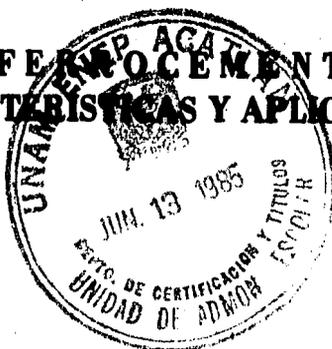




UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
PROFESIONALES ACATLAN

FELIPE ROSALES GUTIERREZ
FE ENFOQUEMENTO:
CARACTERISTICAS Y APLICACIONES



7957658-5

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

FELIPE ROSALES GUTIERREZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

	Pág.
PROLOGO	1
INTRODUCCION	2
Capítulo 1	
ANTECEDENTES HISTORICOS	4
Capítulo 2	
CARACTERISTICAS DE LOS COMPONENTES	13
2.1 Refuerzo	13
2.1.1 Malla de alambre	13
2.1.2 Varillas del armazón	18
2.2 Mortero	20
2.2.1 Cemento	20
2.2.2 Agregados	23
2.2.3 Agua	24
2.3 Aditivos	25
2.4 Recubrimientos	25
Capítulo 3	
PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCION	26
3.1 Distribución del refuerzo	26
3.2 Fases del mortero	30

	Pág.
3.2.1 Preparación	30
3.2.2 Aplicación	30
3.2.3 Curado	35
3.3 Pintura y recubrimiento	37
3.3.1 Tipos de recubrimiento	38
3.3.2 Métodos de aplicación	39
 Capítulo 4	
PROPIEDADES FÍSICAS Y MECANICAS	41
4.1 Resistencia última bajo carga estática	43
4.1.1 Resistencia última a la tensión	43
4.1.2 Resistencia última a la compresión	46
4.1.3 Resistencia última a la flexión	47
4.1.4 Resistencia al cortante	55
4.2 Resistencia al agrietamiento bajo carga estática	56
4.3 Elasticidad y comportamiento carga-deformación	59
4.3.1 Comportamiento carga-deformación en tensión	59
4.3.2 Comportamiento carga-deformación en compresión	61
4.3.3 Comportamiento carga-deformación para flexión	63
4.4 Resistencia bajo carga de fatiga	63
4.4.1 Fatiga a la flexión	64
4.5 Resistencia al impacto	68
4.6 Formación de grietas y filtración	68

	Pág.
4.7 Fluencia y contracción	69
4.8 Durabilidad	72
4.8.1 Deterioración asociada con la matriz de mortero	72
4.8.2 Deterioración asociada con el refuerzo	74
4.9 Resistencia al fuego	77
 Capítulo 5	
APLICACIONES DEL FERROCEMENTO	78
5.1 Aplicaciones marinas	79
5.2 Aplicaciones terrestres	86
5.2.1 Vivienda	86
5.2.2 Industria	91
5.2.3 Agricultura y pesca	95
 Capítulo 6	
DESARROLLO FUTURO DEL FERROCEMENTO	99
6.1 Investigaciones necesarias para el desarrollo del ferrocemento	101
6.2 El futuro del ferrocemento	103
 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105
 BIBLIOGRAFIA	110

PROLOGO

El objetivo del presente trabajo es resaltar la importancia del ferrocemento como material de construcción en nuestro país.

Para el desarrollo de este tema, se ha dividido la investigación en seis capítulos:

El primer capítulo se refiere a los antecedentes históricos, desde su invención hasta nuestros días.

Dentro del segundo capítulo se hace una breve descripción de los materiales empleados en su construcción.

El proceso constructivo del ferrocemento será el tema del capítulo tres.

En el capítulo cuarto se analizan las propiedades mecánicas, las cuales en algunos casos no han sido suficientemente investigadas por lo que se dispone de poca información para poder sugerir fórmulas de diseño aceptables.

Aplicaciones probadas y potenciales, tanto marinas como terrestres, son el objetivo del quinto capítulo.

Por último, en el capítulo sexto, se estudiarán las necesidades de investigación para el desarrollo futuro del ferrocemento.

Al final se formularán las conclusiones y recomendaciones.

I N T R O D U C C I O N

El ferrocemento es un tipo de hormigón armado sumamente versátil hecho de te la metálica, arena, agua y cemento, que posee características singulares de solidez y durabilidad. Puede ser elaborado con un mínimo de mano de obra ca lificada a partir de materiales fáciles de obtener, por lo cual este material es muy adecuado para los países en vías de desarrollo.

Elaborado en la debida forma, el ferrocemento es más durable que la mayor parte de las maderas y más barato que el acero, pudiendo utilizarse en susti tución de estos materiales con usos muy diversos. Al ferrocemento puede dár sele cualquier forma de acuerdo con las necesidades del usuario. Las destre zas implícitas en la construcción a base de ferrocemento se adquieren con ra pidez, e incluyen muchas que son tradicionales en los países en desarrollo. Además se le atribuyen otras ventajas como son: impermeabilidad, resistencia al fuego, facilidad de reparación, ligereza, rapidez de construcción, ca pacidad de resistencia a la tracción y bajo costo.

A pesar de que el ferrocemento se conoce desde hace más de cien años, es considerado actualmente como una innovación en los materiales de construcción, reconociéndosele sus múltiples aplicaciones, tanto potenciales como ya comprobadas, en la industria, la agricultura y la construcción de barcos y viviendas.

Aunque se considera al ferrocemento como una forma especial de concreto reforzado, su comportamiento es tan diferente al de éste en cuanto a su funcionamiento efectivo, resistencia y aplicaciones potenciales, que debe ser clasi ficado como un material separado. En estructuras de ferrocemento racionalmente

diseñadas, el refuerzo consiste en una malla de alambre de diámetro pequeño en las cuales se hacen uniformes la proporción y la distribución del refuerzo al extender las mallas a través del espesor del elemento.

