ordinario.

Pero aún hay características del ferrocemento que pueden alcanzarse con refuerzos diferentes a las mallas de acero, por ejemplo, el antiguo y universal método de construir chozas o estructuras usando cañas para reforzar lodo, pudiera considerarse un presagio del ferrocemento. El uso de mallas no metálicas está siendo explorado en muchas universidades, esto incluye mallas de vidrio resistente, mallas tejidas de origen orgánico, como ejemplo de las anteriores mallas podemos mencionar las de polipropileno y las hechas de yute, cáñamo o fibra de bambú. Así, el término ferrocemento implica el uso de acero y otros materiales de refuerzo. La siguiente definición fue adoptada por el Comité 549 de ACI. "Ferrocemento es un tipo de pared delgada de concreto reforzado, comunmente construído de cemento hidráulico reforzado con capas con espaciamentos pequeños de mallas de alambres contínuos y de, relativamente, pequeño diámetro. La malla puede ser hecha de metal o de otros materiales adecuados".

Esta definición es relativamente amplia, ello implica que a la vez de considerar al ferrocemento como una forma de concreto reforzado, es también un material compuesto.

1.2 TENDENCIA DEL FERROCEMENTO.

El amplio uso de la construcción con ferrocemento ha ocurrido durante los últimos 20 años, pero el avance en la aplicación de este nuevo material de construcción está todavía en su infancia en los Estados Unidos. Suficiente experiencia no ha sido acumulada y analizada para el éxito de las estructuras ya construídas. Las principales aplicaciones en la construcción con ferrocemento a la fecha han sido para silos, tanques, techos y la mayoría en barcos.

La construcción en ferrocemento puede ser dividida en cuatro fases:

1. Fabricación de un sistema de soporte.
2. Colocación de las varillas y las mallas de refuerzo al sistema de soporte.
3. Aplicación del mortero.
4. Curado.

Hay que observar que, relativamente, un bajo nivel técnico es requerido para las fases 1 y 3, mientras que en la fase 2, es la labor intensiva, lo cual es una desventaja para los países industrializados, pero, una ventaja para los países donde la mano de obra es abundante. En los países desarrollados la mano de obra es cara, el concreto lanzado a presión o técnicas de laminado similares a los desarrollados para estructuras marinas, pueden reducir el costo de mano de obra. La experiencia ha demostrado que la calidad del mortero y su aplicación a la malla de refuerzo son las fases más críticas. El mortero puede ser aplicado a mano o por lanzamiento a presión. Ya que no se requiere formaleta como en la construcción con concreto reforzado convencional; el ferrocemento es especialmente conveniente para estructuras con superficies curvas, tales como domos y formas libres. En algunos casos su uso como una formaleta permanente para una estructura de concreto reforzado, puede ser justificable económicamente.

Dos estudios recientes de factibilidad realizados en los Estados Unidos, han mostrado que los costos del ferrocemento son menores que los del acero o los de fibra de vidrio, en la construcción de depósitos de almacenamiento de agua caliente. Se cree que el desarrollo de nuevos sistemas de mallas de refuerzo y técnicas de producción más eficientes harán competente al ferrocemento en un campo amplio de aplicación, donde se requieren elementos estructurales delgados.

CAPITULO II

HISTORIA

Es conocido uso de cal, yeso y mortero, de cemento natural, se remonta al año 3000 A.C. Aplicaciones siguientes fueron, generalmente, limitadas a juntas de piedra, block, estuco o recubrimiento. No fue sino hasta el tiempo de los romanos, sin embargo, que el mortero de cemento natural fue ampliamente usado como un material estructural.

En todo el reciente desarrollo, el concreto fue visto como un material que podía ser efectivamente usado sólo en compresión. Aunque el concepto de acero embebido a barras de acero entre concreto fresco en la dirección de la tensión está asociado con la última mitad del siglo XIX, es interesante notar que la construcción de grandes entradas al Acropolis (437 años A.C), requirieron luces más amplias que las usuales, requeridas por constructores griegos, Mnesicles usó varillas de hierro cementado dentro de ranuras cortadas en el lado de la tensión de las vigas de mármol; en el siglo XVIII, un francés Suofflot, intentó incrementar la resistencia de la construcción de mampostería enterrando varillas de hierro en el mortero, en las juntas. Esta prueba tuvo limitado éxito ya que las varillas de hierro oxidado y la presión de expansión causada por la corrosión, rompieron las juntas. El concepto del refuerzo embebido en concreto fresco para formar lo que ahora conocemos como concreto reforzado, ocurrió casi, simultáneamente, con tres personas, Joseph Monier (1823-1906) un jardinero francés incorporó una malla de acero en macetas en 1849. Wilkinson, un inglés, fabricó vigas de concreto reforzado para edificios, colocando viejos lazos de minas en el lado de tensión de las vigas y, finalmente, J.L. Lambot, hizo un bote de concreto en

el cual el refuerzo estaba en forma de canasta, utilizando alambres y varillas delgadas intercaladas. En los Estados Unidos, durante la misma época Thaddeus Hyatt (1866-1901) realizó muchos ensayos sobre vigas y losas de concreto reforzado, que contribuyeron, grandemente, a la racionalización de la teoría del concreto reforzado.

Es sin embargo, el trabajo de Lambot el de más interés para nosotros, no solamente porque fue una de las primeras aplicaciones del concreto reforzado, sino también, porque fue una forma de ferrocemento; es instructiva la forma de su patente sobre botes reforzados con alambre que fue editada en 1847.

"Mi invención muestra un nuevo producto el cual ayuda a reemplazar la madera donde es atacada por la humedad, como en los pisos de madera, contenedores de agua, macetas, etc. La sustancia nueva consiste de alambres de metal, los cuales son conectados para formar una especie de malla o red flexible. Le doy a esta malla la forma que se parezca en lo posible a los artículos que quiero crear. Luego pongo un cemento hidráulico o un bitumen similar o mezcla para llenar las juntas"

Esto fue el nacimiento del concreto reforzado, pero, subsecuentemente desarrollado de manera diferente del concepto de Lambot. La tecnología planteada pudo no haberse acomodado a la época y los esfuerzos necesarios para fabricación de miles de alambres, en lugar de ello, grandes barras fueron usadas para hacer lo que ahora es llamado concreto reforzado, y, el concepto del ferrocemento fue casi olvidado por 100 años.

El concreto reforzado para la construcción de botes reapareció durante la primera guerra mundial, cuando una escasez de planchas de acero

obligó a investigar otros materiales para la fabricación de botes. Sin embargo, el uso convencional de varillas de diámetros grandes para reforzar concreto, requirió de cascos muy espesos, haciendo los depósitos menos prácticos para su operación que la madera y el acero.

En el principio de los años 40, Pier Luigini Nervi, renovó el concepto original de ferrocemento, cuando observó que el concreto reforzado con capas de mallas de alambre, produce un material que posee características mecánicas, de un material, aproximadamente homogéneo y capaz de resistir impacto; delgadas losas de concreto reforzado de esta manera demostraron su flexibilidad, elasticidad y resistencia excepcional. Después de la segunda guerra mundial, Nervi, demostró la utilidad del ferrocemento como un material de construcción de botes. Su firma construyó el Irene de 165 toneladas, con un casco de ferrocemento de 1.4 pulgadas (36 mm.) de espesor.

El ferrocemento ganó amplia aceptación tan sólo recientemente en los años sesenta en el Reino Unido, Nueva Zelandia y Australia. En 1965 un constructor americano construyó un yate de ferrocemento en Nueva Zelandia, el Awahnee de 53 pies (16 metros) que le dio la vuelta al mundo dos veces, sin problemas serios, a pesar de haber tenido muchos accidentes.

El énfasis sobre ferrocemento como un material de construcción de barcos durante los sesenta, ha limitado notablemente las aplicaciones de Nervi a la construcción. En 1947 construyó una pequeña bodega, más tarde techó la piscina de la Academia Naval Italiana con un domo de 50 pies (15 metros) de diámetro y la famosa Sala de Exhibiciones de Turín, un sistema de techo de luces de 300 pies (91 metros) en ambos casos el ferrocemento sirvió como formaleta permanente para el sistema estructural.

La disponibilidad universal de los componentes básicos del ferrocemento, mallas de acero y concreto crean interés en la aplicación potencial de este material en los países en desarrollo desde la construcción en techos y paredes de viviendas de bajo costo hasta en almacenaje de granos y canales de irrigación. En 1972 la Academia Nacional de Ciencias a través de su oficina de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Internacional, estableció el panel Ad Hoc sobre la utilización del ferrocemento en países en desarrollo. El reporte del panel estimuló grandemente el interés de aplicaciones no marinas de este material versátil. Durante el final de los sesenta y principios de los setenta, la comunidad científica y técnica encontró en el ferrocemento un campo fértil de investigación. Un cierto número de artículos empezó a aparecer en la literatura y la especulación acerca del uso del ferrocemento como un material estructural, aumentó.

Un importante avance fue la fundación del Centro Internacional de Información del Ferrocemento, en el Instituto Asiático de Tecnología, Bangkok, Thailandia en octubre de 1976.

En colaboración con la Asociación Marina de Ferrocemento de Nueva Zelanda, el Centro Internacional de Bangkok, publica una revista trimestral "La Revista del Ferrocemento". Otra revista, la "Revista Internacional de Componentes de Cemento", a menudo contiene artículos relacionados con ferrocemento.

El Comité 549 de ACI, Ferrocemento, fue organizado en 1974 y le fue dada la misión de estudiar y reportar las propiedades ingenieriles, prácticas de construcción y aplicaciones prácticas de ferrocemento y desarrollar los lineamientos para la construcción en ferrocemento.

A pesar del gran potencial que tiene el ferrocemento para países industrializados y en vías de desarrollo, muchas investigaciones se necesitan para que sea aceptado como un material de construcción, particularmente, respecto de las restricciones de muchos códigos, tales como los requisitos de recubrimiento del refuerzo para la protección contra el fuego.

CAPITULO III

COMPOSICION Y CONSTRUCCION .

3.1 INTRODUCCION .

El ferrocemento consiste en un mortero de cemento portland, refuerzo, aditivos y revestimientos.

3.2 MORTERO .

El mortero que se usa en ferrocemento, está formado por un cemento hidráulico y un material inerte. El cemento portland es, generalmente, usado algunas veces mezclado con puzolanas. El agregado es, usualmente, una arena bien graduada capaz de pasar el tamiz #8. Sin embargo, dependiendo de las características del material de refuerzo (abertura de malla, distribución de refuerzo, etc.) puede ser utilizado un mortero que contenga grava de pequeño tamaño.

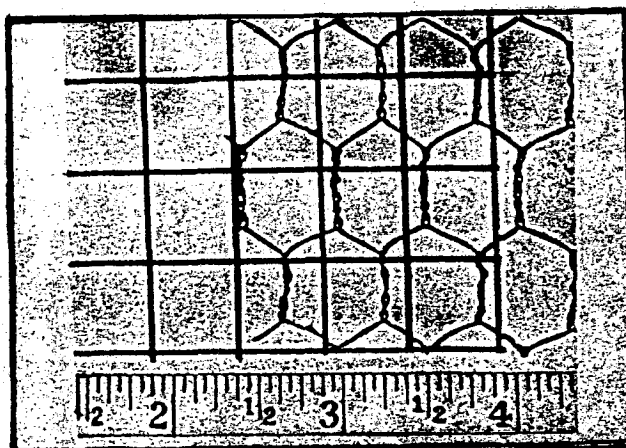


Fig. 3.2 Tipos de mallas comunmente usadas para refuerzo en ferrocemento

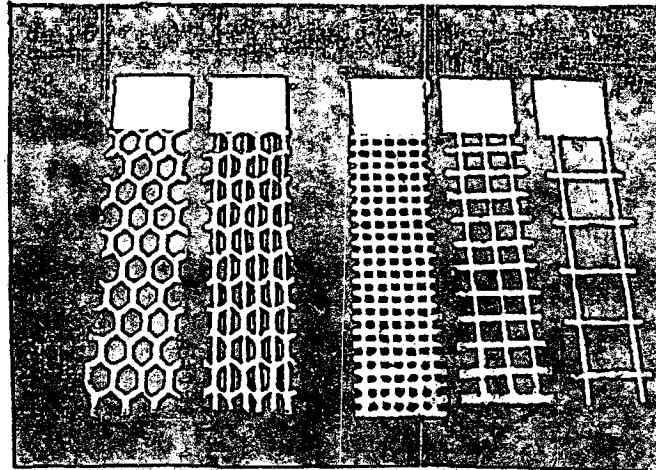


Fig. 3.3 ejemplo de malla hexagonal y malla de alambres soldados.

Como todos los cementos hidráulicos, las propiedades físicas y microestructura del mortero dependen de la composición química del cemento, la naturaleza de la arena, la relación agua-cemento y las buenas condiciones del curado de los productos finales. Ya que el mortero representa el 95%, aproximadamente, del volumen del ferrocemento. Sus propiedades tienen una gran influencia en las propiedades finales del producto. Hay numerosas referencias que describen en detalle los efectos de varios parámetros en las proporciones de la mezcla, las propiedades y microestructura del mortero de cemento hidráulico.

El uso de cemento portland en el ferrocemento produce una composición donde el mortero se considera que tiene alguna resistencia a la tensión. Parece que la acción entre el mortero y el refuerzo es más pronunciada en el ferrocemento que en el concreto reforzado ordinario. El uso de fibras en el mortero da como resultado, gran efecto en las propiedades de tensión. Pero la definición de ferrocemento elimina las fibras como un componente de refuerzo. Sin embargo, la adición de fibras da efectos favo-

rables en el control del agrietamiento y de la capacidad del mortero a resistir cargas de tensión, la adición de fibras relativamente cortas y delgadas ($l/d = 100$) distribuidas arbitrariamente a morteros de cemento hidráulico puede ser efectivo en la producción de ferrocemento, los efectos son la disminución de la tensión y el mejoramiento de la resistencia a corte, de tal manera que influye en el diseño y las propiedades finales del producto de ferrocemento, cuando se usa un mortero reforzado con fibras, la abertura de la malla y el espaciamiento son, usualmente, mucho más largos que la forma convencional para ferrocemento.

La reacción del cemento portland con el agua da como resultado la formación del endurecimiento de la pasta de cemento. El agua debe ser potable y libre de componentes orgánicos; la relación agua-cemento en la producción del ferrocemento varía entre 0.35 y 0.55 por peso.

3.3 REFUERZO.

El refuerzo para ferrocemento es comunmente en forma de capas de mallas fabricadas de una unión de filamentos individuales. Los tipos específicos de malla incluyen mallas entrelazadas o entretejidas, mallas en las cuales los filamentos están entretejidos y sus intersecciones no son rígidamente conectadas, mallas soldadas en un modelo rectangular formada por alambres perpendiculares soldados en las juntas de intersección y mallas entrelazadas, las cuales pueden incluir elementos diagonales entrelazados en el modelo rectangular. Varios ejemplos de mallas entrelazadas y soldadas se muestran en la figura 3.2. y 3.3. Dos formas más de refuerzos de metal que también se usan, son las mallas de metal expandido formadas por aberturas que están formadas por alambres delgados, un ejemplo de malla de metal ex-

pandido se muestra en la fig. 3.5, otra forma de refuerzo consiste en alambres continuos con alguna irregularidad armados en dos dimensiones en forma de colchoncillo. Esta forma particular de refuerzo está siendo obtenida usando fibras de naturaleza orgánica y fibra de vidrio. Es frecuente establecer en países en desarrollo el uso de materiales naturales del lugar. Hay una gran variedad de mallas clasificadas por su tamaño y propiedades del material usado en su elaboración, algunas mallas pueden galvanizarse, revestirse o impregnarse con zinc, antes o durante la fabricación de la malla. Las propiedades resultantes del ferrocemento son productos de los alambres, tamaño o ancho de las mallas, refuerzo rigidizante, fabricación, ductilidad y tratamiento.

3.4 ADITIVOS.

En adición de los numerosos aditivos comunmente usados en la fabricación del ferrocemento y el convencional concreto reforzado, el ferrocemento podría requerir de aditivos químicos que reduzcan la reacción entre el mortero y el refuerzo galvanizado.

Trióxido de cromo agregado en la mezcla de agua ha sido muy útil, en ese sentido las soluciones concentradas recomendadas dependen de la relación agua-cemento usada y es, aproximadamente, 300 partes por millón por peso del mortero. No se necesitan precauciones especiales para el uso de materiales de refuerzo no galvanizados.

3.5 PROPORCIONES DE LAS MEZCLAS.

Las proporciones del mortero para ferrocemento son:

Arena - cemento relación por peso 1.5 a 2.5

Agua - cemento relación por peso 0.35 a 0.5

El máximo tamaño de las partículas de arena depende de las aberturas de las mallas de refuerzo, asegurando la penetración de las mismas en el sistema de refuerzo, la arena que pasa el tamiz No. 6 ha dado resultados satisfactorios en muchas aplicaciones prácticas.

3.6 RECUBRIMIENTOS.

Muchos de los recubrimientos e impregnaciones de superficies que se usan en el concreto convencional e instalaciones de concreto reforzado pueden ser aplicados al ferrocemento. Estos son impregnación de polimeros, impregnación de epoxicos y el uso de acrilicos, latex y recubrimientos a base de cemento. Estos son usados para reducir la porosidad, o reducir la reparación de grietas y para lograr un acabado final de buena apariencia.

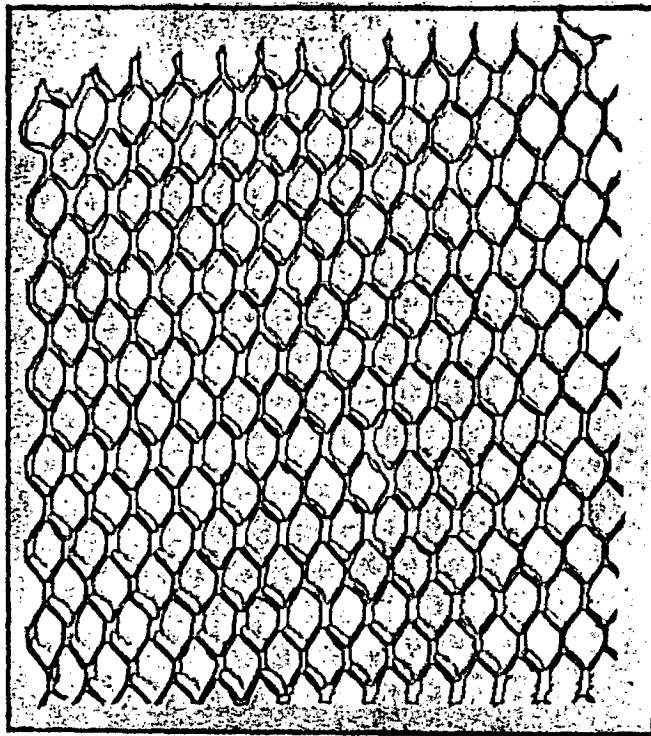


Fig. 3.5 muestra de malla de metal expandido

3.7 PROCESO DE FABRICACION.

La naturaleza esencial del ferrocemento, consiste en la malla de refuerzo continuo, impregnada y cubierta con un mortero de cemento portland. El proceso de fabricación incluye una amplia variedad de formas encaminadas a lograr un fin común. La determinación de la mayoría de las técnicas apropiadas de fabricación, dependen de la aplicación deseada, la destreza de la mano de obra y su costo.

Básicamente el proceso constructivo comprende la colocación de la malla de refuerzo ya sea en una capa o en varias. la colocación de las barras que forma la armadura rigidizante y en el caso de la aplicación del mortero existen diferentes formas. Dentro de éstas, está la aplicación del mortero a mano, ya sea de un lado contra una formaleta o de ambos lados usando un mortero consistente que no se deslice evitando así el uso de formaleta. Durante este procedimiento mucho cuidado debe tenerse para estar seguro de la penetración del mortero y la eliminación de vacíos significativos dentro del espesor del elemento. Cuando sea posible pueden ser adaptados vibradores manuales para causar mayor movilidad en el mortero, aditivos minerales y químicos son también usados para esta función. En el caso de aplicar el mortero utilizando formaleta, ésta puede ser hecha de madera, plywood, materiales rígidos, fibra de vidrio, concreto reforzado, el mismo ferrocemento y aún la tierra compactada. Estas formaletas pueden ser hechas de tal forma que permitan su utilización varias veces.

En el caso de aplicar el mortero de ambos lados, una especie de armadura rigidizante debe hacerse, utilizando barras de refuerzo No. 2 ó No. 3 y luego debe atarse la malla a ambos lados de la armadura, esta arma-

dura compuesta de barras y malla es entonces cubierta con mortero de ambos lados. Como una alternativa de la aplicación del mortero a mano, este puede ser aplicado lanzado en forma mecánica.

Sin embargo, algún trabajo manual será necesario para asegurar la completa penetración y proveer una adecuada superficie terminada.

En el caso de forzar la malla dentro del mortero plástico, comúnmente llamado, como una técnica de laminado, hay también dos procedimientos primarios de fabricación: aplicación del mortero a mano y el lanzamiento. En ambos casos una capa inicial de mortero es aplicada al molde nominalmente menos que 1/16 a 1/8 de pulgada (1-3mm) de espesor y a esta capa debe dársele cierta consistencia inicial. Esta capa puede ser de un tipo de mortero especial, para impartir alguna característica especial deseada en el producto terminado. Sin embargo, el propósito fundamental de la capa inicial de mortero es asegurar un recubrimiento apropiado y la penetración de la malla. Después de esta capa inicial, una segunda capa de mortero fresco es aplicada ya sea a mano o lanzada, de suficiente espesor para que soporte una o dos capas de mallas de refuerzo, las cuales subsecuentemente son colocadas dentro del mortero, un rodillo, similar a un rodillo de pintura pero con superficie rugosa es usado para forzar que las capas de la cama de refuerzo penetren en el mortero. Por consiguiente un ajuste muy cuidadoso de la consistencia de la mezcla es requerido para ayudar a la penetración de la malla, especialmente para superficies verticales. El proceso de poner capas es continuo, hasta alcanzar el espesor desado del ferrocemento.

Los métodos de fabricación discutidos son de intensa labor, variando los grados y la calidad de productos resultantes, dependiendo gran-

demente de la habilidad de la mano de obra utilizada. La experiencia ha demostrado, sin embargo, que para todos los procedimientos discutidos, el nivel de habilidad requerida puede ser rápidamente dominada y que excelentes resultados pueden ser alcanzados si se provee y mantiene una adecuada y apropiada supervisión. Muchos procedimientos de alta tecnología han sido sugeridos, éstos incluyen diseños de máquinas empacadoras y vaciado a vueltas para fabricación de conductos o tubos y el rociado para la producción de paneles delgados y láminas. Éstos y otros procedimientos de alta tecnología en producción, sin embargo, están en espera del tiempo cuando el material "ferrocemento" y los diseños de sistemas lleguen a ser económicos y funcionalmente competitivos con el desarrollo del mundo.