Las mallas de alambre generalmente tienen diámetros de 0.05 a 0.10 cm y separaciones que varían de 0.5 a 2.5 cm; el volumen de la malla varía del 1 al 8% del volumen total del elemento estructural. El espesor de las secciones es de 1 a 4 cm, y el recubrimiento de la capa más alejada del alambre es usualmente de 0.15 a 0.2 cm.

El ferrocemento se utiliza en estructuras de espesores delgados en donde la resistencia y la rigidez se desarrollan mediante la forma del elemento, para lo cual se tiene la ventaja de poderse moldear y construir de una sola pieza.

Ultimamente se han publicado numerosos estudios y ha aumentado la confianza en este material, con el resultado de un gran número de aplicaciones tanto marinas como terrestres.

Por último, es pertinente aclarar que aunque se han usado mallas de fibras de vidrio resistentes al álcali y mallas de fibras vegetales como yute, cáñamo y bambú, este trabajo hablará únicamente de las mallas de alambre de acero que son las más comúnmente usadas.

CAPITULO 1

ANTECEDENTES HISTORICOS

Se tiene conocimiento de que el empleo de la cal, el yeso, y el mortero de cemento natural, se inició aproximadamente en el año 3000 A.C. En aquel entonces, las aplicaciones de estos materiales generalmente se limitaban a la unión de piedras, enyesados o recubrimientos. No obstante, fue hasta la época de los romanos cuando el mortero de cemento natural se utilizó ampliamente como un material estructural.

En todas las antiguas civilizaciones, el concreto era considerado como un material que podría ser usado en forma efectiva trabajando a compresión. Sin embargo, la idea de introducir varillas de fierro dentro del concreto para absorber los esfuerzos de tensión es muy reciente, pues data de la segunda mitad del siglo XIX. En el siglo XVIII, un francés, Soufflot, intentó incrementar la resistencia de las construcciones por medio de varillas de fierro, las cuales se colocaban entre las juntas, enterradas en el concreto. Este intento tuvo un éxito limitado, pues la oxidación de las varillas y las presiones expansivas originadas por los productos de la corrosión, rompieron las juntas.

Colocar un refuerzo dentro del concreto para formar lo que nosotros conocemos como concreto reforzado, es una idea que se les ocurrió casi simultáneamente a tres personas. Joseph Monier, jardinero francés, incorporó una malla de varillas de fierro al concreto, para la fabricación de grandes mace-

tas, en 1849. Un inglés, Wilkinson, construyó traveses de concreto reforzado para edificios, colocando cables en el lado de la viga que estaba sujeto a tensiones. Finalmente, el francés J. L. Lambot construyó un bote de remos de concreto, en el cual el refuerzo era una especie de red de alambre que tenía varillas delgadas entrelazadas. En los Estados Unidos, por esa época, Thaddeus Hyatt se encargó de realizar extensas pruebas en vigas y losas de concreto reforzado, contribuyendo grandemente en la racionalización de la teoría del concreto reforzado.

No obstante, es el trabajo de Lambot el que tiene mayor importancia para nosotros, no sólo porque es una de las primeras aplicaciones del concreto reforzado, sino debido a que es una forma de ferrocemento. Lambot construyó varios botes de remos, maceteros, asientos y otros artículos con un material que llamó "Ferciment" en una patente que obtuvo en 1847. La patente dice, en parte, lo siguiente:

Mi invención es un producto nuevo que puede reemplazar a la madera (en pisos, recipientes para agua, maceteros, etc.), la cual está sujeta a daños por el agua y la humedad. La base del nuevo material es una malla metálica de alambre o de varillas interconectadas para formar un emparrillado flexible. Moldeo esta malla en forma similar al artículo que quiero crear, después utilizo cemento hidráulico o una brea bituminosa o una mezcla para rellenar las juntas.

Los botes de remos de Lambot se encuentran actualmente en el museo Brignoles, en Francia. Estos barcos se construyeron de 3.66 m de largo y 1.22 m de ancho con espesores delgados de 2.5 a 3.8 cm, reforzados con emparrillado y malla de alambre. Muchos constructores de botes siguieron las técnicas de Lambot durante la segunda mitad del siglo XIX, destacando entre ellos Gabellini y Boon.

Durante su período inicial de desarrollo, los holandeses también construyeron barcazas de mortero reforzado de 50 a 60 toneladas de capacidad para el transporte de cenizas y desperdicios por los canales.

A principios de 1900 se construyeron algunos pequeños botes de motor y barcos de río, incluyendo la primera embarcación de concreto que utilizaría el gobierno de Estados Unidos, a la que se dió el nombre de "concreto". La embarcación tenía 5.5 m de largo y un casco de 1.9 cm de espesor y lo usó la U. S. Naval Reserves en los Grandes Lagos. Tenía una velocidad de crucero de 10 nudos.

Durante la Primera y Segunda Guerra Mundial se prestó especial atención al uso del concreto en la construcción de barcos, y esto se debió únicamente a la escasez de materiales tradicionales.

A principios de los años cuarenta, un notable ingeniero-arquitecto italiano, Pier Luigi Nervi, resucitó la idea original de Lambot al observar que reforzando el concreto con capas de malla de alambre se obtenía un material que presentaba las características mecánicas de un material homogéneo equivalente y que demostraba tener gran resistencia al impacto. A través de una serie de pruebas el profesor Nervi estableció las características preliminares del ferrocemento. Procedió a diseñar y construir diversas techumbres que se conservan hasta nuestros días como modelos racionales y estéticos del diseño estructural. Después de la Segunda Guerra Mundial, Nervi utilizó este material para construir barcos de poco tonelaje, siendo el mayor de ellos el velero de motor "Irene" de 165 toneladas con un casco de 3.6 cm de espesor y con un peso 5% menor que el de un casco similar de madera, con un costo -- 40% inferior en esa época.

El ferrocemento fue aceptado por el Registro Naval Italiano y por la Armada Italiana, por lo que durante la Segunda Guerra Mundial se construyó cierto número de navíos.

Recientemente se ha tenido conocimiento de que los chinos habían estado construyendo barcos de ferrocemento mucho antes de la Segunda Guerra Mundial. Desde esa época han construido miles de barcos de ferrocemento en sustitución de barcos de madera y sampanes en distintas comunidades, entre las cuales la más conocida es la de la Comuna Popular de Horse Bridge en la provincia de Shanghai.

Nervi también fue el primero en emplear el ferrocemento en edificios. En 1947 construyó con ferrocemento una pequeña bodega. Posteriormente techó la alberca de la Academia Naval Italiana con una cubierta de 15 m de diámetro y después la famosa Sala de Exhibición de Turín; sistema de techado con un claro de 91 m. En ambas estructuras se usó ferrocemento como uno de los elementos estructurales; las nervaduras y superficies exteriores son de concreto reforzado.

A pesar de la evidencia de que el ferrocemento era un material de construcción adecuado y económico, no logró una aceptación general sino hasta principios de la década de los sesenta, en el Reino Unido, Nueva Zelanda y Australia. Desde entonces, dueños de yates en muchos países han construido miles de embarcaciones de ferrocemento y principalmente obras aisladas de autoconstrucción.

En 1958 se construyó en la Unión Soviética la primera estructura de ferrocemento con techo de bóveda sobre un centro comercial en la calle Reshetnikov en Leningrado. Desde entonces, en diferentes partes de la URSS se han cons-

truido con ferrocemento alrededor de 108 millones de pies cuadrados (10 millones de metros cuadrados) de techos. La mayor parte de estas estructuras tienen claros libres desde 24 a 30 m con techos de ferrocemento de aproximadamente 1 cm de espesor. Estas gigantescas estructuras se usan en auditorios, salas de exhibición, centros comerciales, restaurantes y bodegas para productos y maquinaria agrícola.

En 1965 el yate estadounidense "Awahnee" de ferrocemento, de 16 m, construido en Nueva Zelanda, navegó alrededor de la Tierra sin contratiempos serios aunque se encontró con fuertes vientos de 70 nudos, chocó con un témpano de hielo y fue embestido por un yate de casco de acero. Otros barcos de ferrocemento han demostrado ser igualmente prácticos, y su número continúa aumentando considerablemente. En 1971 la Ferrocement Marine Construction Ltd. - construyó en Hong Kong un barco pesquero de ferrocemento llamado "Rosalyn I", con un largo total de 26 m y desplazamiento de 250 toneladas, considerado como el mayor barco pesquero de ferrocemento del mundo.

En 1978 se construyó en Leningrado una estación de superficie del metro de 43.5 x 160 m con una cubierta continua de ferrocemento. La Fibersteel Company de West Sacramento, en Estados Unidos, construiría "Chrysopolis", un casco de barco de ferrocemento de 75 m de largo y 23 m de ancho que, de tener éxito, sería el mayor casco de barco construido con este material.

El señor Morley W. Sutherland, conocido como el pionero de la construcción moderna de barcos de ferrocemento, ha desempeñado un papel importante en el desarrollo de la industria de construcción de barcos de Nueva Zelanda. Sus actividades en la construcción de cascos de ferrocemento comenzaron en 1959 cuando convirtió dos sacos de cemento y cierta cantidad de malla de alambre hexagonal en un barco de recreo para su familia en Whangarwin, North Beach,

Nueva Zelanda.

Formó una compañía llamada Ferrocement (N. Z.) Ltd., que construye barcos - pesqueros de ferrocemento. Durante sus 15 años de experiencia práctica en este campo, Sutherland participó en la construcción de aproximadamente 50 barcos. El barco de ferrocemento del señor Sutherland llamó la atención de muchos neozelandeses y, en muy poco tiempo, más y más personas comenzaron a construir sus barcos de recreo en sus patios. El interés por el ferrocemento fue tan grande que en 1968 Richard Hartley formó la New Zealand Ferro Cement Marine Association (NZFCMA) con el apoyo de las personas de Auckland, quienes tenían interés en el sostenido desarrollo del ferrocemento. El propósito principal de la Asociación era mejorar, fomentar y alentar la construcción marina a base de ferrocemento. La Asociación publicó una cartilla de información que posteriormente se convirtió en el Journal of Ferrocement.

Mientras tanto, el Departamento de Pesca de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) mostró interés en el uso del ferrocemento para la construcción de barcos pesqueros en los países en desarrollo. El proyecto de construcción de barcos de ferrocemento se inició en Asia, Africa, el Pacífico y América Latina. Desde que se empezaron a construir embarcaciones de ferrocemento en 1968, la FAO ha proporcionado dirección técnica a muchos países en desarrollo, incrementando la producción de éstos. En 1972 la FAO patrocinó un Seminario Internacional sobre Diseño y Construcción de Barcos Pesqueros de Ferrocemento, en Wellington, Nueva Zelanda. Este seminario reunió a reconocidas autoridades en el campo del ferrocemento de todo el mundo. El propósito del seminario era recabar datos - actualizados sobre el ferrocemento en cuanto a experiencia, métodos de construcción, costos, dimensiones, experiencias de servicio y revisión del esta-

do actual de la tecnología de construcción de barcos, y del mismo material en sí. Se presentaron artículos técnicos sobre varios temas de autoridades seleccionadas y se estableció la base para un excelente intercambio de conocimientos y experiencias sobre el diseño y construcción de barcos de ferrocemento.

En 1972 la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos llevó a cabo una reunión de expertos para discutir respecto al uso del ferrocemento en países en desarrollo, bajo la dirección del profesor James P. Romualdi, de la Universidad Carnegie-Mellon, en Estados Unidos. En esta reunión participaron personas experimentadas en investigación y aplicaciones del ferrocemento y otras que estaban familiarizadas con las necesidades de construcción en los países en desarrollo. Esta reunión se concentró en tres tareas específicas:

1. Evaluación del estado actual de la tecnología del ferrocemento como material de ingeniería, para poder identificar y conocer sus propiedades y características.
2. Evaluación de las principales áreas de aplicación tanto en tierra como en agua.
3. Desarrollo de recomendaciones específicas para fomentar el uso del ferrocemento de manera lógica y efectiva.