CAPITULO IV

PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS

4.1 INTRODUCCION.

Muchas de las propiedades particulares del ferrocemento derivan del hecho que por definición éste contiene, relativamente, gran cantidad de refuerzo, hecho de pequeños elementos con un área mucho más alta que el refuerzo convencional. En las palabras de NERVI quien primero usó el término ferrocemento, su característica más notable es: "Mayor elasticidad y resistencia al agrietamiento del mortero de cemento por la extrema subdivisión y distribución del refuerzo". El reconocimiento de parámetros que definen la distribución del refuerzo es fundamental para comprender muchas de las propiedades del ferrocemento. Dos de tales parámetros, son la superficie específica y el volumen de la fracción del refuerzo. El volumen de fracción de refuerzo es el volumen de refuerzo por unidad de volumen de ferrocemento y la superficie específica es el área de la superficie adherida de refuerzo por unidad de volumen del compuesto (véase también secc. 5.3 y 5.6) Valores de estos parámetros son, a menudo, encontrados en la literatura técnica que caracterizan al ferrocemento. Valores típicos de estos parámetros son: un refuerzo concentrado de al menos 25-31 libras/pie³ (400 - 500 kg./ m³) (un volumen de la fracción de 5.1 - 6.3 por ciento), un promedio de espacio entre elementos de refuerzo de 0.2 pulgadas (5 mm) a 0.4 pulgadas (10mm) y una superficie específica de al menos 5.1 pulgadas⁻¹ (0.2 mm⁻¹).

Desafortunadamente, debido a la generalidad de la definición sobre ferrocemento dada en el Capítulo I, la falta de datos apropiados impide una buena comparación de las propiedades de varias formas de ferrocemento, excepto aquellas que usan refuerzo de alambre de acero. El orden de discu-

sión de las propiedades en los siguientes párrafos es como sigue: Propiedades mecánicas bajo cargas estáticas (resistencia última, elasticidad y comportamiento esfuerzo-deformación) propiedades mecánicas bajo cargas dinámicas (fatiga e impacto) desarrollo de grietas y su relación con las condiciones de servicio, contracción, flujo y durabilidad.

4.2 RESISTENCIA ULTIMA BAJO CARGA ESTATICA.

A través de esta sección, parámetros asociados con la orientación y la suma total de refuerzo y el área efectiva de acero en una dirección particular son presentadas. La orientación se define por un número o números que representan el ángulo en grados entre elementos reforzantes y la dirección del esfuerzo aplicado, por ejemplo EXM / A-24 tipo A significa una malla de metal expandido con todos los elementos a ± 24 grados respecto del esfuerzo aplicado o EWM/90 malla electrosoldada con alambres a 0 grados (paralelos) y 90 grados (transversal) al esfuerzo aplicado (Fig. 4.1.) El área efectiva de acero en una dirección particular está basada en el área de la sección transversal de los elementos multiplicada por el coseno del ángulo entre los elementos y la dirección del esfuerzo aplicado. (fig. 4.1) La cantidad total de refuerzo está expresado como un porcentaje del volumen de ferrocemento o como un peso de acero por unidad de área o volumen de ferrocemento.

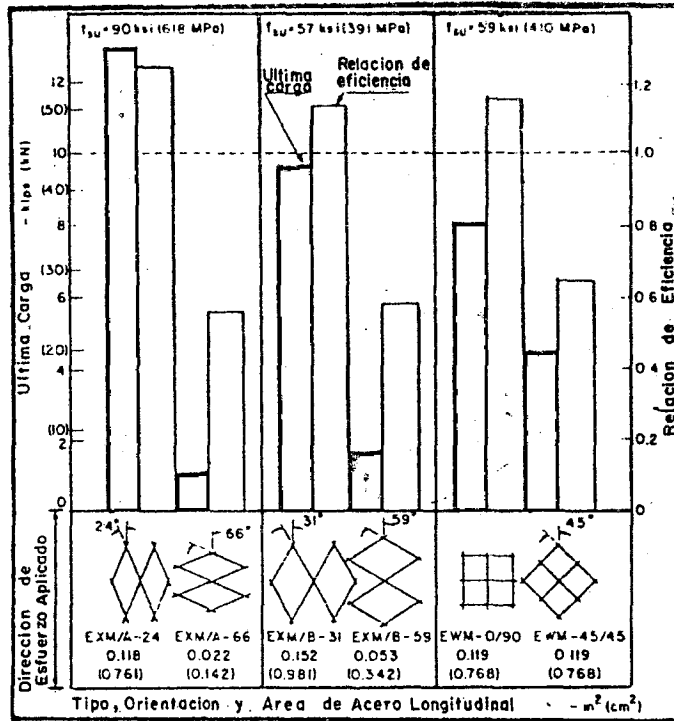


Fig. 4.1 Influencia de la orientación de el refuerzo en la resistencia última a tensión del ferrocemento y la relación de eficiencia para dos tipos de mallas, A y B. Malla de metal expandido, EXM (izquierda y centro), y malla soldada cuadrada, EWM (derecha). Referencia 33.

4.2.1 RESISTENCIA ULTIMA A TENSION.

En tensión la capacidad de carga es esencialmente independiente del espesor del elemento, porque el mortero se agrieta mucho antes de la falla y no contribuye directamente al esfuerzo. El comportamiento del material es a menudo expresado en términos de carga y no en términos de esfuerzo. Generalmente, la resistencia de la tensión (carga) del ferrocemento usando malla de metal expandido, malla soldada o malla entrelazada en sus orientaciones normales corresponde muy cercanamente a la capacidad de carga de tensión de los elementos de refuerzo.

La resistencia correspondiente a la tensión (esfuerzo) es igual a la capacidad de carga dividida por la sección transversal de ferrocemento. Hay notables excepciones que ocurren cuando la malla soldada está orientada en 45 grados a la carga aplicada o cuando la malla de metal expandido es usada en la posición que los agujeros en forma de diamante son más largos y perpendiculares al esfuerzo aplicado, por ejemplo, para malla soldada de 0.5 pulgadas (13 mm) fig. 4.1 derecha. La resistencia última para una orientación de 45 grados es un 50 - 60 por ciento de lo que sería para la orientación normal, mientras que para dos clases de mallas de metal expandido (fig. 4.1) perpendicular a la orientación normal es solamente 15 - 35 por ciento, de lo que es para la orientación normal. Malla hexagonal (malla de gallinero) ha sido también mostrada para darle características anisotrópicas en tensiones, observando la más alta resistencia, cuando la dirección de los alambres entretejidos están paralelos al esfuerzo aplicado.

Esto da una verdadera indicación de la efectividad de varios refuerzos, en diferentes orientaciones (Fig. 4.1) y demuestra que las diferencias observadas en las resistencias están bastante asociadas con la orientación de las capas de refuerzo, no sólo con diferencias en el área transversal efectiva del refuerzo.

En general la elección óptima de refuerzo para el ferrocemento en tensión dependen si la carga es esencialmente uniaxial o significativa biaxial. Por ejemplo: fig. 4.1 muestra que la malla de metal expandido en su orientación normal es más ajustable que otras mallas reforzadas para una carga uniaxial, porque es una mayor proporción el total de acero efectivo en la dirección del esfuerzo aplicado. Para carga biaxial en malla cuadrada es

más efectiva porque el acero es distribuido equitativamente en las dos direcciones perpendiculares, sin embargo, el debilitamiento en la orientación de los 45 grados de dirección podrían gobernar en este caso. Casi siempre, bajo condiciones biaxiales el anisotropismo asociado con la malla de metal expandido o malla hexagonal pueden ser contenido por alternada orientación de sucesivas capas, justo como la anisotropía de madera es convertida en la fabricación de plywood.

4.2.2 RESISTENCIA ULTIMA COMPRESIVA.

En esta forma de tensión diferente, el mortero contribuye directamente con la resistencia del ferrocemento en proporción del área de la sección transversal, así cantidad de refuerzos y resistencias son mejor definidos en términos de fracción de volumen de los refuerzos y en esfuerzos. Obviamente, la resistencia del mortero depende de su relación agua-cemento, al igual que el concreto convencional reforzado, el tipo, la orientación y la forma de colocación del refuerzo son también importantes, por ejemplo columnas periféricas sólidas y vacías (identificadas como muestra fig. 4.2 porque son formadas con la ayuda de un polystyrene de núcleo blando). las reforzadas con malla soldada son más resistentes que las mismas reforzadas con mallas de metal expandido. (fig. 4.2). Esto es atribuido a los alambres laterales en la malla actuando de una manera similar al refuerzo convencional helicoidal restringiendo entonces el mortero, mientras que la malla de metal expandido sufre una acción de tijereta aparentemente visualizada en la forma de falla que impide la efectiva restricción triaxial y hace al ferrocemento un poco más fuerte que el mortero no reforzado; el cambio drástico de la pendiente en la parte alta de las dos curvas de la Fig. 4.2 es atribuido al rendimiento general del sistema de malla como se observa por incremento

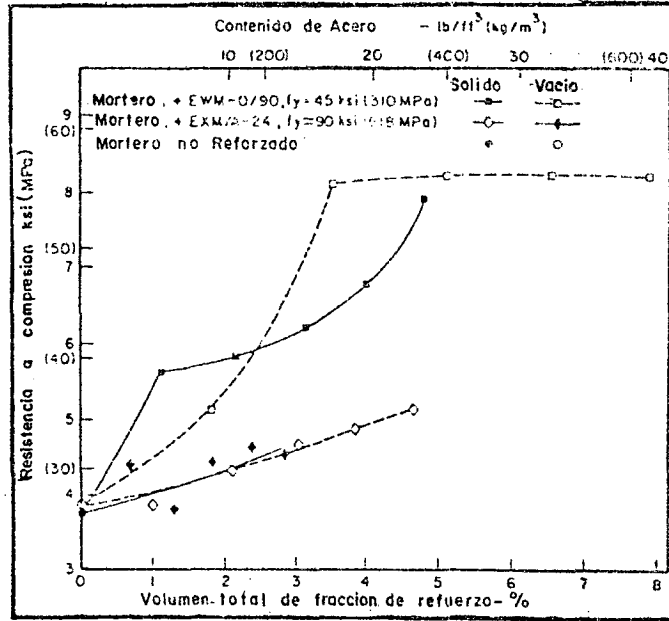


Fig. 4.2 Relación entre resistencia compresiva y contenido de acero o fracción de volumen para columnas de ferrocemento reforzadas con malla de metal expandido o malla soldada. Referencia 33

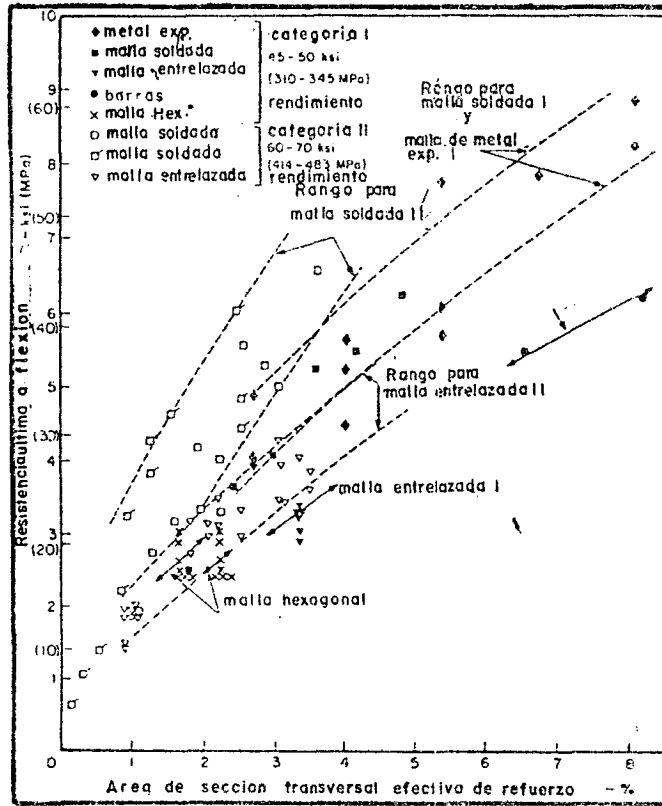


Fig. 4.3 Relación entre resistencia última a flexión del ferrocemento y la sección transversal de área efectiva de refuerzo en la dirección del esfuerzo aplicado. Referencia, 36,38,41,43

sustancial en la relación de Poisson, (véase sección 4.4.2) Cuando el refuerzo de la malla es colocado paralelo a la carga aplicada en un plano solamente (como opuesto al arreglo periférico cerrado) ninguna mejora en la resistencia es observada.

En resumen, las únicas formas de refuerzo probables de ganar una significativa resistencia en compresión son, las mallas reforzadas cuadradas fabricadas con estribos cerrados o arreglos cilíndricos, los cuales restringen el mortero forzándolo a adoptar refuerzos triaxiales, condiciones asociadas con mayor resistencia.

4.2.3 RESISTENCIA ULTIMA A FLEXION .

La resistencia última en flexión naturalmente refleja la influencia combinada de factores afectando la resistencia a la tensión y a la compresión, ejemplo, la cantidad, tipo, orientación y geometría intrínseca de las capas de refuerzo. Muchos investigadores han usado los principios de análisis convencionales de la resistencia última para el concreto reforzado, para determinar la resistencia de elementos de ferrocemento. Esta metodología, no obstante, satisfactoria en muchos casos, toma en cuenta solamente el área efectiva de la sección transversal y la posición de las capas de refuerzo respecto del eje neutro. El tipo de refuerzo, la orientación, la separación y la geometría de las capas son variables adicionales importantes para el ferrocemento, para aislar la importancia de estas variables y dar realce a circunstancias donde un análisis convencional de resistencia última, es inadecuado, es útil, además de comparar la resistencia absoluta, establecer un indicador general de comportamiento aplicable a todos los datos que limiten la influencia de diferencias en el mortero y resistencia del

refuerzo, tamaño del elemento, posición de las capas de refuerzo, etc. El indicador buscado es la relación de eficiencia y es el equivalente de la resistencia a la tensión seleccionada, por ejemplo, la relación del actual momento último, determinado por la prueba del valor del momento último por el método de la resistencia última a tensión. Sin embargo, la actual determinación de la resistencia última a tensión depende de la extensión de la distribución de la tensión y la forma de falla asumida, el tipo de Esfuerzo/tensión, de la función escogida para el refuerzo, el coeficiente del bloque de esfuerzo y la tensión última seleccionada por el mortero, relaciones eficientes basadas en cualquier método particular de determinación son comparables en sentido relativo, en forma indiferente al método usado.

Antes de considerar la relación de eficiencia de varios sistemas, es interesante comparar el funcionamiento de varios sistemas de refuerzo en términos de la relación entre el actual esfuerzo último a flexión medido en pruebas y el área efectiva de refuerzos en la dirección longitudinal. La comparación está hecha con varios refuerzos en su orientación normal (como previamente se definió para mallas de metal expandido, malla cuadrada y malla hexagonal) a dos niveles de resistencia del refuerzo. (Fig. 4.3). La distribución de las capas de refuerzo fue asumida uniforme en base a la profundidad de la sección transversal y las barras de la armadura regidizante no fueron consideradas. La comparación muestra que la malla de metal expandido y la malla cuadrada soldada actúan mejor que la malla entrelazada o barras convencionales con puntas de anclaje (barra convencional de refuerzo fue incluida para propósitos de comparación solamente y no pueden ser permitidas

por el código de construcción ACI) la malla entrelazada, las barras convencionales y la malla hexagonal actúan en forma similar. Basado en un área longitudinal de refuerzo, la malla de metal expandido y la malla cuadrada soldada en su normal orientación son más efectivas en flexión que otros tipos de refuerzos, a pesar de las diferencias en pruebas en el tamaño del elemento, el mortero, la superficie específica y el espaciamiento entre las capas de refuerzo. El uso de relaciones eficientes da un indicativo valedero de la efectividad de varios tipos de refuerzos. A pesar de las pequeñas diferencias en los métodos de análisis aplicados en la resistencia última para determinar el momento último, el consenso es que la eficiencia de las relaciones para mallas de metal expandido y mallas soldadas en sus orientaciones normales son más altas que la de malla entrelazada en el rango de 1.05 a 1.20. Similares relaciones de eficiencia han sido obtenidas también para carga uniaxial y biaxial (losa circular con una carga central) usando malla hexagonal tendida en capas alternas con barras rigidizantes entre ellas, el funcionamiento de este sistema de refuerzo alcanza y ligeramente excede lo esperado en el análisis de carga última, alguna resistencia adicional aparente es impartida por las dos direcciones naturales del refuerzo, como ya se notó en la resistencia a la tensión.

Hay probablemente tres razones para la mayor efectividad en flexión de la malla cuadrada soldada y la malla de metal expandido sobre la malla entrelazada. Primero es la posibilidad del destrenzado debido al estiramiento prematuro de los alambres longitudinales, los cuales en mallas entrelazadas no son inicialmente rectos debido a las trenzas. Este estiramiento también reduce los aparentes módulos del sistema de malla. Segundo es la resistencia de las uniones a la falla asociada con el anclaje de los elemen-

tos oblicuos en malla soldada y malla de metal expandido. (conexión de los alambres de las mallas) Tercero es el efecto del componente transversal de el refuerzo restringiendo la expansión lateral del mortero en la zona de compresión debido a la estabilidad inherente con el refuerzo longitudinal; además, reforzando el mortero para creación de una condición de esfuerzo biaxial. Ya que estas tres consideraciones también se aplican en alguna forma a malla hexagonal, ello puede influir en su funcionamiento de una manera similar.

La orientación de los refuerzos es tan importante para la resistencia a la flexión como para la resistencia a tensión particularmente cuando la resistencia bajo carga biaxial es considerada. Mientras que mallas cuadradas ofrecen igual resistencia en ambas direcciones paralelas a los alambres, la resistencia en los 45 grados de orientación es 67-80 por ciento de esos alambres paralelos para malla soldada, y, con menor diferencia para malla entrelazada. Con malla de metal expandido, la resistencia en dirección transversal es particularmente baja, 11 a 15 por ciento, 23 y 33 por ciento de los valores para orientación normal, y, dependiendo de la naturaleza de el refuerzo. Para malla hexagonal, la resistencia en dirección transversal es un promedio del 57 por ciento de esos alambres en su orientación normal. Estas reducciones son más grandes que lo esperado en la suposición simple de disminución en el área efectiva de la sección transversal de el refuerzo. Relaciones eficientes para mallas de metal expandido en la dirección transversal son del orden de 0.5 claramente indicando otro caso cuando el comportamiento está bastante bajo de lo esperado del análisis de carga última.

La superficie específica del refuerzo depende de dos parámetros, el diámetro de los elementos reforzantes y su espaciamiento elemental de los mismos (separación entre capas) (véase secc. 5.3) esta superficie específica influye en la resistencia última de mallas entrelazadas, relativamente grandes, arriba de 6 pulgadas (150 mm) cuadradas. Sin embargo, examinando datos comparables de mallas soldadas y entrelazadas, mallas más pequeñas que 1 pulgada (25 mm) no muestran evidencia de la influencia de la superficie específica en la resistencia última. Aparentemente, un incremento en la superficie específica es solamente beneficiosa, dependiendo del largo del alambre que está en contacto dentro del mortero, ésto es un factor que afecta la resistencia última. A veces, la falta de adherencia no es un factor que afecta, ejemplo, en mallas soldadas y en mallas de metal expandido donde la adherencia efectiva es proporcionada por el refuerzo transversal, también en mallas de excelente clase, la mayor superficie específica que la mínima requerida para prevenir la falla de la ligadura no es beneficiosa. De hecho, ésto puede ser perjudicial provocando una reducción en resistencia, aparentemente causada por la dificultad de una buena penetración del mortero en el sistema de refuerzo.

El espaciamiento de las capas de refuerzo es normalmente uniforme por todo el espesor disponible de la sección transversal, excepto cuando la armadura de barras regidizantes está presente. La idea de que capas concentradas en la parte superior e inferior del elemento a flexión aumentan la resistencia flexible, no es razonable, debido a la gran distancia del eje neutro. Sin embargo, muchas veces tal arreglo reduce la resistencia absoluta y la relación de eficiencia por provocar falla de corte horizontal,

la cual no es normalmente un problema en unidades de ferrocemento con refuerzos uniformes, con espaciamientos cercanos y una gran relación luz/peralte (Fig. 4.4)

Lo anterior ha sido comprobado usando mallas de metal expandido las cuales al ser distribuidas uniformemente en el espesor efectivo del elemento ha dado relaciones óptimas de eficiencia. (Fig. 4.4).

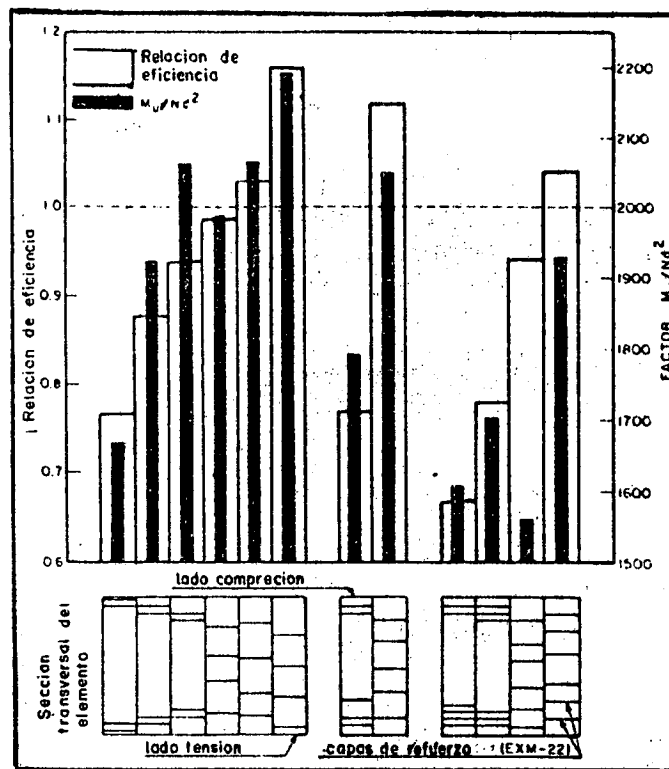


Fig. 4.4 Efecto del espaciamiento de las capas de refuerzo (4,5 o 6 capas de mallas de metal expandido), funcionamiento y relación de eficiencia en flexión. N es el número de capas de refuerzo y d el espesor efectivo. Referencia 38

En general, la elección óptima de refuerzo para resistencia flexible, como ya se ha notado en la resistencia a tensión, depende si la carga es esencialmente uniaxial o significativamente biaxial. Para carga uniaxial la efectividad del costo de los diferentes refuerzos están ilustrados por la relación entre resistencia flexible y el contenido del acero o fracción de volumen (Fig. 4.5) claro, la malla de metal expandido es la mejor elección sobre estas bases. También, generalmente, ésta cuesta menos por unidad de peso. Alternando capas de malla hexagonal con barras de armadura rigidizante en ambas direcciones parece igualmente efectiva para la misma resistencia de rendimiento bajo condiciones biaxiales (note el rendimiento más bajo de la resistencia en fig. 4.5 para este sistema) la malla soldada es probablemente la mejor elección; sin embargo, la debilidad inherente bajo los 45 grados del eje diagonal deberá ser tomada en cuenta. Cuando la malla de metal expandido o la malla hexagonal son empleadas bajo estas condiciones, la orientación de las capas sucesivas deberá ser alternada para contar con sus características anisotrópicas.

Otra consideración que cuenta para la elección de el refuerzo es la facilidad de adoptar, fácilmente, la curvatura del elemento a ser construido. La malla hexagonal es particularmente adecuada para secciones de curva simple y la malla de metal expandido para secciones planas.

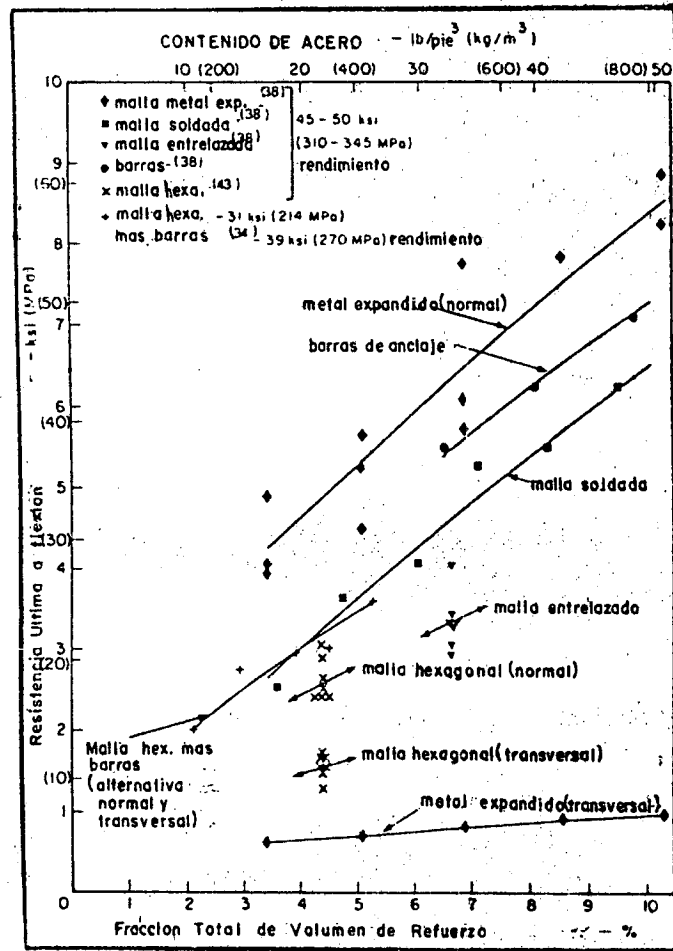


Fig. 4.5 Relación entre resistencia última a flexión del ferrocemento y la cantidad total de refuerzo. Referencia 34, 38, 43

4.2.4 RESISTENCIA A CORTE.

Notablemente, pocos de los muchos estudios sobre ferrocemento han incluido la resistencia a corte en su evaluación, tal vez porque el ferrocemento es usado primeramente en elementos delgados, donde la relación luz/peralte en flexión es bastante grande y no es el corte el que dirige el criterio de falla. La alineación longitudinal paralela de las capas de refuerzos a corte, equivalente a la inclinación de las barras o de los estribos usados en el concreto reforzado; de esta manera el ferrocemento no es adaptable particularmente a la resistencia al corte. Sin embargo, la mayoría de aplicaciones con ferrocemento no requieren refuerzo por corte. La resistencia a corte ha sido medida para elementos reforzados con mallas entrelazadas y barras de la armadura rigidizante probadas en inclinación a un corte con una relación luz/peralte de 0.4. Mientras que los valores actuales reflejan las características del acero y el mortero usado, ellos permanecen como una fracción constante de cerca del 32 por ciento de lo equivalente a la resistencia en flexión, en un rango contenido de acero de 18 - 35 lbs/pie³ (288-480 kg./m³). el 35 por ciento es válido para otros sistemas de refuerzos inciertos.

Algunos usos del ferrocemento para construcción de botes, han demostrado la resistencia del material ante fuerzas de corte punzonante y pruebas accidentales que incluyen choques con rocas u otros botes.

4.3 RESISTENCIA A LA PRIMERA GRIETA BAJO CARGA ESTÁTICA.

El término resistencia a la primera grieta o su equivalente aparece frecuente en la literatura sobre el comportamiento del ferrocemento ba-

jo tensión y flexión pero su uso sin reservas es desafortunado porque puede ser definido en varias formas y por eso puede significar cosas diferentes para gente diferente. En una discusión amplia sobre este problema, se notó que los microagrietamientos son inherentes en el mortero aún antes de que a este le sea aplicada una carga, y, también, que mientras los microagrietamientos progresivamente se agrandan y propagan, debido a la acción de una carga, éstos son detectados por algunos medios visuales o de otra forma, y se les determina como "primera grieta". Sin embargo, en los variados estudios hechos por los polacos y los rusos, "primera grieta" es definida como un agrietamiento que se extiende de un ancho de 0.005 mm. a un valor visible a simple vista de 0.03 - 0.1 mm. Por consiguiente, una deformación de agrietamiento en estos estudios se extiende desde el mortero no reforzado (100-225 microdeformaciones) a valores establecidos en otras formas y extendiéndose de 800 a 2000 microdeformaciones. En otros estudios, la primera grieta es definida como la primera desviación de la función lineal de carga-elongación en tensión (900-500 microdeformaciones) o la desviación correspondiente a la curva de carga-deflexión en flexión, también con una amplitud de agrietamiento bajo una acción de carga de flexión de 0.003 pulgadas (0.0075 mm) como el punto en que el mortero en la superficie de tensión de un elemento a flexión alcanza un esfuerzo igual a del esfuerzo de agrietamiento del mortero no reforzado, o simplemente, como el agrietamiento visible.

Muy obviamente, hasta que sea adoptada una definición generalmente aceptada de "primera grieta" el asociar un esfuerzo o resistencia con esta condición está lleno de dificultad y mal entendido. Un acercamiento más

Útil podría ser en el futuro relacionar carga o esfuerzo a ancho promedio de agrietamiento y llegar a un diseño de esfuerzos admisibles correspondientes al ancho de un agrietamiento promedio considerado permisible en servicio. (discutido más adelante en sección 5.8)

A pesar del problema de definición, existe un acuerdo general que en tensión directa por lo menos la resistencia al agrietamiento aumenta con el incremento en la cantidad o grado de subdivisión del refuerzo definido en términos de la superficie específica del componente longitudinal del refuerzo. (fig. 4.6). Mientras que la diferencia entre malla soldada y la malla entrelazada es aparentemente menor, la diferencia entre malla de metal expandido y los otros tipos de mallas es muy significativo y es obviamente asociada con otros factores más que con la superficie específica. Elementos reforzados con malla de metal expandido resisten agrietamientos visibles aproximadamente en un 80 por ciento de su resistencia última, mientras que el agrietamiento en elementos con otra malla empieza en un porcentaje mucho más bajo que la resistencia última y desarrolla, gradualmente, un punto donde el espaciamiento de los agrietamientos corresponde al espaciamiento de los alambres transversales en la malla.

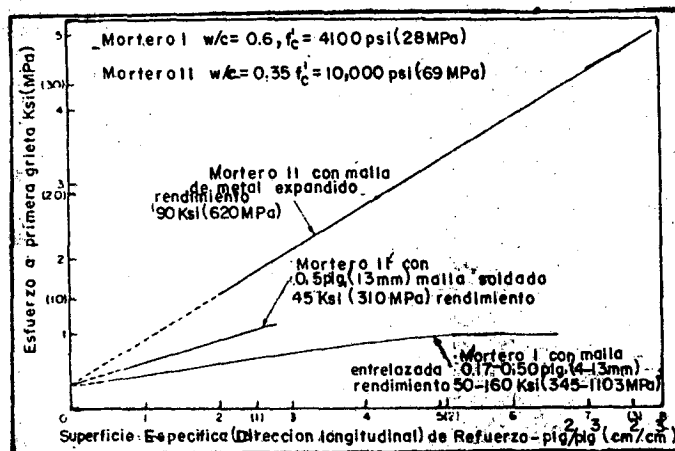


Fig. 4.6 Relación entre la resistencia de la primera grieta del ferrocemento en tensión directa y la superficie específica de el refuerzo. Referencia 32, 47.

En flexión, las relaciones que unen el agrietamiento con la superficie específica son menos definidas y la considerable dispersión de datos refleja la influencia posible de otras variables. Superficie específica en estos casos es definida como una superficie de área del refuerzo total por unidad de volumen de ferrocemento localizado solamente en la zona de tensión. Esto quizá es cuestionable en base a que el agrietamiento es controlado, principalmente, por capas en la vecindad inmediata del lado de tensión; las restantes capas internas tienen menos influencia. A pesar de la lógica cuestionable de esta definición, los datos disponibles para mallas de metal expandido y malla hexagonal o cuadrada demuestran que en general la resistencia de agrietamiento aumenta de un valor muy bajo correspondiente a la resistencia del mortero a valores proporcionales a la superficie específica.

La mayor efectividad de la malla de metal expandido para prevenir el agrietamiento es otra vez notable con relación a la primera grieta a carga última en aproximadamente 80 por ciento, tan alto como para tensión directa. Otra investigación refiere específicamente, sin dar datos, a la habilidad de elementos reforzados con malla de metal expandido para aceptar deformación con menos agrietamientos visibles que elementos conteniendo el mismo peso de malla soldada o entrelzada. Los datos disponibles sugieren, generalmente, que mientras la superficie específica es un factor que influye la resistencia a la primera grieta, también son importantes otros factores que están relacionados con la geometría del refuerzo.

4.4 ELASTICIDAD Y COMPORTAMIENTO CARGA - DEFORMACION.

Continuando con la consideración dada para resistencia última y de agrietamiento, es adecuado examinar el comportamiento de carga-deformación del ferrocemento bajo varias formas de carga estática, en particular su elasticidad que, históricamente, ha sido identificada como uno de sus mayores atributos en conjunto.

4.4.1 COMPORTAMIENTO EN TENSION.

Para refuerzos de malla cuadrada, el comportamiento del ferrocemento ha sido caracterizado en tres etapas (fig. 4.7).

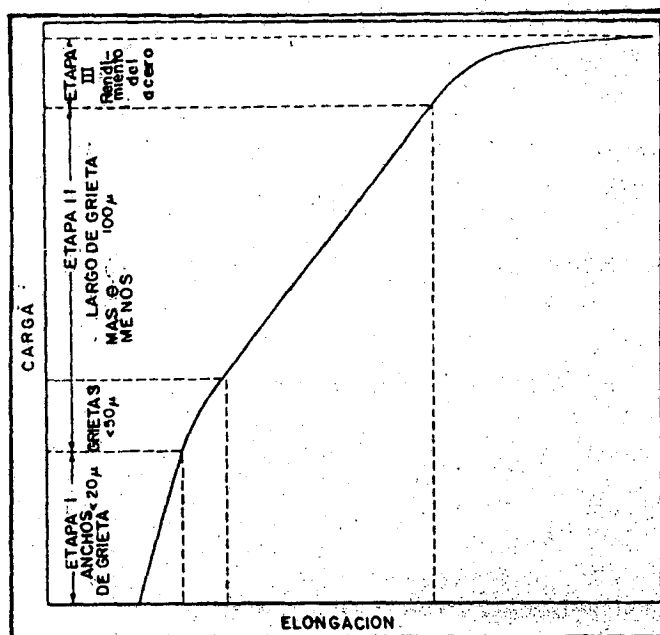


Fig. 4.7 Esquema de la relación carga-elongación para el ferrocemento en tensión directa. Referencia 46.

En la etapa inicial el mortero y el refuerzo actúan con un comportamiento continuo teniendo un módulo de elasticidad compuesta más o menos igual al que se ha predicho por la ley volumétrica de mezclas del refuerzo longitudinal y el mortero. La segunda etapa, asociada con un mortero com-

pletamente agrietado es también lineal. Su módulo (ver secciones 5.3 y 5.8 para la definición de módulo) es poco más grande que el producto de la fracción de volumen y el módulo del refuerzo longitudinal, apoyando así la idea que el mortero y el refuerzo lateral continúan jugando un papel activo después del primer agrietamiento. En la tercera etapa, el mortero cesa de actuar. La falla corresponde a la flexibilidad del refuerzo. Uno de los estudios que confirma este comportamiento de tres etapas, reporta los anchos de grieta del microagrietamiento inicialmente presente en el mortero sin carga, y el agrietamiento inducido que precede a la flexibilidad del refuerzo (Fig. 4.7).

Mientras que lo anteriormente mencionado está basado en la observación de elementos reforzados con mallas cuadradas, y pueden ser cualitativamente verdadero para otros tipos de refuerzos, el tipo de refuerzo y su geometría intrínseca son factores importantes que afectan el módulo de elasticidad (etapas 1 o 2) y generalmente el comportamiento carga-deformación (fig. 4.8) por ejemplo, un análisis más complejo tomando en cuenta la orientación de los elementos oblicuos de refuerzo, hace necesario predecir el módulo del ferrocemento con malla hexagonal. También son claramente diferentes para malla de meta expandido y malla soldada (Fig. 4.8), probablemente reflejando diferencias en la ductibilidad del acero y en la rigidez del trabajo del refuerzo mismo. (Observe que el módulo de trabajo de dos formas de refuerzo es muy diferente para el módulo elástico del acero como se muestra en la sección 5.9).

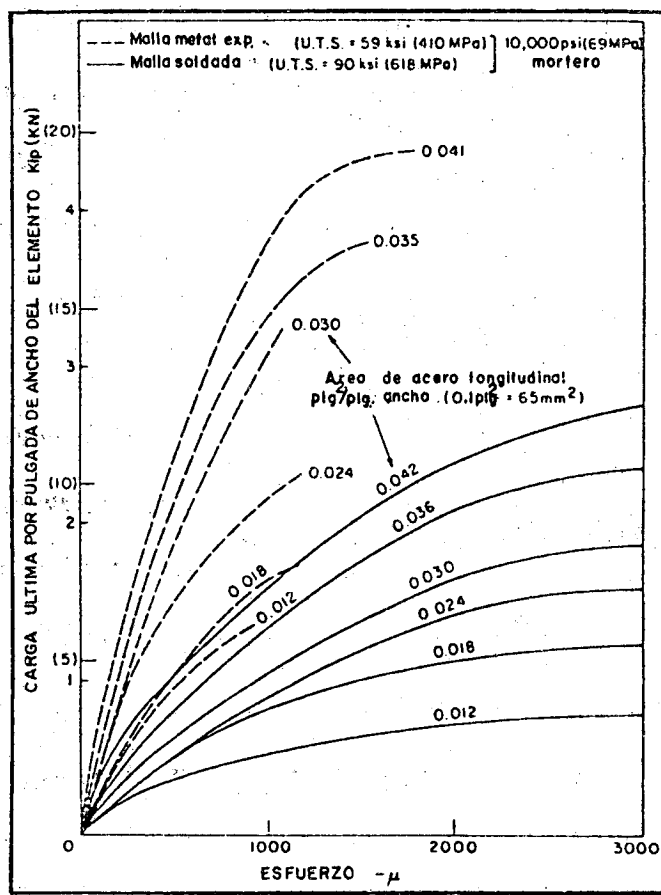


Fig. 4.8 Relación Carga-deformación en tensión directa para ferrocemento con diferentes tipos de refuerzos. Referencia 33

4.4.2 COMPORTAMIENTO EN COMPRESION.

Cuando el refuerzo está solamente en un plano, tiene un efecto mínimo en la relación carga-deformación y el módulo elástico asociado queda virtualmente igual que para el mortero. Cuando el refuerzo está presente en forma periférica cerrada, la relación carga-deformación es curvilínea con el módulo tangente inicial, aumentando gradualmente con la cantidad de refuerzo. El módulo elástico inicial puede ser pronosticado aproximadamente en base de la influencia volumétrica de los dos componentes. (materiales actuando juntos) Los valores del módulo elástico son levemente mayores para elementos reforzados con malla soldada que para sus equivalentes con malla de metal expandido. Esto refleja la mayor restricción efectiva triaxial del mortero por la malla soldada, lo cual es también aparente en la relación de poisson con un incremento de carga en el ferrocemento. Para valores iniciales de 0.06-0.07 y 0.11-0.13 para malla soldada y malla de metal expandido respectivamente, la relación aumenta sólo gradualmente en menos de 0.10 justo antes de la falla de los elementos reforzados con estas mallas, mientras aumenta repentinamente en más de 0.20 a 60-80 por ciento, de último, para elementos reforzados con malla de metal expandido.

4.4.3 COMPORTAMIENTO PARA FLEXION.

El comportamiento de las tres etapas ya identificadas para tensión directa (fig. 4.7) es también aplicable para ferrocemento en flexión. Ha sido propuesto un método para pronosticar la relación momento-curvatura basado en la suposición de una curva esfuerzo-tensión de segundo grado para el mortero en compresión y una simple relación bilineal (elástica/plástica) para el acero en tensión, pero no ha sido verificado experimentalmente. Otro método propuesto usa series de Fourier para definir las

funciones de esfuerzo-tensión del mortero y el refuerzo, por eso computa las relaciones momento-curvatura. Esto da resultados que concuerdan muy satisfactoriamente con las relaciones correspondientes determinadas experimentalmente para las dos primeras etapas del debilitamiento del refuerzo, pero se han reportado algunas discrepancias para la tercera etapa.

4.5 RESISTENCIA BAJO CARGA DE FATIGA.

Los dos componentes que constituyen el ferrocemento, acero y mortero, tienen características diferentes de fatiga. La mayoría de aceros poseen un límite definido de resistencia, es decir, a niveles de esfuerzos bajos este límite tiene una vida de fatiga indefinida o al menos muy larga. En contraste, un material frágil como el mortero no tiene límite definido de resistencia, es decir, se debilitará eventualmente bajo cargas repetidas sin importar que tan bajo sea aplicado el esfuerzo. Supuestamente, el comportamiento de fatiga de cada material puede gobernar las funciones del ferrocemento. Solamente la flexión ha sido estudiada en reportes publicados.

4.5.1 FATIGA DE FLEXION.

Investigaciones del comportamiento de fatiga del ferrocemento en flexión han empleado varias formas de carga, incorporando aplicaciones de punto central o tres puntos de carga no reversible o completamente reversible a razón de 1-30 ciclos por segundo. Mientras cuatro de los cinco estudios concluyeron que el comportamiento de fatiga del compuesto de ferrocemento depende directamente del comportamiento de fatiga del refuerzo de acero, el quinto estudio anota muy específicamente que el refuerzo (malla soldada cuadrada) no se debilita por fatiga sino por una fractura extensible normal y que la falla fue causada por incapacidad del mortero para resistir la desintegración y el astillamiento. El punto de vista mayori-

tario de que el funcionamiento del ferrocemento es gobernado principalmente por el comportamiento de fatiga del refuerzo, recibe apoyo de una relación desarrollada usando refuerzos de malla soldada y entrelazada que demuestra que el comportamiento de fatiga del ferrocemento en flexión es casi idéntico al comportamiento de segmentos de acero del refuerzo en tensión. (fig. 4.9). Si éste es el caso, selección de refuerzo para el funcionamiento óptimo bajo carga de fatiga puede ser influido por consideraciones muy diferentes de aquellas previamente propuestas para carga estática. Por ejemplo, mientras que la malla soldada puede ser mejor que la malla entrelazada para carga estática, la malla entrelazada puede ser preferible para carga de fatiga porque ha sido demostrado que el comportamiento de fatiga de la malla soldada está influida por el grado de concentración geométrica de esfuerzos inducidos durante el momento de soldar y por el método aplicado al hacer las soldaduras. Observaciones realizadas confirman que con pocas excepciones la falla en el refuerzo ocurre predominantemente en las soldaduras. En el caso de mallas de metal expandido la falla ocurre predominantemente en los nudos o articulaciones. Aparentemente, la malla hexagonal no exhibe regiones de falla preferencial y puede ofrecer ventajas similares a la malla entrelazada. En general, el comportamiento de fatiga del acero hace pensar que todos los factores que influyen en la naturaleza y calidad del acabado de la superficie del refuerzo, por ejemplo, el acero galvanizado, puede afectar en alguna forma el funcionamiento del refuerzo.

Por ser costumbre examinar el comportamiento de fatiga en términos de relación S - N (aplicación de esfuerzos versus número de ciclos de falla) los datos disponibles y comparables se presentan en esta forma (Fig.

4.10) Esto aclara que de las muchas variables involucradas, la naturaleza de la carga es de gran importancia. Esto refleja el significado conocido de rango de esfuerzo en el comportamiento de fatiga de muchos materiales. Otras diferencias, tales como el aparente ritmo más rápido de fatiga utilizando malla de metal expandido o el posible efecto adverso de galvanizar son menos definidos (Fig. 4.10) y pueden aplicarse solamente a los datos particulares demostrado.

La mayoría de investigadores han observado un incremento gradual en la deflexión, una disminución en la rigidez y un incremento en el ancho de grieta promedio con cargas de ciclos repetidos. Un ritmo más rápido de incremento en la deflexión y en el ancho de grieta precede a la falla y se han desarrollado ecuaciones que predicen el crecimiento de ambos parámetros para el ferrocemento reforzado con malla cuadrada soldadas o con malla entrelazada.

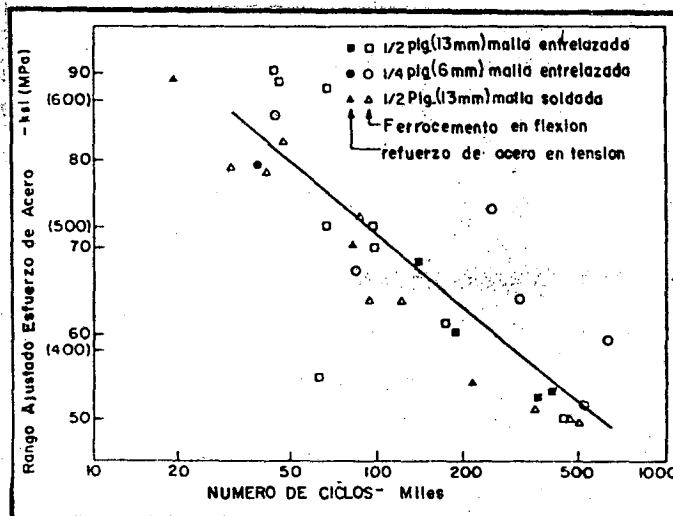


Fig. 4.9 Comparación de el comportamiento del ferrocemento a fatiga en flexión. Con el comportamiento de mallas de alambre para refuerzo en tensión, basado en rangos ajustados a esfuerzos bajo cero. Referencia 54

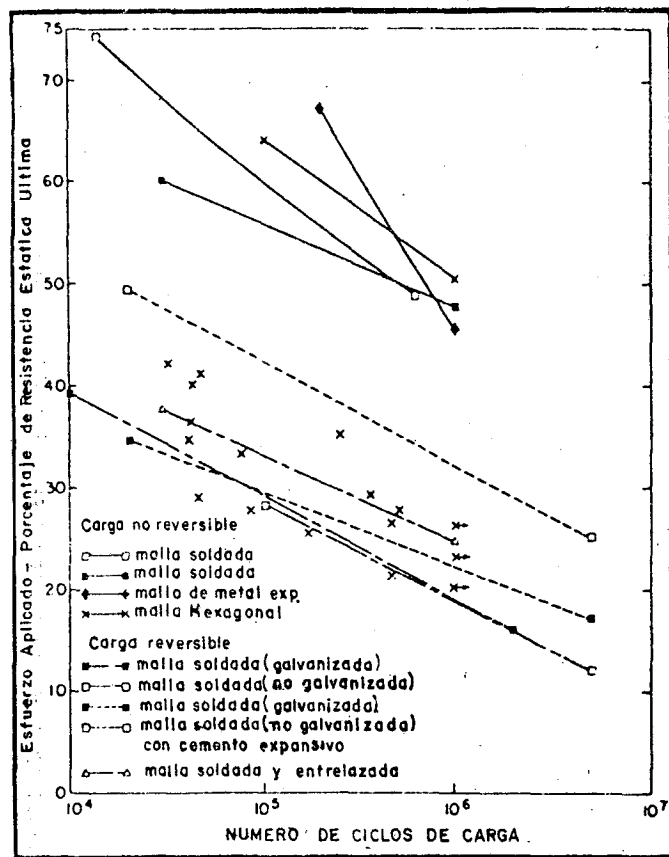


Fig. 4-10 S-N Relación para ferrocemento en flexión. Referencia 50, 52, 53, 54

4.6 RESISTENCIA DE IMPACTO.

Son numerosos los reportes afirmando las características favorables del ferrocemento en colisiones entre botes o con rocas. Los principales atributos parecen ser la resistencia a la desintegración, la facilidad de localización de daños y de reparación. Sin embargo, existen pocos datos cuantitativos o comparativos en vista de la complejidad experimental asociada con la medida de la resistencia de impacto. Las pruebas de impacto en paneles indican que la severidad del agrietamiento varía significativamente con el tipo de refuerzo, pero los parámetros fundamentales no están establecidos. Las pruebas que usan péndulos balísticos para producir

el impacto y chorros de agua a través del elemento, dan evaluaciones de los daños, demuestran que el daño disminuye conforme aumenta la resistencia y la superficie específica del refuerzo de la malla. Sin embargo, en la actualidad la información disponible es insuficiente para indicar que constituye un sistema óptimo de refuerzo desde el punto de vista de la resistencia de impacto. Los factores que influyen en la resistencia de la primera grieta tales como tipo, geometría y superficie específica del refuerzo son probablemente de importancia fundamental.