El informe de la reunión publicado por primera vez a principios de 1973, ha tenido un impacto tremendo sobre las aplicaciones del ferrocemento. Identificó al ferrocemento como un material de tecnología apropiada inadvertida, con amplio potencial de aplicaciones especialmente en los países en desarrollo. Como resultado de este informe, muchas personas para quienes era desco-

nocido se han dedicado a utilizarlo con éxito considerable.

A principios de 1974, el American Concrete Institute (ACI) estableció El Comité 549 sobre Ferrocemento, para revisar el estado actual de la tecnología y para formular un reglamento de práctica para este material.

Un "Workshop on Introduction of Technologies in Asia-Ferrocement, a Case - Study" (Taller de introducción a las tecnologías en Asia) patrocinado por el Asian Institute of Technology (AIT) y la U. S. National Academy of Sciences (NAS) tuvo lugar en Bangkok, Tailandia, en noviembre de 1974. Se analizó la utilidad de la tecnología del ferrocemento especialmente para los países en desarrollo. Este taller también reunió a ingenieros, científicos, administradores y hombres de negocios y les dio la oportunidad de intercambiar puntos de vista sobre sus experiencias con el ferrocemento. El taller recomendó que la proposición del NAS de establecer un Servicio Internacional de Información sobre el Ferrocemento, se aplicara mundialmente para recabar, procesar y difundir información sobre ferrocemento. Más tarde, en octubre de 1976, se estableció el International Ferrocement Information Center, IFIC - (Centro Internacional de Información sobre Ferrocemento) en el Asian Institute of Technology en Bangkok, Tailandia, con el apoyo del International Development Research Center, IDRC (Centro Internacional para el Desarrollo de Investigaciones) de Canadá y de la United States Agency for International Development, USAID (Oficina del Desarrollo Internacional de Estados Unidos) a través de su Misión Regional de Desarrollo Económico del Sudeste de Asia, en Bangkok y del gobierno de Nueva Zelanda.

El Journal of Ferrocement, revista que originalmente fue publicada en Nueva Zelanda por la New Zealand Ferro Cement Marine Association (NZFCMA) se cedió

al Centro Internacional de Información sobre Ferrocemento. Hoy en día esta revista es el principal medio de difusión de dicho centro, en lo que respecta a información sobre ferrocemento.

Actualmente es obvio que el ferrocemento, versátil material de construcción, tiene brillantes perspectivas y definitivamente encontrará mayores aplicaciones en un futuro cercano.

C A P I T U L O 2

CARACTERISTICAS DE LOS COMPONENTES

Un tablero de ferrocemento es, generalmente, de sección delgada y consiste en capas de malla de alambre impregnadas con una muy rica mezcla (elevada - proporción de cemento en relación con la arena) de mortero de cemento y curada durante un período especificado. A continuación se hará una breve descripción de los materiales empleados en la fabricación del ferrocemento.

2.1 Refuerzo

Durante su vida, una estructura está sujeta a muchos golpes, torceduras y - dobleces que dan como resultado grietas y fracturas, a no ser que se introduzca suficiente acero de refuerzo para absorber estos esfuerzos. El grado a que se reduzca esta fracturación de la estructura depende de la concentración y dimensiones del refuerzo ahogado. El comportamiento mecánico del ferrocemento depende en gran parte del tipo, cantidad, orientación y resistencia de la malla y de la varilla de refuerzo. Los principales tipos de malla y de varilla que se utilizan actualmente se describen a continuación.

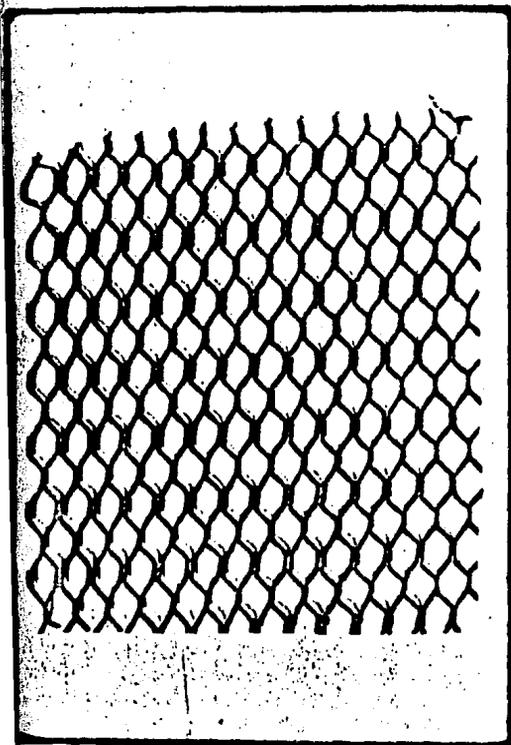
2.1.1 Malla de alambre

Uno de los componentes esenciales del ferrocemento es la malla de alambre. Casi en cualquier parte se dispone de diferentes tipos de mallas. La malla generalmente consiste en alambres delgados, ya sean entretrejidos o soldados, pero el requisito principal es que sea fácil de manejar y, si fuera necesario, lo suficientemente flexible para poderla doblar en las esquinas -

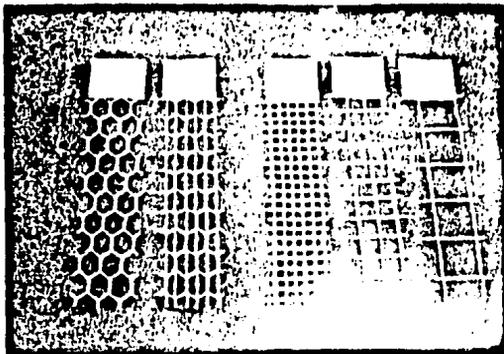
agudas. La función de la malla de alambre y de la varilla de refuerzo es, en primer lugar, actuar como marco para dar forma y para sostener el mortero en estado fresco. Cuando endurece el mortero, la función de la varilla es absorber los esfuerzos de tensión sobre la estructura, que el mortero - por sí solo no podría soportar.