4.7 DESARROLLO DE GRIETAS Y FILTRACIONES.

En esta sección el desarrollo de grietas es considerado en términos de espaciamiento y ancho promedio y máximo. Para sistemas reforzados con malla, el espaciamiento promedio de grietas disminuye con la superficie específica que aumenta para la tensión y la flexión, a pesar de que otros factores tales como la geometría del refuerzo, también influye en el desarrollo de las grietas como se nota en la sección 4.3. En flexión, las medidas de la malla también son importantes, el espaciamiento promedio de la grieta corresponde muy cercanamente al espaciamiento transversal del alambre y el ancho promedio de la grieta se reduce mientras este espaciamiento disminuye. La relación entre el ancho de la grieta máxima o el ancho de la grieta promedio y el esfuerzo del acero en la capa de refuerzo de extrema tensión demuestra que el esfuerzo del acero equivalente a los anchos de grietas en el ferrocemento, son sustancialmente más pequeños que en el concreto reforzado convencional (fig. 4.11) para mallas del mismo tamaño los anchos de grietas son mas pequeños para los de tipo soldados que para la

variedad de entrelazadas. Desafortunadamente, no existen datos comparables para malla de metal expandido que, previamente, ha sido identificado con mayor resistencia a las grietas.

En aplicaciones relacionadas con almacenaje de líquidos (ver capítulo VI) el desarrollo de las grietas influyen directamente en las filtraciones. Experimentalmente ha sido demostrado que en tanques sujetos a presión de agua, los factores que reducen el ancho promedio de las grietas, generalmente, reducen la filtración. El límite de ancho promedio de grieta propuesto para el diseño en estas pruebas es 0.0015 pulgadas (0.04 mm) (presión hasta 100 psi (0.069 MPa) aunque los autores señalan que esto puede ser conservativo para diseños a más baja presión, por ejemplo, las estructuras sanitarias de ingeniería donde el diseño permitido de grietas para el concreto convencional es 0.004 pulgadas (0.1 mm.); (ACI 350 R), Polacos y Rusos sugieren un límite aún más bajo para la hermeticidad absoluta en el ferrocemento de 0.0008 pulgadas (0.02 mm) aunque, el límite asociado con la corrosión del refuerzo es: 0.002 - 0.004 pulgadas (0.05 - 0.10 mm)

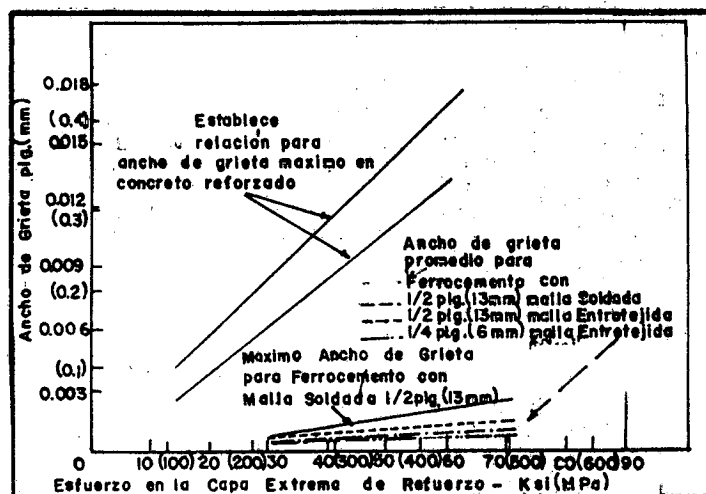


Fig. 4.11 Comparación de anchos de grietas en ferrocemento reforzado con malla y concreto reforzado en flexión. Referencia 37, 57

4.8 CONTRACCION Y FLUJO.

Ninguna literatura revisada hace referencia de datos cuantitativos, comparando las características de contracción y flujo de diferentes formas de ferrocemento. No obstante, no existe razón alguna para que los principios que rigen el comportamiento del concreto reforzado convencional no sean aplicados generalmente.

La contracción potencial del mortero (no contenido por el refuerzo) se rige grandemente por su contenido de agua, el cual, a su vez, está regido por la viabilidad requerida para la colocación, la graduación de la arena y la presencia de agregados tales como, puzolana, cal, agentes reductores de agua y conductores de aire, etc. De esta forma la selección de técnicas de colocación de baja viabilidad, tales como, las pistolas de presión o el tirado mecánicamente, la selección de una arena no excesivamente fina y el uso de agregados, puede reflejar un esfuerzo consistente hacia la reducción de la contracción del mortero como lo permitan las circunstancias. La actual contracción del ferrocemento también depende de la restricción ofrecida por el refuerzo, lo cual es una función de la fracción de volumen en la dirección considerada y, probablemente, otros factores previamente asociados con el desarrollo de las grietas, es decir, superficie específica, tipo de refuerzo y espaciamiento entre los alambres en las mallas.

Como la contracción, el deslizamiento del ferrocemento se puede esperar que sea una función del flujo potencial del mortero y la restricción ofrecida por el refuerzo. (condición restringida) De nuevo, bajo ciertos parámetros semejantes como fracción de volumen pasta/agregado y bajo una relación esfuerzo/resistencia, pueden arreglarse para disminuir el flujo

del mortero, mientras que el flujo del ferrocemento puede ser influido por factores como las fracciones de volumen del refuerzo en dirección de la carga.

4.9 DURABILIDAD.

Aunque las medidas requeridas para asegurar durabilidad en el concreto reforzado convencional (ACI, 201.2R) también se aplican al ferrocemento, existen otros tres factores que afectan la durabilidad y que son únicos para el ferrocemento.

Primero: la capa que cubre al refuerzo es normalmente pequeña, así que es relativamente fácil para líquidos corrosivos alcanzarla.

Segundo: El área de superficie del refuerzo es extraordinariamente alta, de esta forma el área de contacto sobre la que pueden tener lugar las reacciones de corrosión y la proporción resultante de corrosión son potencialmente altas.

Tercero: A pesar de que muchas formas de refuerzo usadas en ferrocemento son galvanizadas para prevenir la corrosión, la cubierta de zinc puede tener ciertos efectos adversos provenientes de la generación de burbujas de gas.

Estos tres factores asumen importancia variada dependiendo de la naturaleza de la condición de exposición. Sin embargo, a pesar de estos efectos únicos, no existe ningún reporte de corrosión seria del ferrocemento no asociada con la mala calidad del mortero y una compactación deficiente del mortero (ver sección 6.3) para asegurar la durabilidad adecuada en la mayoría de aplicaciones, se necesita un mortero completamente compacto, también es deseable una cubierta protectora. (ACI 515.1R)

4.9.1 DETERIORO ASOCIADO CON EL MORTERO .

Tal deterioro surge como consecuencia del contacto con líquidos que reaccionan con el cemento o por resultados de interrupción física inducida por enfriamiento o por desgaste de la superficie debido a la abrasión.

La reacción del líquido con la pasta de cemento se disminuye asegurando baja permeabilidad limitando la relación agua - cemento a 0.5. La permeabilidad de la pasta aumenta rápidamente arriba de este valor. El curado adecuado para maximizar la hidratación y la compactación efectiva para minimizar el aire atrapado también son útiles.

Para la condición relativamente común de exposición al agua de mar o agua subterránea donde la concentración de sulfato del agua excede de 150 ppm se puede obtener resistencia adicional al sulfato limitando la relación agua - cemento a 0.45 o menos (ACI 211.1), sin tomar en cuenta el tipo de cemento. De otra forma se recomienda usar cemento tipo II o cemento tipo V pues su contenido reducido de tricalcio de aluminio hace al cemento menos vulnerable al ataque por sulfatos de sodio o potasio. Sin embargo, el sulfato de magnesio, que ataca los hidratos del silicato tricálcico, presente en todas las pastas de cemento portland es mucho más peligroso que el sulfato de sodio o el sulfato de potasio. También, en los términos de la proporción rápida del deterioro inducido, la ineffectividad de cementos resistentes al sulfato, el sulfato de amonio es particularmente de gran valor. Para la intemperie al agua de mar, parece que limitar la relación agua-cemento es adecuado, puesto que muestras de varios paneles de ferrocemento hecho con cemento tipo I con relación agua - cemento de 0.35 a 0.45 han funcionado satisfactoriamente después de 350 ciclos de mojado y secado. Condiciones mas

severas de exposición pueden requerir cubiertas protectoras especiales.

El deterioro debido a cambios de temperatura (congelar-descongelar) se previene más efectivamente con la entrada adecuada de aire (cerca del 9% del volumen del mortero) un hecho bien establecido para el concreto y que se aplica igualmente al ferrocemento. El mantenimiento de la relación baja de agua cemento menor de 0.45, también se recomienda para la intemperie y a los cambios de temperatura. (congelar - descongelar) (ACI 211.1) A diferencia del concreto, la resistencia al cambio de temperatura del ferrocemento ha recibido muy poco estudio.

La resistencia a la abrasión se rige, principalmente, por la resistencia comprensiva del mortero que, a su vez, depende grandemente de la relación agua-cemento. Una vez más, la importancia de una relación agua-cemento baja es aparente. Sin embargo, las características de la arena pueden ser significativas, un alto contenido de sílice generalmente conduce a una mejor resistencia a la abrasión. Una disminución en la medida del agregado también tiene un efecto adverso en la resistencia a la abrasión y la cantidad del material, que pasa del tamiz número 50, se debe conservar lo más bajo posible.

4.9.2 DETERIORO ASOCIADO CON EL REFUERZO.

Tal deterioro puede surgir, el mortero se encuentra en los estados de agrietamiento o no agrietamiento.

Cuando el mortero no está agrietado, las formas de galvanizado del refuerzo no son esencialmente inertes.

La cubierta de zinc puede ser atacada por los alcalinos (hidróxido de calcio) en la pasta de cemento fresco. Un método efectivo para

inhibir la formación de hidrógeno es agregar cerca de 100 ppm. de trioxido de cromo al agua de la mezcla. Una vez colocado el mortero, la evolución del hidrógeno cesa; la cubierta de calcio formada, aparentemente, provee una protección al refuerzo y no tiene algún ataque después de la primera colocación. Una dificultad potencialmente mas seria es la corrosión del galvanizado que puede tener lugar cuando el acero galvanizado (malla) y el acero ordinario (barras de armadura) están en contacto por medio de soluciones electrolíticas presentes en el mortero.

Quando el mortero se agrieta, se facilitan otras formas de deterioro, puesto que el acceso al agua o líquidos corrosivos al acero se hace más fácil. En las secciones 4.7 y 5.8 se hace referencia al diseño máximo de ancho de grietas basado en condiciones de servicio. El ancho adecuado de grieta permisible para cualquier condición de servicio particular depende probablemente de la medida molecular del líquido de penetración y la presión a que está actuando.

4.10 RESISTENCIA AL FUEGO.

Sin tomar en cuenta si el mortero está agrietado o no, un problema único para el ferrocemento es su resistencia pobre al fuego, a causa de la delgadez inherente de sus formas estructurales y por la cubierta normalmente delgada dada al refuerzo. En algunas mallas de refuerzo, la presencia de soldaduras que se funden a una temperatura significativamente más bajas que el refuerzo mismo, también pueden reducir la resistencia al fuego. No existe ninguna evidencia en la literatura sobre pruebas de fuego que se hayan realizado en el ferrocemento.

CAPITULO V

CRITERIOS DE FUNCIONAMIENTO

5.1 INTRODUCCION.

Cualquier recomendación de diseño para estructuras de ferrocemento debe estar basada en un análisis racional apoyado por resultados de pruebas. Sin embargo, en vista del estado actual del conocimiento del ferrocemento y excepto para aplicaciones especiales donde pueda ser necesario un análisis exacto para garantizar la seguridad del funcionamiento, el comité cree que los siguientes lineamientos para el ferrocemento hecho con mortero simple (plano sencillo) y mallas cuadradas conducirán el funcionamiento satisfactorio. Estos lineamientos han sido derivados de los análisis de numerosos datos de pruebas, de recomendaciones hechas por ingenieros practicantes y de algunas especificaciones usadas para la construcción de barcos. (ACI 318, ACI 350R, y referencias, 31, 32, 33, 35, 37, 38, 43, 50, 51, 57).

5.2 METODOS DE DISEÑO

Para pronosticar el comportamiento del ferrocemento bajo condiciones de servicio, se acepta un análisis elástico similar a aquel diseño de esfuerzos de trabajo del concreto reforzado, teniendo en cuenta que el módulo del sistema de la malla de acero (que puede ser diferente del módulo del alambre de acero descrito en la sección 5.3) es el considerado. La carga última también puede ser pronosticada para miembros flexionantes, analizando el ferrocemento como un miembro de concreto reforzado utilizando el método de diseño de cargas últimas. (ACI 318). Puesto que el ferrocemento tiene varias capas de refuerzo de malla, también se sugiere un análisis similar a aquel de columnas en flexión pura. Para miembros a tensión, la carga última puede ser aproximada por la capacidad de resistencia de carga de la malla de refuerzo solamente en la dirección de la carga.

5.3 DEFINICIONES.

Dos parámetros de refuerzo importantes son, comunmente, usados al caracterizar al ferrocemento y son definidos como:

V_f - Fracción de volumen de refuerzo. Es el volumen total de refuerzo por unidad de volumen de compuesto. Para un compuesto reforzado con malla cuadrada, V_f , es igualmente dividido entre V_{f1} y V_{ft} para dirección longitudinal y transversal, respectivamente.

S_R - Superficie específica del refuerzo. Es el área total depositada de refuerzo (área de contacto) por unidad de volumen de compuesto. Para un compuesto utilizando mallas cuadradas, S_R se divide entre S_{RL} y S_{RT} en la dirección longitudinal y transversal respectivamente. La relación entre S_R y V_f cuando se usan mallas de alambre es:

$$S_R = \frac{4 V_f}{d_b}$$

donde d_b es el diámetro del alambre.

Aunque las definiciones de la mayoría de las propiedades de los componentes del ferrocemento son las mismas que para el concreto reforzado, una propiedad definida aquí como el módulo efectivo para el sistema de refuerzo, E_R , necesita algunas aclaraciones. Esto es porque el módulo de una malla (acero u otro) no es necesariamente el mismo, como el módulo elástico del filamento (alambre u otro) del cual está hecho. En una malla tejida de acero, el acero impone a los alambres un perfil ondulado. Cuando se prueba en tensión, la malla tejida hecha de estos alambres se estrechará más que una malla soldada similar hecha de alambres rectos. (todo lo demás sera lo mismo) Por lo tanto, la malla tejida se comporta como si tuviera un módulo elástico más pequeño que el de los alambres de acero de que está hecha. Además, cuando una malla tejida está encajada en un mortero y tiende a ende-

rezarse bajo tensión, la presencia del mortero resiste a tal enderezamiento y conduce a una forma de tensión de rigidez. Para contar con los efectos mencionados, se usa el término 'módulo aparente del sistema de refuerzo', E_R . Usado para mallas de acero soldadas, E_R puede ser tomado igual al módulo elástico de los alambres de acero; para otras mallas, E_R puede ser determinado por las pruebas de tensión en el compuesto del ferrocemento.

5.4 ESFUERZOS DE TENSION PERMISIBLES.

El esfuerzo a tensión permitido en el refuerzo de acero puede ser generalmente tomado como $0.60 f_y$, donde f_y es la resistencia producida y medida en esfuerzos a 0.0035, sin embargo, para retención de líquidos y estructuras sanitarias es preferible limitar el esfuerzo de tensión a 30 Ksi (207 MPa) a menos que la medida del ancho de la grieta en un modelo de prueba indique que un esfuerzo más alto no perjudicará el funcionamiento. Los valores arriba mencionados permanecen con tal que el tejido del sistema de malla sea ordenado moderadamente para asegurar un módulo efectivo y adecuado.

5.5 ESFUERZO DE COMPRESION PERMISIBLE.

El esfuerzo compresivo permitido en el compuesto puede ser tomado como $0.45 f'_c$ donde f'_c es la resistencia compresiva específica del mortero en pruebas con cilindros de 3 x 6 pulgadas (76 x 152 mm).

5.6 FRACCION DE VOLUMEN Y SUPERFICIE ESPECIFICA DEL REFUERZO.

La fracción de volumen total de refuerzo, V_f , en ambas direcciones no debe ser menor que 1.8 por ciento. La superficie específica total de refuerzo, S_R , en ambas direcciones, no debe ser menor que 2 pulgadas²/pulgadas³. (0.08 mm²/mm³) Estos valores son recomendados cerca de dos veces para estructuras retenedoras de agua. Al determinar la superficie específi-

ca del refuerzo, se puede hacer caso omiso de cualquier estructura de acero, * pero debe considerarse al computar V_f .

Se recomienda provisionalmente que para un material de ferrocemento (sin estructura de refuerzo)* de espesor t , que la abertura de malla recomendada; S , no sea mayor que t . Más aún, el número de capas de malla N , preferiblemente, debe ser:

$$\begin{aligned} N &\geq 4 t && \text{donde } t \text{ sea en pulgadas} \\ N &\geq 0.16 t && \text{donde } t \text{ sea en milímetros} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Si se usa una estructura de refuerzo* se recomienda que la misma estructura de refuerzo no ocupe más del 50 por ciento del grosor del material de ferrocemento. Llamando t' espesor en que se distribuyen las mallas, el número de capas de mallas debe ser preferiblemente:

$$\begin{aligned} N &\geq 4 t' && \text{donde } t' \text{ sea en pulgadas} \\ N &\geq 0.16 t' && \text{donde } t' \text{ sea en milímetros} \end{aligned} \quad (5.3)$$

5.7 REQUISITOS PARA EL RECUBRIMIENTO..

El promedio recomendado para el recubrimiento del refuerzo es 1/12 pulgada (2 mm) Sin embargo, se puede utilizar un valor más bajo con tal que el refuerzo sea galvanizado, la superficie esté protegida por un recubrimiento adecuado y que el ancho de agrietamiento esté limitado (ver sección 5.8). También, se recomienda que para espesores mayores de 1/2 pulgada

* Armadura de barras rigidizantes.

(12 mm) el recubrimiento no debe exceder de 1/5 (t), ni 3/16 pulgadas (5 mm) el que sea menor para asegurar la distribución adecuada de la malla a través del espesor.

5.8 LIMITACIONES DE ANCHOS DE GRIETAS.

Se recomienda que el valor máximo del ancho de grieta sea menor que 0.004 pulgadas (0.10 mm) para medios no corrosivos y 0.002 pulgadas (0.05 mm) para medios corrosivos y/o estructuras retenedoras de agua.

5.9 PRONOSTICO DE ANCHOS Y ESPACIAMIENTOS DE GRIETAS.

El ancho máximo de grieta para refuerzo de malla cuadrada solamente en miembros flexionados puede ser pronosticado como primera aproximación usando la ecuación:

$$W_{\max} \approx \epsilon_s S \beta = \frac{f_s}{E_R} S \beta \quad (5-4)$$

Donde

ϵ_s = deformación en capa de acero más cercana a la superficie

f_s = esfuerzo en la capa de acero más cercana a la superficie

S = tamaño de la abertura de la malla

β = relación de distancias al eje neutro de la fibra extrema a tensión y de la capa de acero más cercana a la superficie.

E_R = módulo efectivo del sistema de refuerzo

(Nota: $E_R = E_s \approx 29 \times 10^6$ psi (203×10^3 MPa) para malla soldada;

E_R puede variar de 15 a 25×10^6 psi (105 a 175 MPa) para mallas entrelazadas dependiendo de la forma del tejido como se observó en

varias pruebas). La ecuación (5-4) es válida para cualquier sistema de unidades. Está basada en la observación que el espaciamiento

promedio de grieta en flexión es aproximadamente igual al tamaño de la abertura de la malla (o espaciamento de alambres transversales) y se encontró que representa una mayor relación con datos observados sobre anchos de grieta promedio.

En datos experimentales sobre agrietamiento de ferrocemento reforzado con diferentes cantidades de mallas cuadradas con espaciamento del alambre de 1/2 pulgada (12 mm) y 1/4 pulgada (6 mm) han conducido a la siguiente ecuación de regresión lineal dando un ancho máximo de grieta en flexión como una función de f_s :

$$W_{\max} = (0.324 f_s - 4.36) \frac{23\ 000}{E_R} 10^{-4} \quad (5-5)$$

donde el ancho de grieta está en unidades de pulgadas y f_s y E_R en Ksi.

Si se usa el sistema métrico, la ecuación arriba expuesta, sería:

$$W_{\max} = (1.194 f_s - 111) \frac{15.85}{E_R} \quad (5-6)$$

donde W_{\max} está en milímetros, f_s y E_R en MPa.

Para pronosticar el ancho de grieta máximo en miembros de ferrocemento en tensión (y hasta que se tenga más información exacta disponible) el siguiente procedimiento conservador se puede seguir, suponiendo que el esfuerzo en el acero es menor que el límite de elasticidad y en cualquier caso menor que 60 Ksi (414 MPa):

$$\text{para } f_s \leq 20 S_{RL}$$

$$W_{\max} = \frac{20}{E_R} \quad (5-7)$$

donde W_{\max} está dado en pulgadas, S_{RL} es la superficie específica de refuerzo en la dirección de la carga en pulgadas⁻¹, f_s en Ksi y E_R en Ksi.

$$\text{Para } f_s > 20 S_{RL}$$

$$W_{\max} = 10^{-4} \left[6.9 + (f_s - 20 S_{RL}) \right] \frac{29,000}{E_R} \quad (5-8)$$

Si se utiliza el sistema métrico, las ecuaciones anteriores conducen a lo siguiente:

$$\text{Para } f_s \leq 345 S_{RL}$$

$$W_{\max} = \frac{35,000}{E_R} \quad (5-9)$$

donde f_s está en MPa / m², S_{RL} en cm⁻¹, W_{\max} en mm y E_R en MPa:

$$\text{Para } f_s > 345 S_{RL}$$

$$W_{\max} = \frac{20}{E_R} \left[175 + 3.69 (f_s - 345 S_{RL}) \right] \quad (5-10)$$

5.10 RANGOS DE ESFUERZOS.

Para que las estructuras de ferrocemento sostengan un mínimo de vida de dos millones de ciclos, el rango de esfuerzo en el acero debe ser limitado a $f_{sr} = 30$ Ksi (207 MPa). Se puede usar un valor de 36 Ksi (348 MPa) para un millón de ciclos y 55 Ksi (380 MPa) para 100,000 ciclos.