Malla de alambre hexagonal. Esta es la malla más popular y más comúnmente usada y está disponible en la mayor parte de los países. Es la más económica y la de manejo más fácil. Se le conoce comúnmente como malla de alambre de gallinero y se fabrica con alambre estirado en frío, que generalmente se entreteje en patrones hexagonales. La malla utilizada en el ferrocemento tiene por lo general un diámetro de 0.05 a 0.10 cm, y las aberturas de la malla varían de 1 a 2.5 cm. En la mayor parte de los casos no es necesario que la malla sea de alambre soldado. Las mallas galvanizadas estándar, galvanizadas después de tejidas, son adecuadas. Es excelente la combinación de alambre no galvanizado con varilla de acero no galvanizada, pero el problema de la oxidación por intemperismo limita su uso.

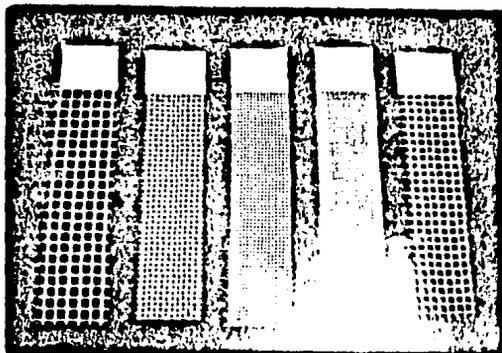
Malla de alambre soldado. En esta malla generalmente se utiliza alambre de calibre dieciocho o diecinueve. Este alambre está hecho de acero con resistencia a la tensión, baja o mediana, y es mucho más rígido que el que se emplea en las mallas hexagonales. Algunos constructores prefieren este tipo de malla ya que puede moldearse más fácilmente, conformándose a las curvas deseadas de la estructura, produciendo líneas más suaves. Desafortunadamente, la malla de alambre soldado tiene la posibilidad de presentar puntos débiles en las intersecciones, que resultan de una soldadura inadecuada durante su fabricación. Esta deficiencia puede imponer serias limitaciones aun cuando se emplee un alambre de acero de alta resistencia



a). Malla de metal desplegado



b). Mallas hexagonales y mallas cuadradas soldadas.



c). Mallas cuadradas entretrejidas.

Fig. 2.1 Tipos de malla de refuerzo comunmente empleados en ferrocemento.

para lograr una mejor malla. Las pruebas han demostrado que, en muchos casos, las mallas hechas de alambre de mejor calidad tienen mayor tendencia a fallar que otros tipos de mallas, cuando las intersecciones están sujetas a carga. Por lo general la malla de alambre soldado, al igual que otros tipos de malla, se galvaniza después de soldada.

Malla entretejida. En este tipo de malla, los alambres están simplemente entretejidos al tamaño de la cuadrícula deseada y no están soldados en las intersecciones. Los alambres de la malla no están perfectamente derechos y existe cierto grado de ondulación. No obstante, las pruebas indican que esta malla se comporta tan bien o mejor que las mallas soldadas o las hexagonales. Uno de los problemas con esta malla es que es difícil mantenerla en una posición, pero al estirla, fácilmente se somete a las curvas deseadas.

Malla de metal desplegado. Se le conoce también como marco metálico de yesero. Se forma cortando una hoja delgada de metal desplegado para hacer aberturas en forma de diamante. El proceso de fabricación es menos laborioso que el método usado para fabricar la malla hexagonal o la malla soldada. Se han realizado investigaciones respecto a la posibilidad de emplear como refuerzo metal desplegado como una alternativa de la malla de alambre. No parece haber desventajas importantes en el uso del metal desplegado, y de hecho existen ventajas inherentes tales como una buena adherencia mecánica y facilidad de colocación. Una pequeña desventaja de esta malla es que tiende a abrirse debido a la acción de "tijera" de las aberturas en forma de diamante. Obviamente existe un límite en cuanto al tamaño y al peso del metal desplegado que puede usarse para evitar esta acción de "tijera".

Pruebas recientes con un material más ligero con aberturas de 2,54 cm mostraron resultados más satisfactorios.

Malla Watson. Fue diseñada por Mesh Industries Ltd., en Nueva Zelanda. La malla consiste en alambres rectos de alta resistencia y en un alambre ondulado transversal que mantiene en posición a los primeros. Los alambres de alta resistencia están colocados en dos niveles paralelos uno al otro, y están separados por alambre de acero dulce puesto en forma transversal. Solamente el alambre ondulado de unión excede su límite de elasticidad y sólo en la proximidad de la ondulación. Esto significa que una vasta proporción del alambre está recto, sin ondulaciones, presiones, golpes o soldaduras. El resultado es una malla muy resistente que no está sujeta a ruptura durante el manejo o por esfuerzos en el mortero fraguado. Esta malla permite una completa flexibilidad y libertad de forma. Una de las características más atractivas de la malla Watson, es la posibilidad de ahorrar de manera significativa en la mano de obra, que es esencial, por tres razones:

1. Debido a su forma geométrica y a sus alambres de alta resistencia, se reduce la necesidad de amarrar, remover, enlazar o secundir, así como el golpeteo del tablero necesario para el acabado final del concreto aparente.
2. Se reduce el tiempo de aplicación de la malla, ya que una capa es equivalente a varias capas de otras mallas.
3. Frecuentemente puede eliminarse la colocación de varillas de acero del armazón debido a la alta resistencia de la malla.