5.11 DURABILIDAD.

Para mejorar la durabilidad y la resistencia a la corrosión del ferrocemento, se hacen las siguientes recomendaciones:

1. Para uso en condiciones con cambios de temperatura severas, el mortero debe contener aproximadamente 9% de aire. Este requisito se aplica a barcos de ferrocemento que podrían ser operados en condiciones de océanos helados.
2. Si se usan cubiertas de concreto para proporcionar protección contra la corrosión, su efectividad por el tiempo debe ser probada en ensayos que simulen condiciones de servicio.
3. Si se usan aditivos en el ferrocemento, sus efectos sobre la corrosión, es decir sobre la resistencia a la corrosión del material debe ser evaluadas. El cloruro de calcio y la arena contaminada de sal, no deben ser usados en el ferrocemento.
4. Hasta que se desarrollen más pruebas específicas para evaluar la durabilidad y la resistencia a la corrosión de las pruebas AASHTO T259 y T260 como modelos con modificaciones adecuadas.
5. Hasta que los resultados de las pruebas sugieran otra cosa, las estructuras de ferrocemento sujetas a medios corrosivos, deben usar mallas galvanizadas y deben ser pintadas con una pintura o cubierta adecuada.

CAPITULO VI

APLICACIONES DEL FERROCEMENTO

6.1 INTRODUCCION.

El ferrocemento ha sido usado para construir barcos, silos, tejados y tanques. Sin embargo, la construcción de barcos, ha proporcionado, hasta ahora, más información sobre técnicas de construcción y serviciabilidad que otras aplicaciones estructurales. El conocimiento ganado de la construcción de barcos con ferrocemento puede ser aplicado a la construcción de estructuras en tierra firme.

6.2 - BARCOS.

Los barcos han sido construídos con ferrocemento en casi todos los países del mundo. Se da alguna idea sobre la extensión de la construcción de barcos con ferrocemento en la Referencia 73, que enumera la construcción de barcos en los países de la región pacífico-asiática. La República Popular China es el único país donde los barcos de ferrocemento han sido introducidos en gran escala. En otros países, el ferrocemento ocupa una fracción de un porcentaje del total del mercado de construcción de barcos.

La construcción de barcos con ferrocemento ha sido encontrada atractiva para muchos países desarrollados industrialmente porque: (a) Sus materiales básicos están disponibles en la mayoría de países, (b) puede ser fabricado en casi cualquier forma y el diseño tradicional puede ser reproducido o mejorado, (c) es más durable que la mayoría de maderas y más económico que el acero importado, (d) fácilmente se puede adquirir la destreza para la construcción del ferrocemento, (e) la construcción con ferrocemento

requiere menor capital y si un trabajo más intensivo y (f) excepto para diseños sofisticados y altamente sometidos a esfuerzos tales como depósitos profundos para agua, un supervisor entrenado puede llevar a cabo el control de calidad requerido, realizando un trabajo que no requiere mayor especialización.

El ferrocemento es un material relativamente pesado comparado con la madera y el plástico reforzado con fibra. La mayoría de barcos de madera con menos de 10 m. (33 pies) de largo están contruídos con un espesor de 25 mm. (1 pulgada) Para obtener el mismo peso del casco, el ferrocemento tendría que ser solamente de 8 mm. (0.3 pulgadas) de espesor. Aunque los barcos pequeños de ferrocemento han sido contruídos de este espesor, la resistencia de impacto correspondiente no es suficiente para barcos de trabajo usados en la pesca o para el transporte. En su etapa actual de desarrollo, el ferrocemento ha probado más adaptabilidad para barcos de más 10 m. (33 pies) Aún para tamaños mayores un barco de ferrocemento será más pesado que un barco de madera, pero esto es una pequeña desventaja pues limita su operación a una velocidad moderada. (entre 6.5 y 10 nudos)

Los barcos contruídos en China parecen combinar todas las características favorables de la construcción del ferrocemento. Estos barcos tienen una longitud de 15 m. (49 pies) con una capacidad de 10 toneladas de carga. Son maniobrados mecánicamente y de esta forma operados a una velocidad moderada. Los barcos son contruídos en gran escala en una factoría utilizando técnicas de producción en masa tales como el uso de tabiques de ferrocemento prefabricadas con que se divide el interior de un barco y marcos que dan for-

ma albarco y se convierten en parte integral de la estructura final. Estos tipos de embarcaciones de ferrocemento utilizados en China son diseñados para uso en aguas tranquilas (ríos y canales) y por ello no requieren especificaciones de diseño estrictas como para los depósitos que contienen agua.

6.3 EVALUACION DE SERVICIOS DE BARCO DE FERROCEMENTO.

Los barcos de ferrocemento han estado en servicio en gran número en los últimos años. Muchos de estos barcos no fueron construidos de acuerdo a especificaciones bien definidas. Se han hecho muy pocos esfuerzos sistemáticos para registrar fallas y problemas de mantenimiento. De esta forma es difícil comentar racional e inequívocamente el funcionamiento del ferrocemento en los barcos que han sido construidos. No obstante, se han hecho intentos para evaluar las condiciones de algunas embarcaciones de ferrocemento existentes. Los barcos de ferrocemento para pesca construidos en Nueva Zelanda han sido examinados por el Departamento de Marina de Nueva Zelanda y los resultados de este examen son reportados en la referencia 72. La experiencia de 300 embarcaciones construidas comercialmente en más de 20 países ha sido analizada en la referencia 73. Sutherland describe su experiencia personal con aproximadamente 80 barcos que han estado en servicios por más de 10 años. De estos reportes, existe clara evidencia de que el ferrocemento puede ser utilizado muy satisfactoriamente en la construcción de barcos. Sin embargo, las siguientes áreas de problema son valiosas.

1. La aplicación y penetración del mortero parecen ser el problema más grande en la construcción de barcos con ferrocemento. Muchos defectos y fallas pueden ser atribuidos a aplicaciones inadecuadas del mortero. En algunas ocasiones en que el daño al caso ha revelado corrosión del acero,

fue debido a la presencia de vacíos. No se encontró ninguna corrosión en mortero de buena consistencia.

2. La carencia de resistencia al impacto y a perforaciones parecen ser las causas más comunes del daño en depósitos de ferrocemento. Aunque la reparación del área dañada no es complicada, la frecuencia y molestia de reparar el daño se ha reportado comunmente por muchos pescadores que usan barcos de ferrocemento.
3. Las fallas en la pintura parecen ser frecuentes y ninguna fórmula simple de pintura parece dar los resultados satisfactorios de longevidad consistente.

6.4 SILOS.

En la mayoría de países en desarrollo existen facilidades inadecuadas de almacenajes de granos para granjas y aldeas. Se ha reportado que más de 25% del arroz se ha perdido por los pájaros, la fumigación, los roedores y los insectos en Thailandia. Los silos de ferrocemento para almacenar hasta 30 toneladas de granos parecen ser muy adecuados y económicos para países en desarrollo. El ferrocemento es hermético al agua y con impermeabilizantes adecuados puede serlo al aire. En el ferrocemento hermético al aire, los microorganismos no pueden sobrevivir para dañar el producto almacenado.

La Applied Scientific Research Corporation de Thailandia ha desarrollado silos económicos, herméticos al aire que pueden contener hasta 10 toneladas de grano, otros alimentos, fertilizantes, cemento, pesticidas, o hasta 5000 galones de agua para beber. La base del silo es de forma de salsera y consiste de dos capas de 50 mm (2 pulgadas) de espesor, concreto reforzado con malla con un sello de asfalto entre las dos capas. La forma

de estos silos es cónica. Las paredes curvas van por el interior hacia una entrada central con una salida (escotilla) hacia arriba que elimina la necesidad de un techo para la estructura.

En Etiopía, los pozos subterráneos son el método tradicional de almacenaje de granos. Se ha encontrado que cuando el pozo tradicional está construido con ferrocemento y se le ha proporcionado hermeticidad al aire, se puede esperar una cámara hermética de almacenaje.

En la India se han desarrollado, analizado y probado cajas de ferrocemento de pequeña capacidad. (hasta 3 ton.). Las unidades son en forma cilíndrica (1.20 m (3.9 pies) de diámetro) y son prefabricadas con alturas de 1.00 m. (3 pies) Las cajas se probaron con trigo en un laboratorio, para asegurar la eficiencia del ferrocemento al transmitir las cargas en las paredes de la caja. También fueron probadas en el campo para juzgar su efectividad contra los insectos. Un cálculo de costo del ferrocemento, es decir de las cajas, demuestra que son menos caras que las de acero reforzado o aluminio.

6.5 TANQUES.

Los comentarios hechos antes sobre la necesidad de países en desarrollo para almacenar granos se aplican igualmente al almacenaje de líquidos para beber. Por esto el ferrocemento también ha sido estudiado en países en desarrollo para su uso en tanques de agua.

Los tanques de ferrocemento son de un material atractivo para el almacenaje de agua en países desarrollados industrialmente también. Tanques pequeños de ferrocemento de menos de 5000 galones de capacidad (20,000 litros)

se están construyendo por mayor en Nueva Zelanda. Un estudio de viabilidad llegó a la conclusión que los tanques de ferrocemento son de menor costo que los tanques de acero o fibra de vidrio. Para el almacenaje de agua calentada con energía solar, se requirieron tanques con capacidad total aproximada de 160,000 galones (600,000 litros) para un diseño propuesto por un nuevo Centro de Educación de ciencia física para el Science Museum of Virginia en Richmon, Virginia. Un estudio de viabilidad fue conducido para determinar si habían algunas ventajas para usar el ferrocemento en lugar de el acero o fibra de vidrio para la construcción de estos tanques. Los resultados de este estudio de factibilidad, incluyendo el diseño detallado, métodos de construcción y bosquejos para los tanques de ferrocemento son dados en el reporte final rendido por el Science Museum of Virginia a la Administración de Energía, Búsqueda y Desarrollo de Estados Unidos. Las siguientes son las conclusiones basadas en el estudio:

1. El ferrocemento es un material viable económico para la construcción de tanques para almacenaje de agua para almacenar energía concentrada por un sistema solar.
2. La flexibilidad de forma, libertad para corrosión, posibilidad de almacenaje caliente, relativa ausencia de mantenimiento y modo dúctil de debilitamiento son ventajas importantes del ferrocemento sobre otros materiales comunmente usados para presiones de bajas a medianas (hasta 50 psi (3.45 KPa) de almacenaje de fluídos.
3. La fabricación de tanques de ferrocemento requieren menos energía que los tanques de acero:

6.6 TECHOS.

En países en desarrollo existe una necesidad urgente por un material económico para construir techos de viviendas simples. Es posible construir paredes y techos de vivienda con materiales locales. Sin embargo, los intentos hechos en el pasado para fabricar (de materiales locales) techos que sean económicos, durables y resistentes al fuego, insectos, inundaciones y terremotos, no han sido exitosos. Como resultado, muchos países en desarrollo importan láminas de hierro galvanizado o utilizan láminas de cemento y asbesto. Estos dos materiales para techos pueden costar como el 60% del precio total de una casa. El ferrocemento parece ser un material económico alternativo para los techos. Las ventajas descritas anteriormente para el ferrocemento en los barcos son igualmente aplicables para techos. El material para techo de ferrocemento puede ser producido en masa en forma prefabricada, en un proceso que se acomoda mejor a las demandas del área urbana o también puede ser fabricado en los propios poblados o aldeas.

El éxito del ferrocemento como auto-ayuda para la construcción de casas está bien documentado en las Referencias 71 y 80, donde se describe la construcción de cientos de techos de ferrocemento para las áreas más pobres de México. Muchos de estos techos de ferrocemento se les dio forma de cúpula con luces de 3-6m (10-20 pies). A las cúpulas se les dio forma con barra de refuerzo que fueron atadas a las paredes. La construcción del techo no requiere equipo mecánico.

En Italia han sido construídos techos muy grandes de ferrocemento. Un diseño y construcción reciente de seis cubiertas de ferrocemento para un techo, para proteger animales, está descrito en la Referencia 81. Los techos

tienen una envergadura de 17 metros (56 pies) y un espesor de 30 mm (1 pulgada).

Debido a los esfuerzos producidos por carga muerta esta es crítica en el diseño de techos, las cubiertas delgadas de ferrocemento son económicas para estructuras de techos.

El Building Research Institute, State Engineering Corporation, Colombo, Sri Lanka ha desarrollado y probado láminas corrugadas de ferrocemento. Estas láminas son desarrolladas como reemplazo a los de cemento-asbesto corrugado que son ampliamente utilizados como material para techos. Se ha reportado que las láminas de ferrocemento son menos caras y requieren menos capital de inversión y menos importaciones. Estas láminas de ferrocemento están diseñadas de tal forma que su peso, dimensiones y capacidades de conducción de carga son similares a las de cemento-asbesto. Además, se ha observado que las láminas de ferrocemento son más dúctiles que los de asbesto. De esta forma, y porque el suministro de fibras de asbesto está limitado y pueden ser cancerígeno, el ferrocemento puede ser el repuesto a reemplazo más adecuado.

6.7 RESUMEN.

El amplio uso del ferrocemento ha empezado hace dos décadas. Además de las aplicaciones mencionadas brevemente aquí, se están explorando muchos otros usos del ferrocemento como un material estructural por todo el mundo. Estos incluyen: formas permanentes para construcción de concreto convencional, digestores de biogas, pisos, piscinas, depósitos de agua y pequeños puentes y alcantarillas. Aunque la información de diseño adecuado y la

experiencia en el campo han sido adquiridas para muchos tipos de estructuras de ferrocemento, la futura expansión de construcciones de ferrocemento dependerá, principalmente, de consideraciones económicas.

Si el ferrocemento puede competir económicamente con otros materiales, depende del tipo y país de aplicación. No es posible hacer ninguna conclusión general acerca de la viabilidad económica de la construcción con ferrocemento pues su costo puede variar significativamente de un país a otro y dependerá del método de fabricación y por muchos otros parámetros económicos.

Para países en vías de desarrollo donde el costo de materiales es relativamente más alto que el costo de la labor parecen especialmente atractivas algunas aplicaciones del ferrocemento. Esto incluye barcos, silos, tanques y techos. Para países desarrollados industrialmente, el ferrocemento parece económico para tanques de almacenaje de mediana medida, algunos tipos de construcción de techos con formas complicadas y donde su peso más leve puede ser explotado con seguridad.

CAPITULO VII

NECESIDADES DE INVESTIGACION

7.1 INTRODUCCION.

La paradoja asociada con el ferrocemento es que es la forma más vieja y más nueva de concreto reforzado y, por eso, las necesidades de investigación comprende aquellas comunes o convencionales de concreto reforzado y aquellas peculiares del ferrocemento.

7.2 Ambito de necesidades de investigación.

Las características más deseables del ferrocemento están relacionadas con la distribución y subdivisión del refuerzo a través del mortero. Pero, en qué punto en la subdivisión es el ferrocemento otra forma de concreto reforzado? Se han hecho intentos para poner límites más bajos sobre la superficie específica o porcentaje de volumen del refuerzo que establecerían el límite entre ferrocemento y concreto reforzado. Pero tales esfuerzos podrían ser equivocados pues las características del ferrocemento son una función continua del grado de subdivisión del refuerzo. El asunto se hace aún más complejo cuando se reconoce que el refuerzo puede tomar la forma de barras de refuerzo usadas en combinación con malla de elementos relativamente pequeños de diámetro. Más aún, como la definición de una tensión permisible podría de hecho estar relacionada con un ancho de agrietamiento permisible que depende del grado de dispersión del refuerzo. Podríamos enfrentarnos con el dilema de tener tensiones relacionadas con la manera en que se dispersa el refuerzo. Sin duda, las tensiones permisibles pueden estar también relacionadas al tipo de aplicación (tanques, elementos de techos, paneles, etc.) y el tipo de refuerzo (Resistencia, dúctil o alta).

La anterior discusión enfatiza el hecho de que las necesidades principales de investigación en el ferrocemento continuarán siendo el área de entendimiento del mecanismo fundamental donde el refuerzo y el mortero interactúan para distribuir tensiones, mejorar la resistencia a la primera grieta y controlar el tamaño y espaciamiento de las grietas.

7.3 Necesidades de investigación específica

Aunque existe un campo bastante extenso de actividades de investigación, se mencionarán unas pocas áreas especiales que parecen importantes para el desarrollo completo del ferrocemento. Estas se refieren a resistencia del impacto, corrosión, fuerza compresiva con varios tipos de mallas y fuerza bajo condiciones de carga multiaxial.

No existen datos de pruebas sobre resistencia de corte. El corte es importante cuando el ferrocemento es utilizado como paneles de pared o particiones en estructuras sujetas a fuerzas debidas al viento o a cargas de sismos.

Se necesitan pruebas para condiciones de carga combinada tales como corte y flexión, tensión o compresión. Un ejemplo es el uso del ferrocemento para elementos de revestimiento de techos en tramos largos de construcción de peso leve donde el corte y los esfuerzos son importantes.

En la actualidad no existen pruebas disponibles sobre la resistencia al fuego (del ferrocemento). Los requisitos para concretos reforzados que alcancen proporciones mínimas de fuego, no pueden ser aplicados al ferrocemento. Frecuentemente, esto obstaculiza su uso por arquitectos e ingenieros que deben, cuando sea adecuado, asegurar una franquicia al oficial constructor.

Los criterios sobre funcionamiento tales como los propuestos en el capítulo 5 para malla rectangular deben ser desarrollados para otros tipos de refuerzo con malla.

El funcionamiento del ferrocemento depende grandemente de las características de la malla de refuerzo. Existe una necesidad para determinar y especificar una cantidad óptima de propiedades para la malla tales como la abertura de malla, diámetro de los alambres y las características de tensión del sistema de malla. Sistemas nuevos de malla y montajes pueden ser específicamente designados para aplicaciones al ferrocemento. Parece que los nuevos desarrollos en el sistema de malla rendirán ferrocemento competitivo en todas las aplicaciones donde se usen elementos finos.

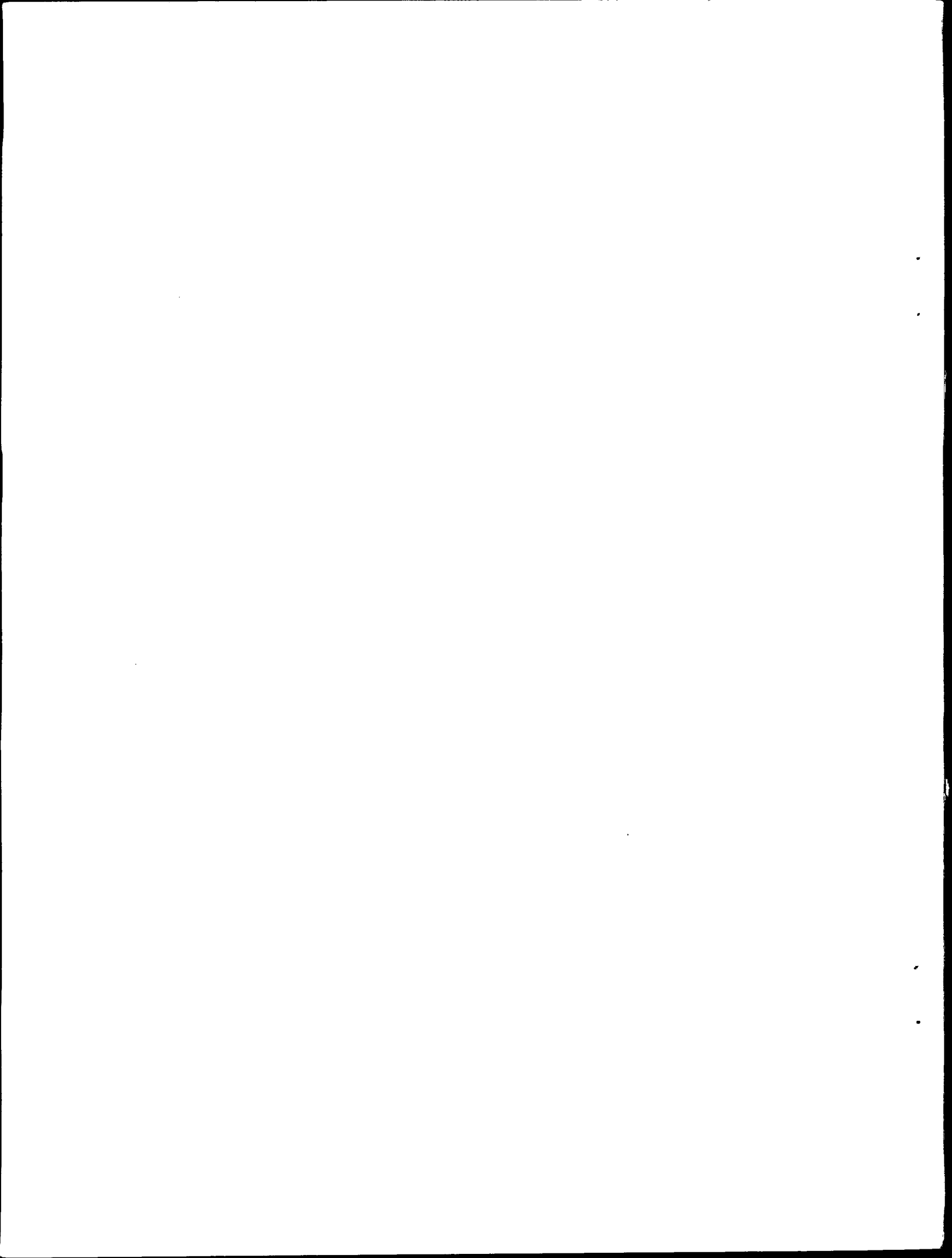
Se necesitan sellos durables y efectivos para el ferrocemento, especialmente en aplicaciones marítimas, para prevenir la penetración de agua y sales que pueden conducir a la corrosión de la malla de refuerzo. Se necesitan técnicas para asegurar el control de varios, cavidad-libre en fundición de ferrocemento, métodos económicos para detectar y reparar daños en la estructura de ferrocemento.

Existen otras tres necesidades importantes para la aceptación del ferrocemento como un material de construcción, llamadas

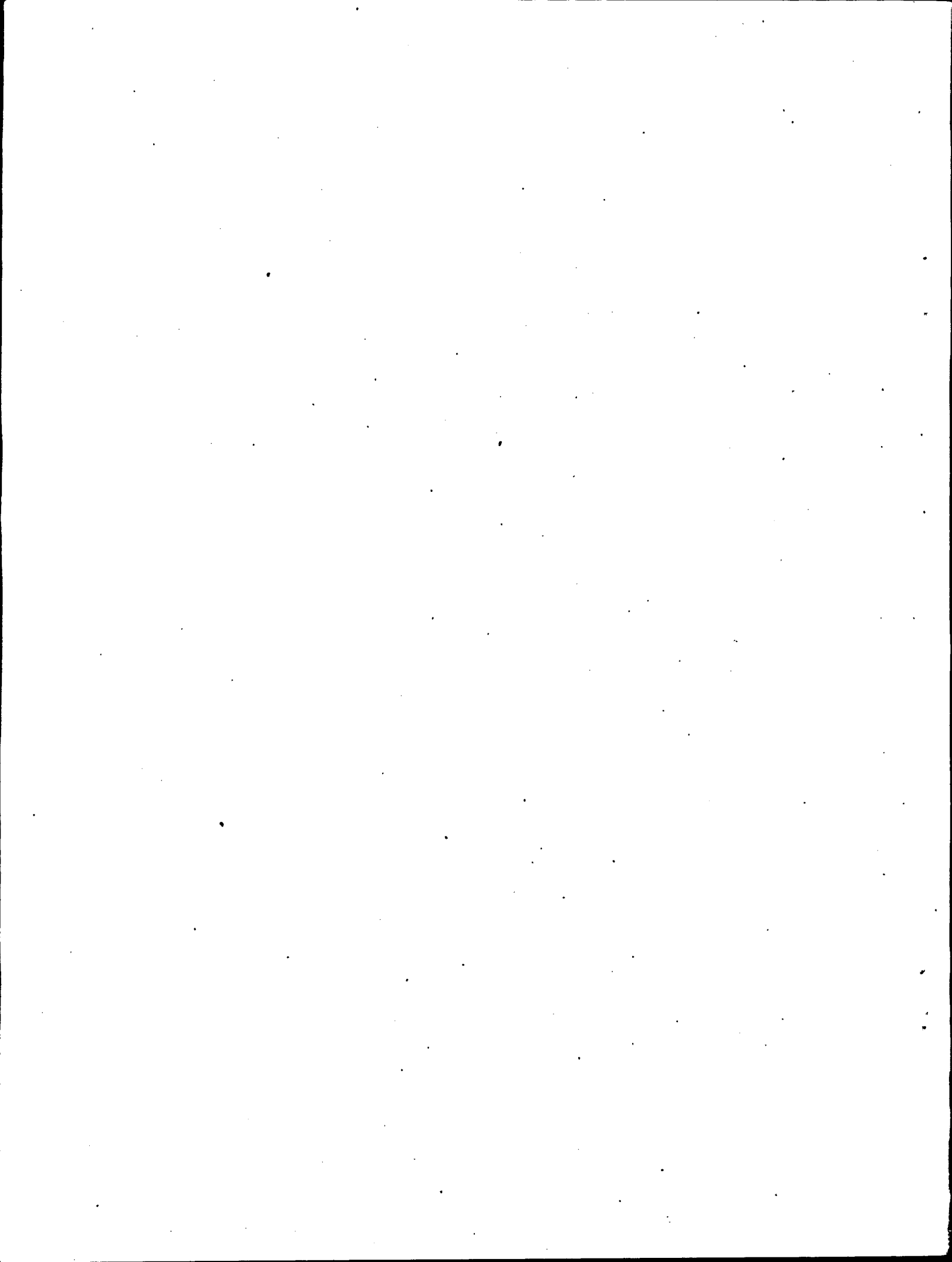
- (1) El desarrollo de una guía o práctica recomendable,
- (2) El desarrollo de métodos de análisis y diseño simplificados y,
- (3) El desarrollo de procedimientos de fabricación y construcción eficientes y económicos.

7.4 Resumen.

En el futuro del ferrocemento dependerá tanto del diseño creativo como de esfuerzos largos y laboriosos. Es importante reconocer que el ferrocemento, igual que el concreto reforzado con fibra, nos capacita para diseñar un compuesto expuesto a distintos esfuerzos, más allá de las extensiones antes permitidas. Esta cualidad, combinada con el delgado espesor del recubrimiento del refuerzo, brinda mayor flexibilidad en el diseño de techos, paredes, depósitos de líquidos, y formas arquitectónicas prefabricadas que podrían proveer superficies adecuadas para su utilización en el campo.



PARTE II



ESTUDIOS SOBRE FERROCEMENTO REALIZADOS EN EL CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE INGENIERIA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.

CAPITULO I

INTRODUCCION.

Dada la oportunidad de utilización de el material conocido como ferrocemento y el poder aprovechar sus cualidades, ha sido motivo de realizar varios estudios, los cuales han tenido como objetivo el conocer en forma más extensa las características principales de este material. La utilización de este material en la rama de la construcción podría ser una opción para poder solucionar problemas, como el alto costo de los materiales tradicionales utilizados en construcción actualmente, que incide en el déficit de vivienda, este material presenta características especiales, las cuales optimizaría ciertos sistemas constructivos utilizados en distintos tipos de obras de ingeniería.

Se puede decir que este material puede ser utilizado en regiones diversas y puede ser construido en los propios lugares de aplicación. La utilización del ferrocemento en elementos prefabricados es otra forma de lograr una aplicación adecuada. En resumen, son muchas las aplicaciones que se le puede dar y como se mencionó, anteriormente, es una opción para los países sub-desarrollados, para contar con un material de bajo costo y con características constructivas aceptables, que ayude a solucionar el déficit habitacional existente y para los países desarrollados su aplicación puede ser diversa. En estos Capítulos resumiremos algunos de los estudios realizados y sus resultados obtenidos.

CAPITULO II

LAMINAS DE FERROCEMENTO

2.1 Características del Modelo Investigado.

En la búsqueda de elementos constructivos utilizando el ferrocemento se realizó un estudio sobre un tipo de techo inaccesible, el cual específicamente consistió en la presentación de una metodología sencilla de construcción de láminas de ferrocemento y su evaluación, en lo que respecta a su capacidad soporte y permeabilidad, al igual que una evaluación económica, en comparación con láminas de asbestos cemento de las mismas características en lo que se refiere a su perfil.

Entre las características del modelo investigado involucra características geométricas de la lámina características del refuerzo y del mortero, estos datos son los siguientes:

Características geométricas de la lámina.

Largo total	4.00 m
Ancho total.....	1.00 m.
Ancho util	0.90
Alto de perfil	0.25 m.
Espesor	0.017 m.
Módulo de sección (I/c) para la fibra extrema inferior	1683 cm ³
Módulo de sección (I/c para la fibra extrema superior	1183 cm ³

(ver fig. 1.1)

Características de la malla hexagonal de 1/2" utilizada

Separación de entorchado	1.27 cm.
Diámetro de alambre	0.065 cm.
Area de alambre	0.00332 cm ²
Esfuerzo de fluencia (f)	2180 kg/cm ²
Esfuerzo máximo promedio	3919.7 kg/ cm ²
Peso por unidad de superficie	0.60 Kg/cm ²
No. de alambres por unidad de long.	151 /m

Respecto a el tipo de mortero y esfuerzos de compresión utilizados se resumen en la tabla 2.1

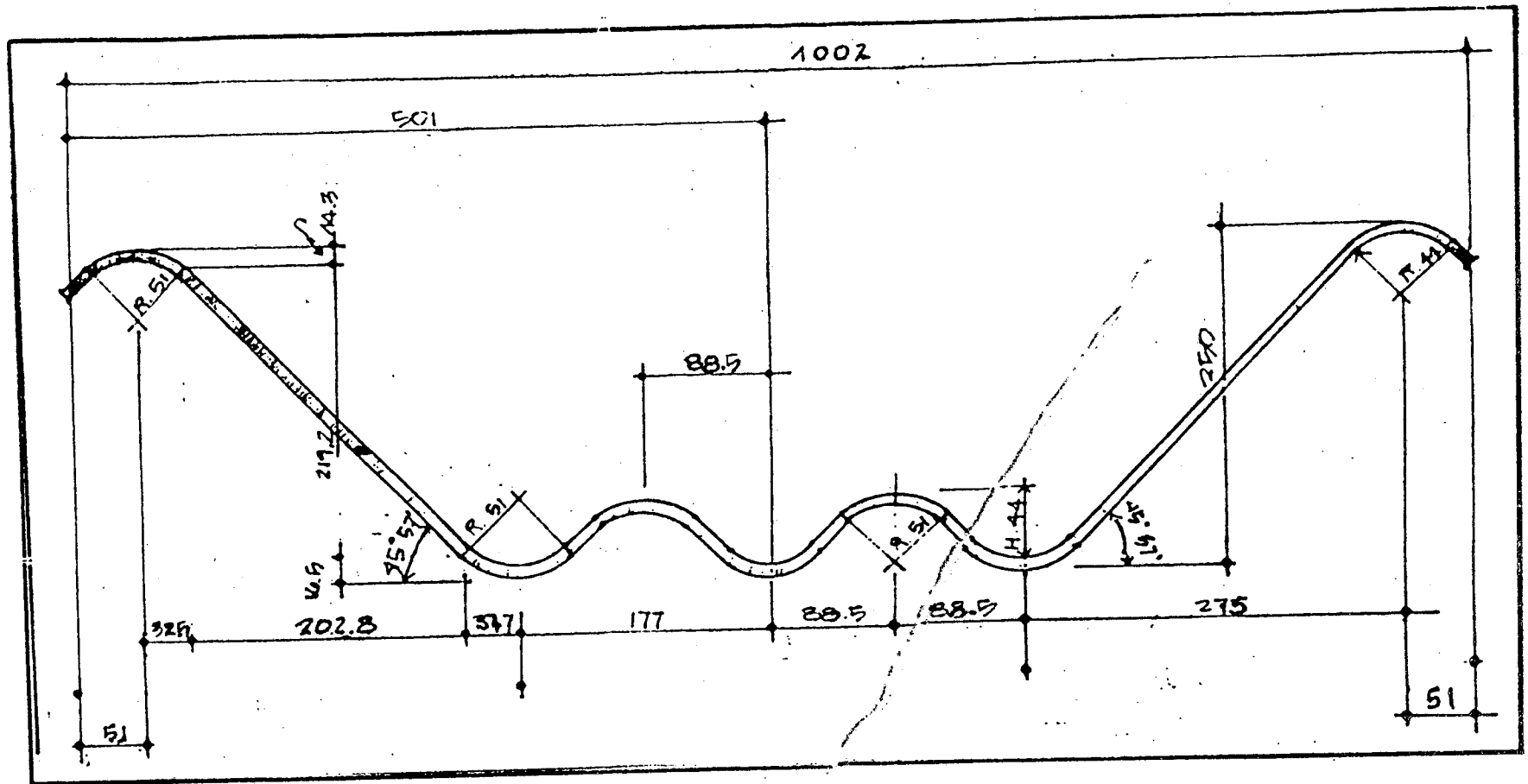


Fig. 2.1
 Características geométrica del modelo
 investigado, medidas dadas en mm.

TABLA 2.1
TIPOS DE MORTERO Y ESFUERZOS DE COMPRESION

Mezcla	Tipo de arena	Prop en peso Cemento : Arena	Relación A/C	f_{cu} 28 días Kg/cm ²
M1	Arena de río	1 : 2	0.46	444.56
M2	Arena de río	1 : 2	0.48	384.11
M3	Arena pómez	1 : 1.5	0.48	242.19
M4	Arena pómez	1 : 1.5	0.55	220.39
M5	Arena de río	1 : 2	0.50	242.19
M6	Arena de río	1 : 2	0.52	320.66
M7	Arena pómez	1 : 1.5	0.56	212.16
M8	Arena pómez	1 : 1.5	0.60	193.56

2.2 ENSAYOS REALIZADOS

En este estudio se hicieron ensayos de flexión y ensayos para determinar la permeabilidad de la lámina, los parámetros que fueron aplicados en flexión fueron los siguientes:

Luz libre entre apoyos, centro a centro 380 cm.
Carga de diseño 125 kg/ m²
Deflexión máxima permisible 1.05 cm.

A continuación se presentan resultados obtenidos en las pruebas efectuadas. (ver tablas)

Para la comprensión de las siguientes tablas tomar en cuenta la siguiente nomenclatura.

L_i = número de la lámina ensayada.

MR = mortero de arena de río.

MP = mortero de arena pomez.

2H = dos mallas de refuerzo.

1H = una malla de refuerzo.

TABLA 2.2

RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE FLEXION

LAMINA	PESO Kg/m ²	CARGA 1a. GRIETA Kg/m ²	△ 1a. GRIETA mm.	F.S. 1a. GRIETA	CARGA MAX. Kg/m ²	△ MAX. mm	F.S. MAX
L1-MR-2H	35.49	211.81	5.60	2.82	290.61	16.00	3.87
L2-MR-2H	33.57	210.32	7.94	2.80	272.63	18.90	3.64
L3-MP-2H	29.94	179.43	5.75	2.39	257.02	17.05	3.43
L4-MP-2H	28.46	132.75	5.04	1.77	226.32	20.30	3.02
L5-MR-1H	39.46	147.20	4.10	1.96	238.05	11.65	3.17
L6-MR-1H	36.40	147.86	4.20	1.97	254.63	15.15	3.40
L7-MP-1H	31.47	116.96	3.60	1.56	239.05	17.90	3.19
L8-MP-1H	29.26	116.96	6.23	1.56	225.18	17.40	3.00
Asbesto-ce mento	16.22	--	--	--	374.06	13.65	4.99

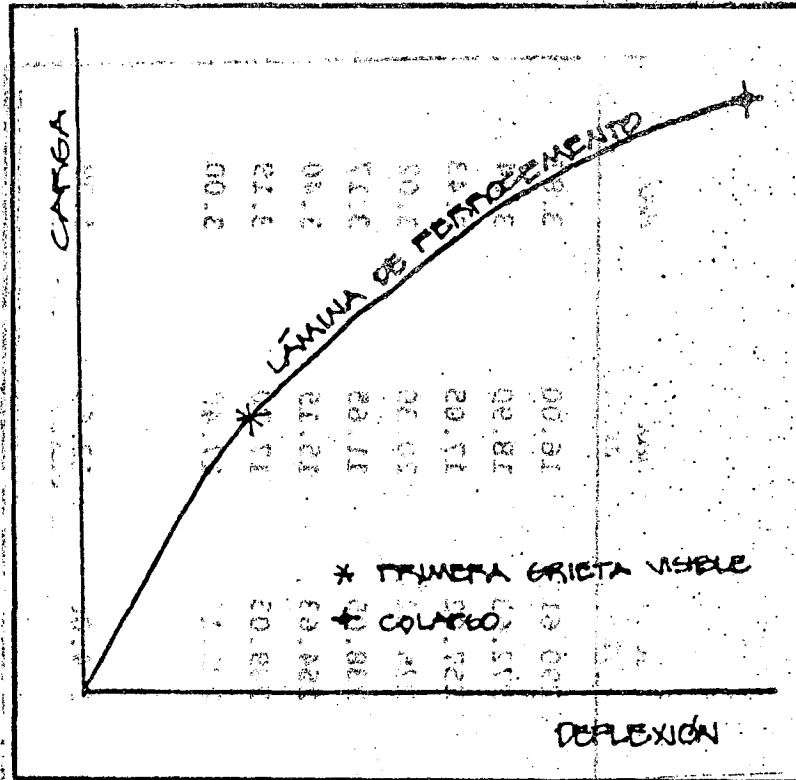


Fig. 2.2. Muestra para laminas de ferrocemento la relación carga-deflexión.

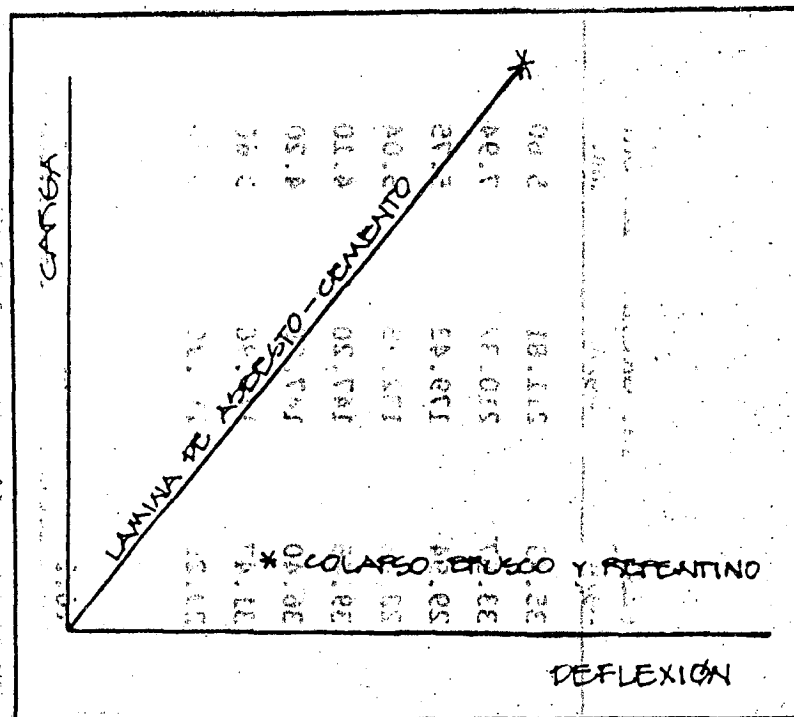


Fig. 2.3 Muestra para láminas de asbesto-cemento la relación carga-deflexión, esta gráfica indica el diferente comportamiento en comparación con las laminas de ferrocemento.

TABLA 2.3
COMPARACION TEORICA - EXPERIMENTAL
CARGA 1a. GRIETA

No.	ELEMENTO	CARGA EXPERIMENTAL PESO+CARGA MAXIMA (Kg/m ²)	CARGA TEORICA (Kg/m ²)	RELACION TEORICA/EXP. (Kg/m ²)
1	L1-MR-2H	248	274	1.11
2	L2-MR-2H	244	274	1.13
3	L5-MR-1H	187	270	1.44
4	L6-MR-1H	185	270	1.45
5	L3-MP-2H	210	226	1.08
6	L4-MP-2H	162	226	1.39
7	L7-MP-1H	149	222	1.48
8	L8-MP-1H	147	222	1.51

Promedio: 1.32 (76%)

Coefficiente de variación : 0.18

TABLA 2.4
COMPARACION TEORICA-EXPERIMENTAL

No.	Elemento	CARGA EXPERIMENTAL PESO+CARGA MAXIMA (Kg/m ²)	CARGA TEORICA (Kg/m ²)	RELACION TEORICA/EXP.
1	L1-MR-2H	327	635	1.94
2	L2-MR-2H	307	635	2.06
3	L5-MR-1H	278	570	2.05
4	L6-MR-1H	291	570	1.95
5	L3-MP-2H	287	449	1.56
6	L4-MP-2H	255	449	1.76
7	L7-MP-1H	271	374	1.38
8	L8-MP-1H	255	374	1.46

Promedio : 1.77 (57%)

Coefficiente de variación : 0.27

TABLA 2.5

COMPARACION DE CARACTERISTICAS DE LAMINAS DE FERROCEMENTO Y
LAMINAS DE ASBESTO-CEMENTO

PROPIEDAD	LAMINAS DE FERROCEMENTO	LAMINAS DE ASBESTO-CEMENTO
Materia Prima	Cemento, arena Malla hexagonal Esqueleto de acero	Fibras de Asbesto y cemento
Espesor	17 mm.	8 mm
Longitud	4.00 m.	4.00 m
Area proyectada	4.00 m ²	4.00 m ²
Peso propio	29.78 a 36-23 kg/m ²	16.60 Kg/m ²
Nocivo a la salud	Ninguno	Causa daño a los pulmones
Ductilidad	Alta	Muy baja
Impérmeabilidad	Buena con mortero arena de río Baja con arena pómez	Alta

2.3 RESUMEN.

-De este estudio respecto de láminas de ferrocemento podemos decir que el mortero utilizado en las pruebas evidencia un buen esfuerzo a compresión. La utilización de dos capas como refuerzo da como resultado mayor capacidad de carga a la primera grieta, que las reforzadas con una sola capa y también resultan ser más flexibles, las láminas construídas con mortero de arena de río presentan una impermeabilidad considerada buena no así las contruídas con mortero de arena pómez, las láminas de ferrocemento dependen en gran cantidad en su costo del precio de la malla de refuerzo, lo cual incide lograr un costo aceptable para su uso en viviendas de tipo económico.

(Referencia Parte II.2)

CAPITULO III

BOVEDAS DE FERROCEMENTO

3.1 CARACTERISTICAS DEL ESTUDIO.

Un sistema de techo totalmente diferente a los empleados tradicionalmente se desarrolla en este trabajo, caracteriza al nuevo elemento no sólo la forma sino la composición de los materiales utilizados, se aplicaron como sistemas constructivos, la fundición de la bóveda con formaleta y también sin formaleta. Entre los materiales utilizados están, el concreto liviano de pomez (mezcla de arena pomez, cemento y agua y algún aditivo) mortero de arena de río, acero de refuerzo, malla hexagonal de alambre, (ver. fig. 3.1)

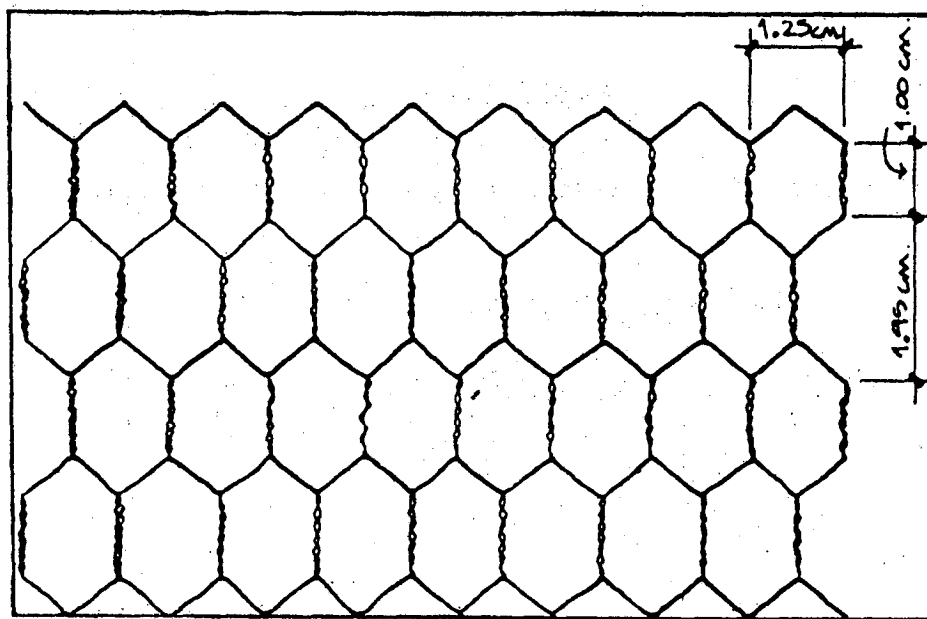


Fig. 3.1 Muestra la malla de refuerzo hexagonal utilizada en estos ensayos.

El trabajo realizado consistió en la construcción de 10 bóvedas, 5 de las cuales fueron construidas sin formaletas y las restantes 5 con ayuda de formaleta se llevó a cabo su construcción, las características de este trabajo se muestra en la tabla No. 3.1.