2.1.2 Varillas del armazón

El acero del armazón, como su nombre lo indica, se emplea generalmente para hacer el armazón de la estructura sobre la cual se colocan las capas de malla. Tanto las varillas longitudinales como las transversales se distribuyen uniformemente y se amoldan a la forma deseada. Las varillas se separan lo más posible hasta una distancia de 30 cm, donde no son tratadas como refuerzo estructural, sino que frecuentemente se les considera como varillas de separación para los refuerzos de malla. En algunos casos el acero del armazón se separa a una distancia de 7.5 cm de centro a centro, actuando así como un elemento principal del refuerzo. Esto último se realiza en estructuras altamente esforzadas.

En la construcción con ferrocemento se usan varillas de acero de varias clases. Su resistencia, acabado superficial, recubrimiento de protección y tamaño, afectan su comportamiento de refuerzo del compuesto. Por lo general, tanto para la dirección longitudinal como para la transversal, se usan varillas de acero dulce.

Algunos casos requieren el empleo de varillas de alta resistencia y alambre retorcido pretensado. El tamaño de la varilla varía de 0.42 a 0.95 cm (0.165 a 3/8 de pulgada) siendo el más común el de 0.63 cm (1/4 de pulgada). Los tableros de ferrocemento con varillas longitudinales y transversales de esta medida tienen 2.54 cm de espesor aproximadamente. Puede usarse una combinación de varillas de diferentes medidas, con las varillas de menor diámetro en la dirección transversal.

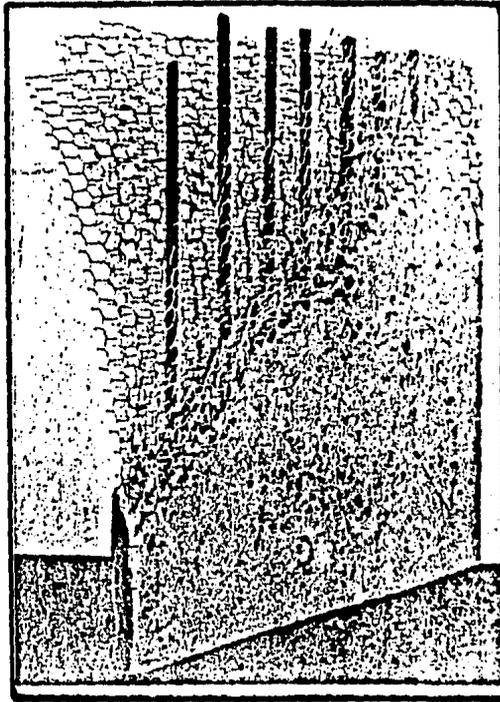


Fig. 2.2 Armado típico de ferrocemento.

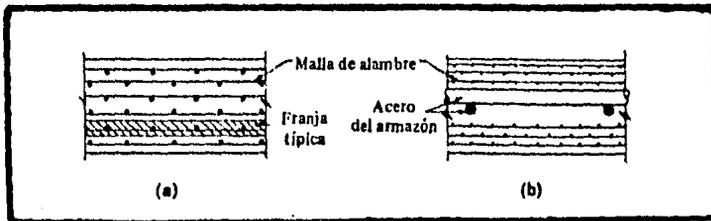


Fig. 2.3 Sección transversal de una losa de ferrocemento.
 a). Sección sin varillas de refuerzo.
 b). Sección con armado de refuerzo.

2.2 Mortero

El material adhesivo o matriz en el ferrocemento lleva el nombre de mortero. Normalmente está hecho de cemento Portland y arena común de sílice. - Las propiedades del mortero se rigen por el tipo y calidad de los materiales que lo constituyen, la proporción en que están combinados, sus condiciones de preparación y factores ambientales.

Son muchas las variables que pueden afectar las propiedades del producto final. Los requisitos generales para elementos de ferrocemento son: que - tengan resistencia a la compresión, impermeabilidad, dureza y resistencia - al ataque químico, lo más elevadas posibles y, tal vez el factor más importante de todos, que su consistencia se mantenga uniforme, compacta, sin huecos, detrás de las concentraciones del refuerzo y de las mallas. La resistencia del mortero es inversamente proporcional a su relación agua/cemento, en tanto que su trabajabilidad es directamente proporcional a la cantidad de agua utilizada. Como por lo general diversas propiedades del mortero - están relacionadas con su resistencia a la compresión, es obvio que el uso excesivo de agua en la mezcla, para facilitar el colado del mortero, afecta adversamente a la mayor parte de otras propiedades esenciales. En esta situación debe llegarse a un entendimiento adecuado para obtener un producto final satisfactorio.

2.2.1 Cemento

En el sentido más amplio, el cemento puede describirse como un material con propiedades de adherencia y cohesión que lo hacen capaz de aglutinar fragmentos minerales en una masa compacta.

Existen diversos tipos de cemento disponibles comercialmente, de los cuales el cemento Portland es el más conocido y de más fácil adquisición. Los cementos de la variedad Portland, producidos actualmente, son muy adecuados para satisfacer los propósitos de la construcción con ferrocemento.

Portland Tipo I. No se recomienda para estructuras que pueden estar sujetas a fuertes ataques de sulfatos, así como a elevaciones excesivas de temperatura debido a hidratación. Frecuentemente se utiliza en la construcción de barcos de ferrocemento en climas calientes, ya que no genera tanto calor como otros tipos de cemento durante la hidratación. Hasta ahora, los cementos Portland ordinarios formulados para condiciones bajas de sulfato, han tenido un comportamiento satisfactorio en embarcaciones de ferrocemento. Sin embargo, es posible que esto se deba al uso de pinturas epóxicas protectoras.

Portland Tipo II. A este tipo de cemento también se le conoce como cemento modificado. El uso de este cemento proporciona resistencias iniciales bajas y resistencias últimas más altas, dando una estructura de gel más denso.