TABLA 3.1

<u>Número de Bóveda</u>	<u>Contra Flecha (metros)</u>	<u>DESCRIPCION DEL TRABAJO REALIZADO</u>		
		<u>Tipo de mezcla utilizada</u>	<u>Sistema Constructivo</u>	<u>Observaciones</u>
1	0.15	Concreto liviano de pómez	Sin Formaleta	+ Sobre apoyos pun- tuales
2	0.15	Concreto liviano de pómez	Sin Formaleta	Sobre Apoyos pun- tuales
3	0.15	Mortero de Arena de río	Sin Formaleta	Sobre Apoyos pun- tuales
4	0.30	Concreto liviano de pómez	Sin Formaleta	Sobre Apoyos en sentido longitu- dinal
5	0.30	Mortero de arena de río	Sin Formaleta	Sobre Apoyos a ba- se de un Módulo
6	0.15	Concreto liviano de río	Con Formaleta	
7	0.15	Concreto liviano de pómez	Con Formaleta	
8	0.15	Concreto liviano de pómez	Con Formaleta	Variación de la Po- sición de Refuerzo con respecto a No.7
9	0.15	Concreto liviano de pómez	Con Formaleta	Apoyada en los Cua- tro lados.
10	0.15	Concreto liviano de pómez	Con Formaleta	Apoyada en los Cua- tro lados. Utili- zación de Vibrador variación en los tímpanos.

100

3.2 Ensayos realizados .

Para el estudio de estas bóvedas se hicieron ensayos para determinar su comportamiento bajo carga y también la permeabilidad del elemento estudiado, algunos resultados obtenidos en la evaluación sobre estas bóvedas se muestran a continuación, determinando la deflexión observada bajo carga.

Elemento	Contra flecha	material	carga Kg/cm ²	deflexión mm
bóveda 2	0.15	concreto liviano de pomez	200	375×10^{-2}
bóveda 3	0.15	mortero de arena de río	200	800×10^{-2}
bóveda 4	0.30	concreto liviano de pomez	200	450×10^{-2}
bóveda 5	0.30	mortero de arena de río	200	500×10^{-2}

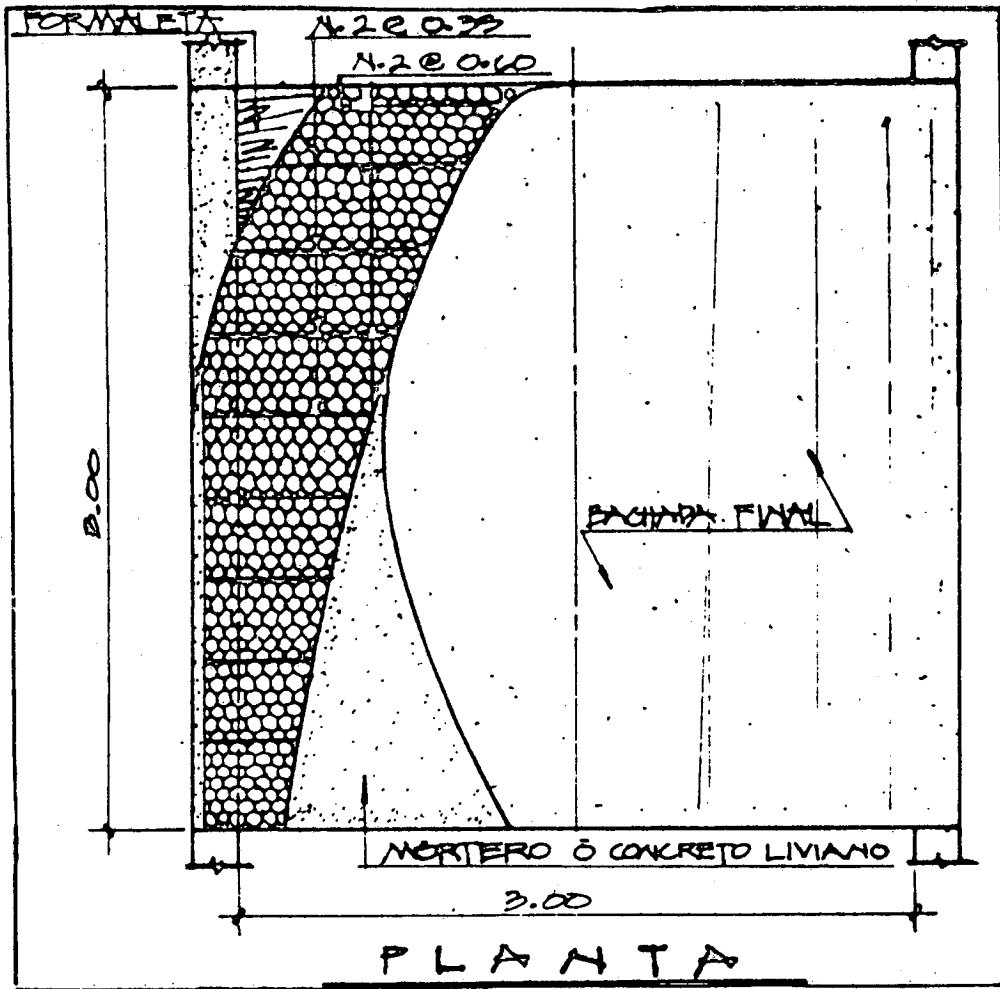


Fig. 3.2 Muestra los componentes utilizados en la fabricación de los techos abovedados.

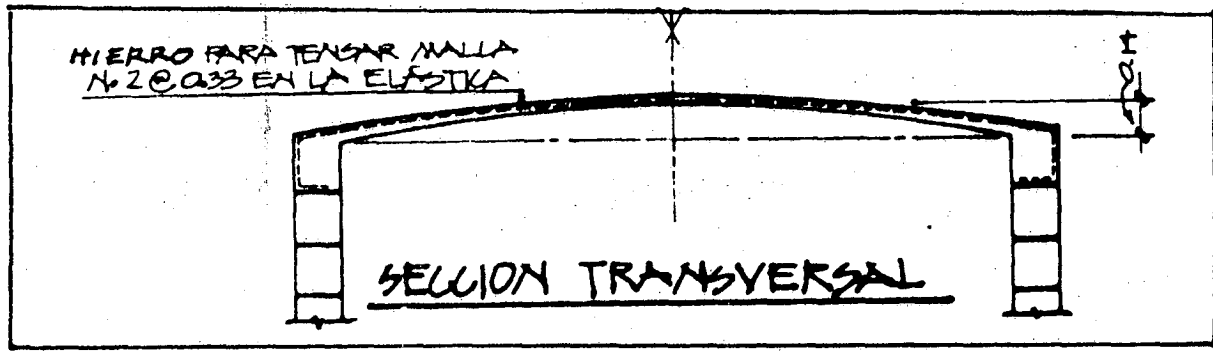


Fig. 3.3. Muestra la sección transversal en las cubiertas abovedadas.

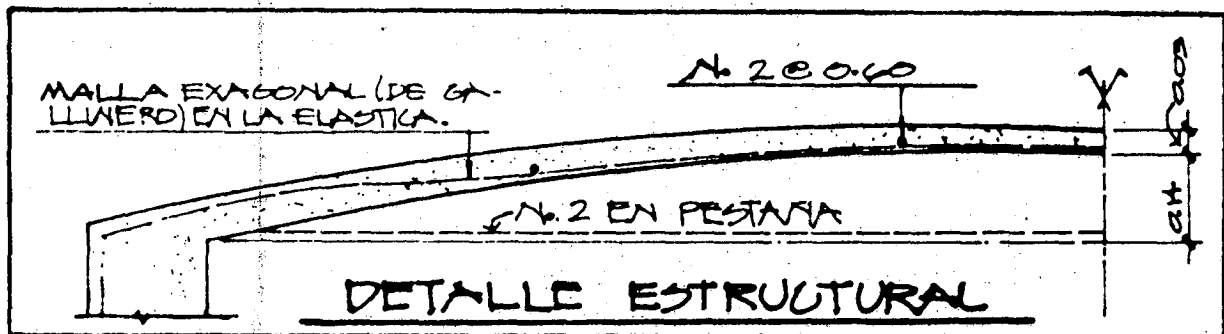


Fig 3.4 Esta gráfica muestra la posición del refuerzo del ferrocemento.

Las pruebas de permeabilidad en elementos fundidos con formaleta dieron mejores resultados que las fundidas sin formaleta, sin embargo, si hay aún indicios de filtraciones en este tipo de techos.

3.3 RESUMEN.

Este tipo de bóvedas estudiadas cumplen con los requisitos mínimos para techos inaccesibles, ya que resistieron cargas de 180 kg/cm^2 sin presentar evidencia de falla y su recuperación fue buena, las bóvedas fabricadas sin formaleta presentaron filtraciones considerables. En relación a su costo presenta una reducción en comparación con otros tipos de techos tradicionales. Para la elaboración del concepto liviano, se recomienda el uso de arena pomez tamizada por la malla No. 4 prefiriéndose cuando la oportunidad lo permita arenas más finas. En resumen podemos decir que este tipo de techos puede ser utilizados para la construcción de viviendas de tipo económico obteniéndose buenos resultados. Sin embargo, habrá que reducir las filtraciones mejorando la aplicación del mortero, su compactación y la reducción de vacíos, también pueden utilizarse aditivos impermeabilizantes como una protección final del elemento.

Detalles más específicos sobre los resultados obtenidos en el estudio realizado en este tipo de cubiertas consultar referencias. Parte II.1

CAPITULO IV

ENSAYOS CON FERROCEMENTO DE CONCRETO LIVIANO A BASE DE POMEZ

4.1 Características del estudio.

Este estudio se realizó motivado por la idea de emprender una serie de investigaciones sobre materiales no tradicionales que podrían llegar a dar una solución en el problema del déficit habitacional que sufre Guatemala. El ferrocemento en este caso específico no es contemplado como un sustituto definitivo del concreto reforzado tradicional; sin embargo, podría ser utilizado con un costo mucho menor, especialmente en unidades habitacionales, construídas con elementos de menor peso y espesor, este estudio fue de los primeros que se realizaron sobre ferrocemento en el Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Enfoca, particularmente, las propiedades y el comportamiento físico, mecánico del ferrocemento elaborado a base de arena liviana de pómez. Este estudio está dividido en dos aspectos, primero una exposición de la teoría del ferrocemento con una descripción de los materiales que lo componen y las características de los mismos, también la descripción de los procedimientos constructivos recomendables para el ferrocemento; el segundo es la propia investigación, detalla, entonces, los ensayos, pruebas, aplicando los métodos recomendados para el diseño y análisis del ferrocemento. Los materiales que se utilizaron en la composición del ferrocemento fueron, arena pómez, cemento portland tipo I, malla de alambre entretejida hexagonal de $\frac{1}{2}$ " (1.27 cm), diámetro del alambre 0.0711 cm., con un esfuerzo de fluencia aproximado de 3500 Kg/cm^2 , con un módulo de elasticidad asu-

mido $1,8 \times 10^6$ kg/cm². La arena pómez con un peso unitario determinado de 717.70 kg/m³. El cemento portland tipo I con un peso unitario de 1550 Kg/m³. Se utilizaron tres tipos de mezclas que son las siguientes:

Mezcla	Tipo 1	Arena Pómez	Cemento : 1:1.8 en peso
Mezcla	Tipo 2	Arena Pómez	Cemento : 1:2.0 en peso
Mezcla	Tipo 3	Arena Pómez	Cemento : 1:2.5 en peso

Con una relación constante para las 3 mezclas de Agua/Cemento entre 0.48 y 0.51 en peso y la inclusión de un aditivo inclusor de aire en 2 onzas fluídas (57.00 cc) por saco de cemento se varió la cantidad de refuerzo utilizando probetas con 2 y 3 capas de malla de refuerzo.

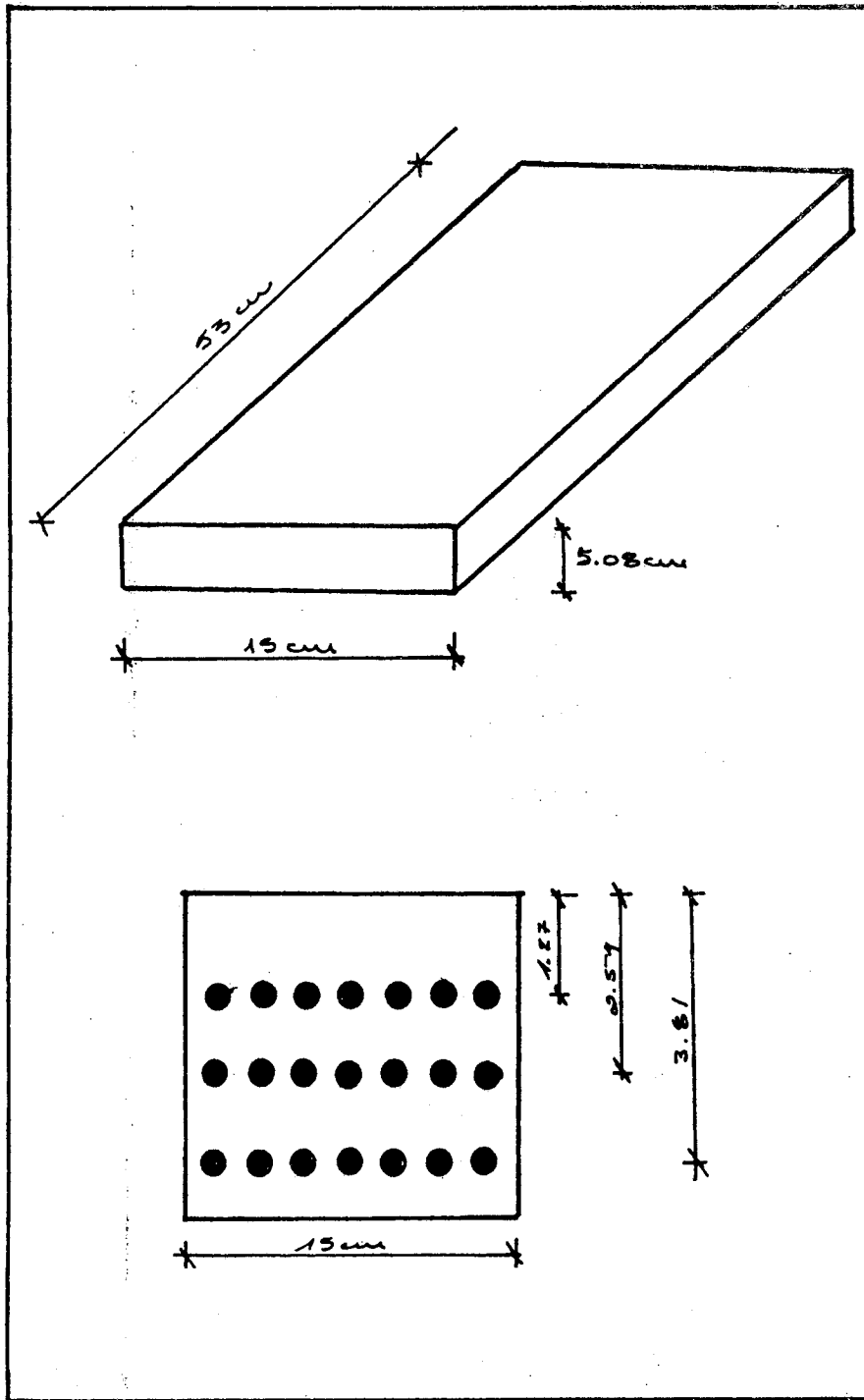


Fig. 4.2 Probetas para ensayos de flexión.

4.3 RESUMEN.

En este estudio se llegó a comprobar que el uso de dos capas de refuerzo es más conveniente que el uso de tres capas, del mismo refuerzo, pues el aumento de resistencia es mínimo comparado con el incremento de peso y costo, el comportamiento a compresión se puede decir que no es inferior al de el concreto reforzado tradicional, la mezcla que da mejores resultados de las utilizadas en este estudio en los ensayos realizados, es la que tenía una proporción cemento: arena pómez igual a 1:2 con una relación agua/cemento, no mayor de 0.48 en peso.

Además de lo anterior, el comportamiento y propiedades del ferrocemento elaborado con arena pómez, está dentro de límites aceptables especialmente a lo que refiere a compresión, corte, impacto y flexión. El costo unitario del ferrocemento es más bajo que el concreto tradicional y puede ser, preferentemente, usado en algunos tipos de estructuras especiales. Referencia Parte II.3.

CONCLUSIONES

- Ferrocemento es un material que posee características mecánicas de un material, aproximadamente, homogéneo y capaz de resistir impacto. Pruebas en delgadas losas de ferrocemento mostraron buen comportamiento de flexibilidad, elasticidad y resistencia.
- La utilización de este material en algunas obras de ingeniería ha demostrado buen comportamiento del ferrocemento, un menor costo en la construcción y una simplicidad de su aplicación en comparación con algunos otros materiales tradicionales utilizados.
- La composición básica del ferrocemento está formada por un Mortero de Cemento Portland, Refuerzo, Aditivos y Revestimientos.
- El agua para la elaboración del ferrocemento debe ser preferentemente potable y libre de componentes orgánicos y deberá mantenerse una relación de 0.35 a 0.55 de agua-cemento.
- El agregado usado en el ferrocemento es usualmente arena bien graduada capaz de pasar el tamiz No.8; sin embargo, habrá que tomar en cuenta las características.
- Las relaciones del mortero para ferrocemento son Arena-Cemento relación por peso 1.5 a 2.5 dando, ésta, buenos resultados.
- La orientación de la Malla de refuerzo es de gran importancia pues se ha comprobado por ejemplo que una Malla de metal expandido en su orientación normal para carga uniaxial da mejor rendimiento que utilizada en otra orientación. La malla cuadrada es utilizada para cuando se diseñe para una

carga biaxial siempre dando mejores resultados cuando es colocada en su orientación normal.

- Cuando son utilizadas varias capas de mallas en el refuerzo del ferrocemento da mejores resultados el distribuirlas uniformemente en el espesor del elemento.
- Para la selección del tipo de refuerzo más adecuado habrá de tomar en cuenta la facilidad que proporcione en la construcción del elemento y la obtención del mismo.
- Se ha observado en varias pruebas que para la construcción de elementos de secciones complejas de doble curvatura la malla hexagonal es la más indicada para elementos de secciones de curva simple y de secciones planas. El refuerzo más indicado es la malla cuadrada y la malla de metal expandido, respectivamente.
- La malla de metal expandido da muy buenos resultados cuando se trata de prevenir el agrietamiento. La malla entrelazada y la malla hexagonal puede ser preferible cuando se exponga el elemento en mayor cantidad a carga fatiga.
- Comúnmente las estructuras de ferrocemento están formadas de elementos delgados, razón por lo cual esto afecta a que sea poca su resistencia al fuego.
- Se tiene actualmente precedentes del buen comportamiento del material ferrocemento en techos, tanques, silos, barcos, etc.

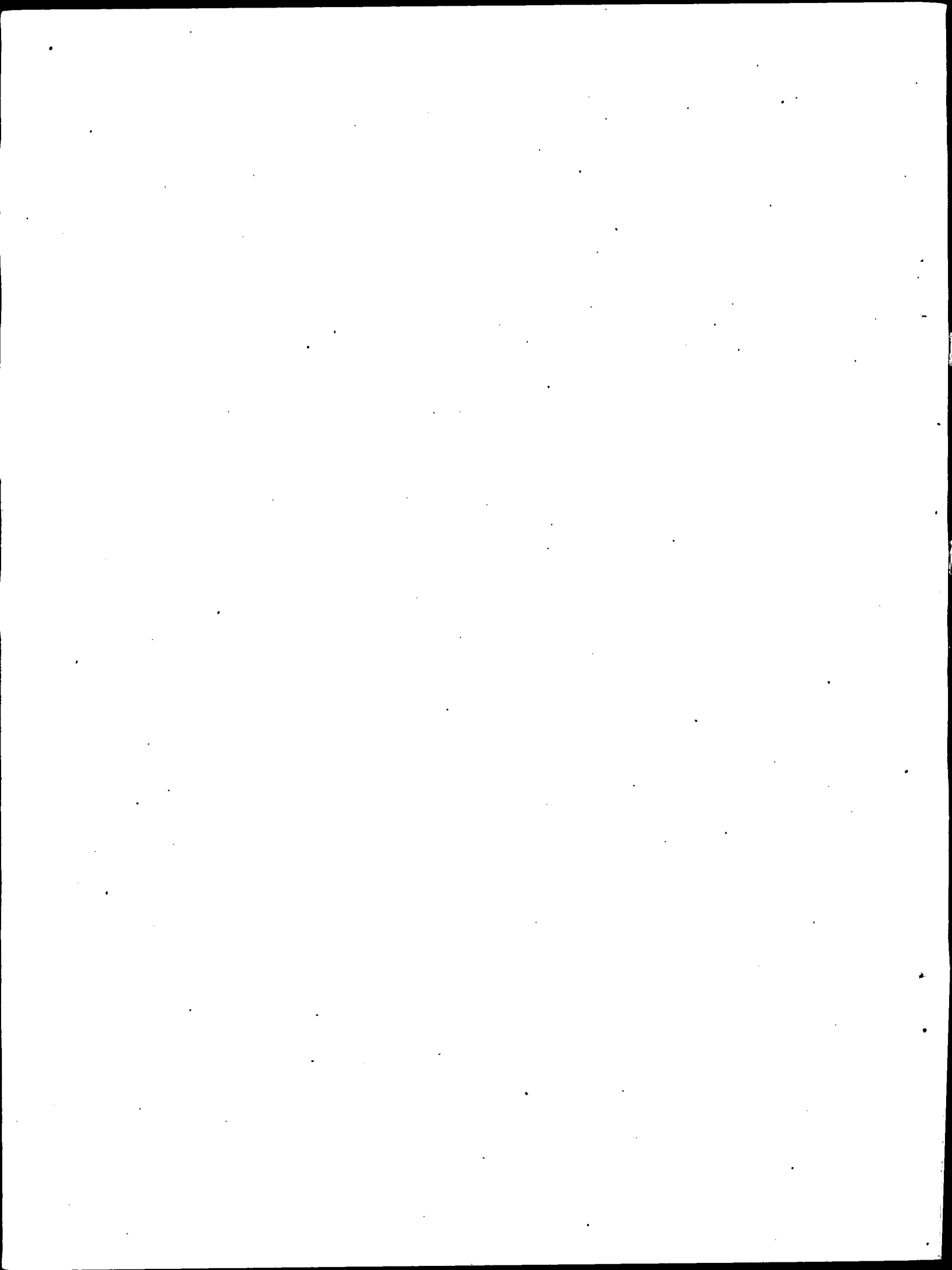
- En los estudios hechos en el CII, el refuerzo más comunmente usado ha sido la malla hexagonal, ésta se ha utilizado en láminas acanaladas, techos abovedados, depósitos de líquidos y para probar las características del ferrocemento en elementos de prueba de laboratorio.
- El mortero utilizado en el CII se ha mantenido en su relación por peso agua-cemento entre los rangos de 0.35 a 0.55 y la relación arena-cemento entre los rangos de 1.5 a 2.5 dando buenos resultados de resistencia.
- La arena de río en el mortero utilizado en el ferrocemento presentó una mejor impermeabilidad que la arena pomez.
- Hay una considerable variación entre las recomendaciones de superficies específicas dadas por ACI y las experimentadas en países en vías de desarrollo.
- De las aplicaciones se ha observado que valores menores de superficie específica que las recomendadas por ACI han dado buenos resultados.