Portland Tipo III (de endurecimiento rápido). Adquiere su resistencia más rápidamente y se elige cuando se requiere de una resistencia inicial alta. Es obvio que el cemento de endurecimiento rápido que muestra un alto nivel de desarrollo de calor durante la hidratación en construcciones masivas, no debe tener un efecto perjudicial cuando se utiliza en secciones delgadas de ferrocemento. Por otra parte, en las construcciones a bajas temperaturas el uso de cemento con un alto nivel de liberación de calor, puede ser una salvaguarda satisfactoria para el daño producido por las heladas.

El uso de un cemento de endurecimiento rápido puede crear problemas en un clima caliente debido a una acelerada velocidad de fraguado inducida por la temperatura del aire.

Portland Tipo V (resistente a los sulfatos). Se recomienda principalmente para la construcción con ferrocemento en ambientes marinos y en estructuras susceptibles al ataque de los sulfatos. Tiene un tiempo de fraguado medio y, por lo tanto, no presionará al constructor para apresurar la obra durante el aplanado, lo que tendría como resultado una sección pobremente compactada. Sin embargo, debido a los requisitos especiales para la composición de las materias primas usadas en su fabricación, este tipo de cemento por lo general no puede producirse a bajo costo.

Portland de escoria de alto horno. Frecuentemente se recomienda para las construcciones marinas de ferrocemento, pero su empleo es muy limitado ya que no está disponible en abundancia. Este tipo de cemento se hace moliendo juntos clinker de cemento Portland y escoria granulada de alto horno. Las propiedades resultantes del cemento dependen, en gran parte, de las características de la escoria. El bajo calor de hidratación de este cemento, junto con un nivel moderadamente bajo de desarrollo de resistencia, puede dar lugar a daños por heladas, por lo que su uso no se recomienda en climas fríos. Tiene ventajas especiales para los constructores con ferrocemento; su baja velocidad de fraguado da un mayor margen para trabajar el mortero con el acero de refuerzo y efectuar el acabado. Asimismo, presenta una elevada resistencia a los sulfatos.

Portland puzolánico. Se obtiene al moler juntas o combinar mezclas de cemento Portland y puzolana. Por regla general, los cementos Portland puzo-

lánicos adquieren su resistencia muy lentamente y requieren curarse durante un tiempo comparativamente largo, pero su resistencia última es aproximadamente la misma que la del cemento Portland ordinario. Este tipo de cemento muestra buena resistencia al ataque de los sulfatos y otros agentes destructivos, y es frecuentemente recomendado por expertos en ferrocemento. - Otras ventajas en el empleo de este cemento son su precio competitivo en comparación con el del cemento Portland y su bajo nivel de calor de hidratación.

2.2.2 Agregados

Agregado es el término dado al material inerte disperso dentro de la pasta de cemento. Este material inerte ocupa del 60 al 70% del volumen del mortero. Por lo tanto, los agregados utilizados para la producción de mortero de alta calidad, para estructuras de ferrocemento, deben ser fuertes, impermeables y capaces de producir una mezcla suficientemente trabajable con una relación agua/cemento mínima para lograr la penetración apropiada en la malla. El agregado normalmente empleado es arena natural, que puede ser una mezcla de muchos tipos de material tales como sílice, roca basáltica, piedra caliza o aun el coral blando. Debe tenerse mucha precaución en la selección de dichas arenas, ya que si son blandas pueden verse seriamente afectadas por la abrasión y reacciones químicas. Un material poroso permitirá la entrada de humedad dentro de secciones muy delgadas afectando la durabilidad y el comportamiento estructural del mortero.

La granulometría de las partículas de arena es importante y debe cumplir, en lo posible, con ciertas especificaciones. Investigaciones recientes han demostrado que no hay efectos sobre la resistencia a la tensión del fe

ferrocemento debidos a variaciones en la granulometría de la arena, o en el volumen y tipos de la misma. Por otra parte, la resistencia a la compresión, que depende principalmente de las características del mortero, sí es sensible a la variación de los tipos de arena.

La experiencia actual nos demuestra que la arena que contiene sílice dura - angulosa, partículas de roca, arena volcánica y de mar, es adecuada, pero no debe tener un exceso de partículas finas. Los desperdicios orgánicos, - el barro, el limo y los polvos finos que no se adhieren al mortero, reducen la resistencia del ferrocemento y deben descartarse. Se han realizado investigaciones en muros de ferrocemento ligero, utilizando espuma de escoria de alto horno pasándola a través de un tamiz (0.48 cm), en lugar de arena, en un mortero de cemento. Los resultados de las pruebas demostraron que - este agregado parece ser de gran valor, pero que se necesitan investigaciones adicionales para llegar a métodos adecuados de diseño.

2.2.3 Agua

La calidad del agua para mezclar el mortero es de vital importancia para el ferrocemento endurecido resultante. Las impurezas del agua pueden interferir en el fraguado del cemento y afectar adversamente la resistencia o provocar el manchado de la superficie, y asimismo ocasionar la corrosión del - refuerzo. Deben tomarse las precauciones necesarias para eliminar las impurezas del agua. Se considera nociva la presencia de barro, lama, ácidos, sales solubles y materiales vegetales en descomposición. En ningún caso debe usarse agua de mar para mezclar el mortero, ya que aumentará el riesgo de corrosión de la malla y del refuerzo. Por lo general, el agua de los - servicios públicos está considerada como satisfactoria y no requiere nin-

gún tratamiento adicional.

2.3 Aditivos

Generalmente se usan aditivos para alterar o mejorar una o más de las propiedades del mortero. La mayor parte de los aditivos se emplea para mejorar una o más de las propiedades del mortero. La mayor parte de los aditivos se emplea para mejorar la trabajabilidad, para reducir la exigencia de agua y para prolongar el fraguado.

Puesto que los efectos específicos producidos por los diversos tipos de aditivos pueden variar con las propiedades de los otros ingredientes del mortero, es necesario hacer pruebas previas con diferentes tipos de aditivos antes de intentar recubrir las estructuras de ferrocemento. La cantidad de aditivos representa, generalmente, sólo una fracción de 1% del peso del cemento en la mezcla, por lo cual es indispensable el empleo de equipo confiable de medición.