RECOMENDACIONES

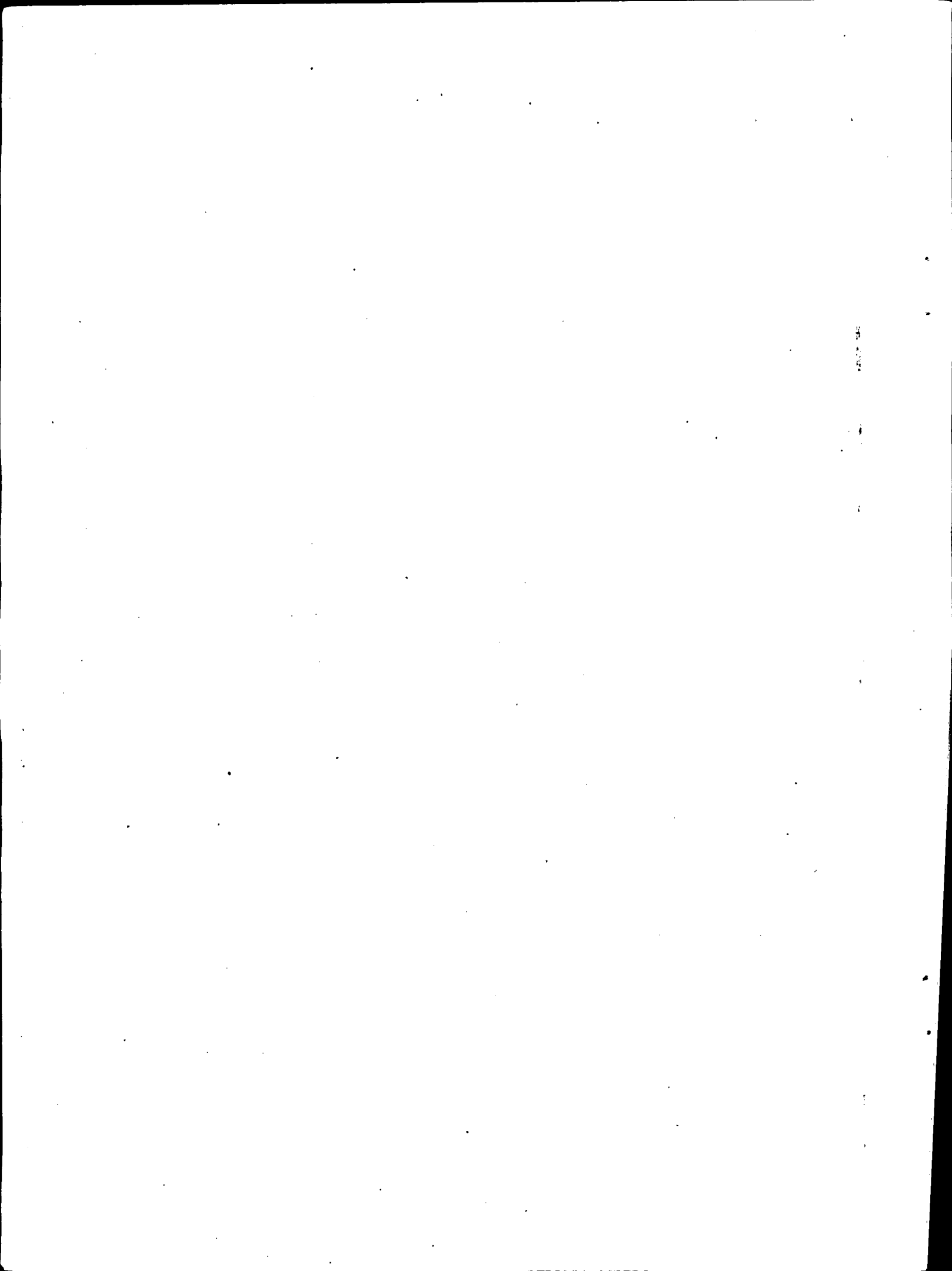
- Es recomendable tomar en cuenta para diseños de elementos expuestos a medios corrosivos y que su función de servicio sea de depósito de líquidos, que el ancho máximo de grieta sea menor de 0.004 Plg. (0.10mm).
- Se recomienda que para aumentar la durabilidad se deberá tomar en cuenta la utilización de recubrimientos adecuados, la inclusión de aproximadamente el 9% de aire al mortero principalmente cuando el elemento esté expuesto a cambios de temperatura, el uso de aditivos adecuados y la utilización de malla galvanizada principalmente cuando ésta sea utilizada en elementos que estén expuestos a medios corrosivos.
- La utilización del refuerzo en este caso principalmente la malla de refuerzo debe ser utilizada para aprovechar en mayor cantidad sus características, tomando en cuenta su adaptabilidad para el tipo de elemento a construir, el análisis de fuerzas que afectan debe ser estudiado para poder disponer de la colocación correcta del refuerzo, pues éste da mejores resultados cuando es colocado en forma normal a la fuerza aplicada.
- Para mallas soldadas es importante, antes de utilizarlas, el comprobar la calidad de soldadura de las uniones, y, para otros tipos de mallas las juntas o uniones deben ser inspeccionadas también minuciosamente.
- El desarrollar una guía que involucre métodos de análisis y diseño simplificado y procedimientos constructivos que den resultados eficientes y económicos, sería una forma de impulsar su uso en Guatemala y en otros países.

- Se recomienda que los estudios hechos por CII con resultados satisfactorios sean impulsados en programas de ayuda a las áreas rurales, como un servicio social.
- Estudios sobre el comportamiento del ferrocemento expuesto al fuego sería de gran interés en el conocimiento sobre este material.
- Elaborar recomendaciones tentativas para el uso del ferrocemento en la construcción.
- Construir elementos con base a las recomendaciones de ACI, para verificar su situación de comportamiento bajo carga, costos etc.
- Determinar las características mecánicas de mallas disponibles en el medio guatemalteco, para aplicar los parámetros indicados por el Comité 549 de ACI.
- Por su bajo costo y simplicidad de construcción sería de gran ayuda el implementar su uso en Guatemala para poder solventar los problemas de déficit de vivienda y otros.

PARTE III



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS



PARTE I

Reportes Consultados De A C I

- ACI 201.2R-77 - Guide to Durable Concrete
- ACI 211.1-81 - Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete
- ACI 318-77 - Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-77)
- ACI 350R-77 - Concrete Sanitary Engineering Structures
- ACI 515R-79 - A Guide to the Use of Waterproofing, Dampproofing, Protective, and Decorative Barrier Systems for Concrete.
- ACI 544.1R-73 - State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete

1. Iorns, M. E., and Watson, L. L., Jr., U.S. Patent No. 3,652,755, Issued Mar. 29, 1972.
2. Iorns, M. E., and Watson, L. L., Jr., "Ferrocement Boats Reinforced with Expanded Metal," Journal of Ferrocement (Bangkok), V. 7, No. 1, July 1977, pp. 9-16.
3. "Study and Evaluation of Ferrocement for Use in Wind Tunnel Construction," Report No. JABE-ARC-07, Research Contract No. NA52-5889, NASA Ames Research Center, Moffet Field, July 1972, 88 pp.

4. "An Integrated Solar Energy Heating and Cooling System for a New Physical Science Education Center in Richmond, Virginia, Final Report, Contract No. E-(40-1) 4899, U.S. Energy Research and Development Administration, Division of Solar Energy, Washington, D.C., 1976.
5. A Selection of Historic American Papers on Concrete 1876-1926, SP-52, American Concrete Institute, Detroit, 1976, 334 pp.
6. Draffin, Jasper O., "A Brief History of Lime, Coment, Concrete and Reinforced Concrete." A Selection of Historic American Papers on Concrete 1876-1926, SP-52, American Concrete Institute, Detroit, 1976, pp. 3-38.
7. Gordon, J.E., The New Science of Strong Material, Penguin Books, Baltimore, 1968, 269 pp.
8. Cassie, W. Fisher, "Lambot's Boats - A Personal Discovery," Concrete (London), V. 1, No. 11, Nov. 1967, pp. 380-382.
9. Morgan, Rowland G., "Lambot'z Boats," Concrete (London), V. 2, No.3, Mar. 1968, p. 128.

10. Hyatt, Thaddeus, "An Account of Some Experiments with Portland-Cement-Concrete Combined with Iron, as a Building Material," A Selection of Historic American Papers on Concrete 1876-1926, SP-52, American Concrete Institute, Detroit, 1976, pp. 53-99.
11. Jackson, Gaior W., and Sutherland, W. Morley, Concrete Boatbuilding; Its Technique and Its Future, John de Graff, Inc., Tuckahoe, 1969, 106 pp.
12. "Report of the Joint Committee of the American Concrete Institute and Portland Cement Association on Concrete Barges and Ships," Proceeding, American Concrete Institute, V. 14, 1918, pp. 505-515.
13. Nervi Pier Luigi, "Ferrocement: Its Characteristics and Potentialities," Library Translation No. 60, Cement and Concrete Association, London, July 1956, 17 pp.
14. Nervi Pier Luigi, Structures, English Translation by Guiseppina and Mario Salvadori, F. W. Dodge Corporation, New York, 1956, 118 pp.
15. "Ferrocement: Applications in Developing Countries," National Academy of Science, Washington, D.C., Feb. 1973, 90 pp.
16. Iorns, M.E., "The Potential of Ferrocement in Stationary Structures," Journal of Ferrocement (Bangkok), V. 4, No. 5 Aug-Sept. 1975, pp. 13-21.

17. Alexander, Douglas J., *The Widening Applications of Ferrocement*, D.J. Alexander, Auckland, 1979, 120 pp.
18. Lea, F.M., *The Chemistry of Cement and Concrete*, Revised Edition of Lea and Desch, St. Martin's Press, New York, 1956, 637 pp.
19. Troxell, George E.; Davis, Harmer E.; and Kelly, Joe W., *Composition and Properties of Concrete*, 2nd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1968, 529 pp.
20. *Fiber Reinforced Concrete*, SP-44, American Concrete Institute, Detroit, 1974, 570 pp.
21. Atcheson, Maurice, and Alexander, Douglas, "The Development of Fibrous Ferrocement," *Ferrocement - Materials and Applications*, SP-61, American Concrete Institute, Detroit, 1979, pp. 81-101.
22. Alexander, D. J., and Atcheson, M. G. A., "Fibrous Ferrocement for Commercial Vessels," *Journal of Ferrocement (Bangkok)*, V. 5, Mar-May 1976, p.25.
23. Castro, Jose, and Naaman, Antoine E., "Cement Mortar Reinforced with Natural Fibers," *ACI JOURNAL*, Proceeding V. 78, No. 1, Jan-Feb, 1981, pp. 69-78.

24. Sargent, Frank, Personal Communication, Sampson Marine Design Limited, Vancouver, B.C.
25. Haynes, H.H., and Guthrie, G.S., "Ferrocement Construction Panels," Technical Note No. N-1341, Civil Engineering Laboratory, Naval Construction Battalion Center, Port Hueneme, Apr. 1974, 33 pp.
26. Christianson, K.A., and Williamson, R.B., "Solving the Galvanic Cell Problem in Ferrocement," Report No. UC SESM 71-4, University of California, Berkeley, July 1971, 58 pp.
27. Hansen, F., "Investigation of the Effect of Distribution and Amount of Reinforcement on the Physical Properties of Ferrocement," Research Report No. 2, Applied Scientific Research Corporation of Thailand, Bangkok, 1971, 25 pp.
28. Romualdi, James P., and Batson, Gordon B., "Behavior of Reinforced Concrete Beams with Closely Spaced Reinforcement," ACI JOURNAL, Proceedings V. 60, No. 6 June 1963, pp. 775-790.
29. Romualdi, James P., and Batson, Gordon B., "Mechanics of Crack Arrest in Concrete," Proceedings, ASCE, V. 89, EM3, June 1963, pp. 147-168.

30. Bezukladov, V.F., Editor, "Ship Hulls Made of Reinforced Concrete (Korpusa Soudv iz amotsementa)," Shipbuilding Publishing House, Leningrad, 1968, 187 pp. (NAVSHIPS Translation No. 1148 available from National Technical Information Service as AD 680 042)
31. Walkus, B.R., and Mackiewicz, A., "Composites as Applied to the Thin Walled Structures in Poland," Bulletin, International Association for Shell and Spatial Structures (Madrid), V. 18, No. 64, Aug. 1977, pp. 3-13.
32. Naaman, Antoine E., and Shah, Surendra P., "Tensile Tests of Ferrocement," ACI JOURNAL, Proceedings V. 68, No. 9, Sept. 1971, pp. 693-698.
33. Johnston, Colin D., and Mattar, Samir G., "Ferrocement in Tension and Compression," Proceedings, ASCE, V. 102. ST5, May 1976, pp. 875-899.
34. Pama, R. P.; Sutharatnachaiyarorn, C.; and Lee, S. L. "Rigidities and Strength of Ferrocement," Proceedings, First Australian Conference of Engineering Materials, University of New South Wales, Sydney, 1974, pp. 287-308.
35. Greenius, A. W., and Smith, J.D., "Ferrocement for Canadian Fishing Vessels," Project Report No. 48, Industrial Development Branch, Fisheries Service, Department of the Environment, Ottawa, Jan. 1972, 113 pp.

36. Logan D., and Shah, S.P., "Moment Capacity and Cracking Behavior of Ferrocement in Flexure," ACI JOURNAL, Proceedings V. 70, No. 12, Dec, 1973, pp. 799-804.
37. Balaguru, Perumalsamy N.; Naaman, Antoine E.; and Shah, Surendra P., "Analysis and Behavior of Ferrocement in Flexure," Proceedings, ASCE, V. 103, ST10, Oct. 1977, pp. 1937-1951.
38. Johnston, Colin D., and Mowat, Dallas N., "Ferrocement - Material Behavior in Flexure," Proceedings, ASCE, V., 100, ST10, Oct. 1974, pp. 2053-2069.
39. Kumar, G. V. S., and Sharma, P.C., "An Investigation of the Ultimate and First Crack Strength of Ferrocement in Flexure," Indian Concrete Journal (Bombay), V. 50, No. 11, Nov. 1976, p. 335.
40. Rajagopalan, K., and Parameswaran, V.S., "Analysis of Ferrocement Beams," Journal of Structural Engineering (Roorkee), V. 2, No. 4, Jan. 1975, pp. 155-164.
41. Rao, A. K., and Gowdar, C.S.K., "A Study of the Behavior of ferrocement in Flexure," Indian Concrete Journal (Bombay), V. 45, No. 4, Apr. 1971, pp. 178-183.

42. Austriaco, N. C.; Lee, S. L.; and Pama, R. P., "Inelastic Behavior of Ferrocement Slabs in Bending," Magazine of Concrete Research (London), V. 27, No. 93, Dec. 1975, pp. 193-209.
43. Greenius, A. W., "Ferrocement for Canadian Fishing Vessels - A Summary and Interpretation of Test Results 1969-1974," Industrial Development Branch, Fisheries and Marine Service, Environment Canada, Ottawa, Mar. 1975, 160 pp.
44. Collen, L. D. G., and Kirwan, R.W., "Some Notes on Characteristics of Ferrocement," Civil Engineering and Public Works Review (London), V. 54, No. 632, Feb. 1959, pp. 195-196.
45. Walkus, B. R., "The Behavior of Ferrocement in Bending," Journal of Structural Engineering (Roorkee), V. 3, No. 3, Oct. 1975, pp. 113-125.
46. Walkus, B. R. "State of Cracking and Elongation of Ferrocement Under Axial Tensile Load (II)," Bulletinul Institutului Politehnic, Din Tasi, Tomul XVI(XX), Fasc. 3-4, 1970, pp. 53-60.
47. Mattar, S.G., "Ferrocement in Tension and Compression," MSc Thesis, University of Calgary, 1971.
48. Mowat, D. N., "Flexural Testing of Ferrocement Planks," MSc Thesis, University of Calgary, 1970.

49. Shah, S.P., "Ferrocement as a New Engineering Material," Research Report No. 70-11, Department of Materials Engineering, University of Illinois at Chicago Circle, Nov. 1970, 37 pp.
50. Picard, A., and Lachence, L., "Preliminary Fatigue Tests on Ferrocement Plates," Cement and Concrete Research, V. 4, No. 6, Nov. 1974, pp. 967-978.
51. Greenus, A. W., "Behavior of Ferrocement Under Repeated Stresses," Journal of Structural Engineering (Roorkee), V. 2, No. 4, Jan. 1975, pp. 1011-1059.
52. McKinnon, E. A., and Simpson, M. G., "Fatigue of Ferrocement," Journal of Testing and Evaluation, V. 3, No. 5, Sept. 1975, pp. 359-363.
53. Karasudhi, P.; Mathew, A.G.; and Nimityongskul, P., "Fatigue of Ferrocement in Flexure," Journal of Ferrocement (Bangkok), V. 7, No. 2, Oct., 1977, pp. 80-95.
54. Balaguru, Perumalsamy N.; Naaman, Antoine E.; and Shah, Surendra P.; "Fatigue Behavior and Design of Ferrocement Beams," Proceeding, ASCE, V. 105, ST7, July 1979, pp. 1333-1346.
55. Hawkins, N.M., and Heaton, L. W., "Fatigue Characteristics of Welded

Wire Fabric," Abeles Symposium on Fatigue of Concrete, SP-41, American Concrete Institute, Detroit, 1974, pp. 183-202.

56. Shah, S. P., and Key, W.H., "Impact Resistance of Ferrocement," Proceedings, ASCE, V. 98, ST1, Jan. 1972, pp. 111-123.
57. Guerra, Antonio J.; Naaman, Antoine E.; and Shah, Surendra P., "Ferrocement Cylindrical Tanks: Cracking and Leakage Behavior,": ACI JOURNAL, Proceedings V. 75, No. 1, Jan. 1978, pp. 22-30.
58. Powers, T. C.; Copeland, L. E.; Hayes, J.C.; and Mann, H. M. "Permeability of Portland Cement Paste," ACI JOURNAL, Proceedings V. 51, No.3 Nov. 1954, pp. 285-298.
59. Ruetters, Arthur,; Vidal, E. N,; and Wing, S. P., "An Investigation of the Permeability of Mass Concrete with Particular Reference to Boulder Dam, ACI JOURNAL, Proceeding, V. 31, No. 4 Mar-Apr. 1935, pp. 382-416.
60. Neville, A. M., Properties of Concrete, Pitman Publishers, New York, 1977, pp. 391-398.
61. Klieger, Paul, "Effect of Entrained Air on Strength and Durability of Concrete with Various Sizes of Agregate," Bulletin No. 128, Highway Research Board, Washington, D.C., 1956, pp. 1-19.

62. Lane, R. O., "Abrasion Resistance," Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, STP-169B, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1978, pp. 332-350.
63. Mahaffey, P.I., "Ferrocement," Technical Memorandum, Cement and Concrete Association of Australia, North Sydney, May 1970, 25 pp.
64. "Requirements for the Construction of Ferrocement Boats," Journal of Ferrocement (Bangkok), V. 4, No. 1, Jan. 1975, pp. 14-16.
65. Evers, D. J., Review of "Det Norske Veritas: Requirement for Ferrocement Boats," Journal of Ferrocement (Bangkok), V. 4, No. 2, Feb-Mar. 1975, p. 26.
66. Shah, S. P., "Tentative Recommendations for the Construction of Ferrocement Tanks," Ferrocement - Materials and Applications, SP-61 American Concrete Institute, Detroit, 1979, pp. 103-113.
67. Naaman, Antoine E., "Performance Criteria for Ferrocement," Journal of Ferrocement (Bankok), V. 9, No. 2, Apr. 1979, pp. 75-92.
68. Naaman, Antoine E., "Design Predictions of Crack Widths in Ferrocement," Ferrocement - Materials and Applications, SP-61, American Concrete Institute, Detroit, 1979, pp. 25-42.

69. Balaguru, P. N.; Naaman, A. E.; and Shah, S.P.; "Serviceability of Ferrocement Subjected to Flexural Fatigue," International Journal of Cement Composites (Hornby), V. 1, No. 1, May 1979, pp. 3-9.
70. Kowalski, T. K., "Draft Mortar Specification," Journal of Ferrocement (Bangkok), V. 4, No. 1, Jan. 1975, pp. 29-30.
71. Pama, R. P.; Lee, S. L.; and Vietmeyer, N. D., Editors, "Ferrocement, A Versatile Construction Material: Its Increasing Use in Asia," Report, Workshop on the Introduction of Technologies in Asia, Asian Institute of Technology, Bangkok, Nov. 1974, 106 pp.
72. Evers, J.D., "Survey of Ferrocement Fishing Boats Built in New Zealand," FAO Seminar on the Design and Construction of Ferrocement Fishing Vessels, Wellington, Oct. 1972, 30 ppm. Also, Fishing News, West Byfleet, Surrey.
73. Hagenbach, T. M., "Experience of 300 Commercially Built Craft in More Than 20 Countries," FAO Seminar on the Design and Construction of Ferrocement Fishing Vessels, Wellington, Oct. 1972, 22 pp. Also, Fishing News, West Byfleet, Surrey.
74. Sutherland, W. M., "Ferrocement Boats - Service Experience in New Zealand," FAO Seminar on the Design and Construction of Ferrocement Fishing Vessels, Wellington, Oct. 1972, 14 pp. Also, Fishing News, West Byfleet, Surrey.

75. Smith, R. B. L., et al., "Hermetic Storage of Rice for Trai Farmers," Thai Journal of Agricultural Science (Bangkok), V. 4, No. 3, July 1971, pp. 143-155.
76. Hall, D. W., "Handling and Storage of Food Grains in Tropical and Sub-tropical Countries," Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 1971, p. 181.
77. Sharma, P. C.; Gopalakrishnan, S.; Raman, N.V.; and Kumar, G. V. S., "Small Capacity Ferrocement Bins for Food Storage," Journal of Ferrocement, V. 9, No. 1, Jan. 1979, pp 21-34.
78. "Ferrocement Tanks and Utility Buildings," Bulletin No. CP-10, New Zealand Portland Cement Association, Wellington, 1968, 5 pp.
79. Naaman, A. E., And Shah, S.P., "Evaluation of Ferrocement in Some Structural Applications," Proceedings, 4th IAHS International Symposium on Housing Problems (Atlanta, May 1976). Pergamon Press, Elmsford, 1976, pp. 1069-1085.
80. Castro, J., "Ferrocement Roofing Manufactured on a Self-Help Basis," Journal of Ferrocement (Bangkok), V. 7, No. 1, July 1977, pp. 17-27.
81. Barberio, V., "Cupulas Delgadas de Ferrocemento para Una Instalación Ictica en el Rio Pirino," Revista IMCYC (Mexico, D.F.), V. 13, No. 74 May-June 1975, pp. 20.

82. Romualdi, James P., "Research Needs and Future of Ferrocement" Ferrocemento-Materials and Applications, SP-61, American Concrete Institute, Detroit 1979, pp. 173-177.
83. Bowen, G. L., and Baugh, I.C., "Ferrocement Construction: Topics for Research," The Naval Architect (London), Apr. 1975, pp. 53-56.
84. "Housing Application in Ferrocement," Journal of Ferrocement (Bangkok), V. 11, Jan, 1981, Special Issue, 108 pp.
85. RILEM/ISMES International Symposium on Ferrocement (Bergamo, July 1981), Instituto Sperimentale Modelli e Strutture, Bergamo, Italy, Proceedings edited by G. Oberti and S.P., Shah, 492 pp.

PARTE II

1. Quiñonez De La Cruz, Francisco J, "Bovedas De Ferrocemento De Concreto Liviano De Pomez y De Mortero de Arena De Rio para uso en Vivienda Económica", CII, Universidad De San Carlos de Gutemala, 1981. Tesis.
2. Alfaro Porres, Mario E., "Construcción y Evaluación de Láminas de Ferrocemento", CII, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1983. Tesis.
3. Ocaña M., Pablo, "Estudio Sobre Ferrocemento a base de Pomez", CII, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1979. Tesis.