2.4 Recubrimientos

Por lo general, las estructuras de ferrocemento no necesitan protección alguna, a no ser que se sometan a fuertes ataques químicos que dañen la integridad estructural de sus elementos. Una superficie ya aplanada puede admitir una buena capa de pintura. En estructuras terrestres, se aplica a la superficie pintura ordinaria para mejorar su apariencia. Las estructuras marinas necesitan protección contra la corrosión y se ha encontrado que los recubrimientos de vinilo y epóxico son los mejores, dentro del tipo orgánico.

C A P I T U L O 3

PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCION

La construcción con ferrocemento, a diferencia de otras construcciones complejas, requiere un mínimo de trabajo especializado y utiliza materiales fácilmente disponibles.

Debe ponerse especial atención al control de calidad de la construcción, ya que de otra manera se alterarán los propósitos de esta técnica. La habilidad en los procedimientos de construcción con ferrocemento se adquieren rápidamente, y el requisito de control de calidad de la fabricación se logra bajo la supervisión de una persona experimentada, aunque la mano de obra no sea calificada. Entre otras ventajas, la más importante es que puede fabricarse cualquier forma deseada que se ajuste a las necesidades del usuario.

3.1 Distribución del refuerzo

En estructuras marinas sujetas a grandes esfuerzos, como barcos y barcas, la varilla de acero, al igual que la malla de alambre, están consideradas como los elementos del refuerzo que proporcionan resistencia y rigidez estructural en tanto que, en la mayor parte de las estructuras terrestres, se considera a la malla de alambre como el refuerzo principal.

Las varillas y la malla de alambre deben distribuirse uniformemente y moldearse a la forma deseada. El contenido de acero en el ferrocemento varía casi desde 1 hasta 8% de el volumen. En estructuras altamente reforzadas -

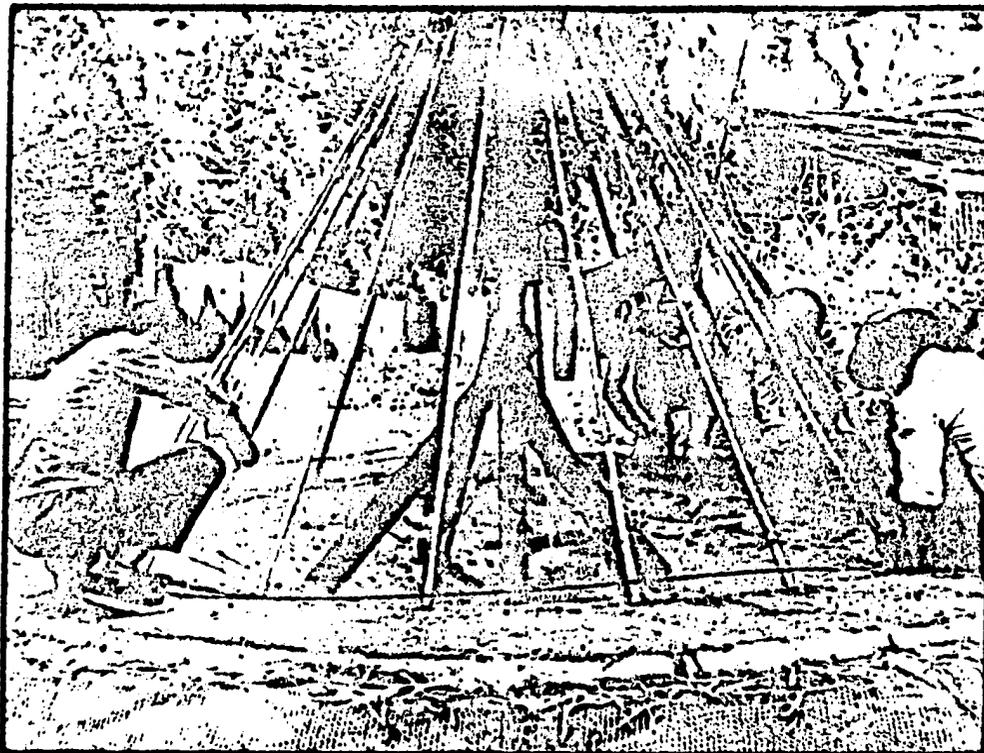


Fig. 3.1 Forma y distribución de las varillas de refuerzo en un silo. La malla que parte de la base se integra a los muros.

la distribución de las varillas de acero y de la malla debe hacerse de tal manera que permita la adecuada penetración del mortero, dando como resultado un material denso, libre de huecos. La malla de refuerzo debe estar firmemente soldada o sujeta de alguna forma, para que se mantenga en su posición original durante la aplicación del mortero y el vibrado.

Generalmente la abertura de las varillas de acero varía desde 7.6 cm hasta 30 cm, dependiendo del tipo de estructura. Los constructores de barcos - usualmente recomiendan una abertura de 7.6 cm, en tanto que en estructuras tales como tanques para agua, silos, etc., en las cuales las varillas no se consideran como refuerzo estructural, pueden tener una mayor abertura. Las varillas en las uniones generalmente se amarran con alambre de acero, pero en algunas se hacen uniones soldadas si se cuenta con el equipo necesario.

La malla de alambre se coloca tanto al lado interior como al exterior de las varillas de acero. El número de capas varía desde dos hasta ocho, dependiendo del diseño. El amarrado de las mallas y las varillas se hace con alambre galvanizado, en intervalos de 15 a 30 cm. Las mallas de alambre hexagonal y las de metal desplegado resisten mayores cargas en dirección longitudinal que en dirección transversal. lo que indica la dirección conveniente de colocación de la malla, es decir, paralela a la dirección del esfuerzo mayor. Sin embargo, si se coloca la malla en dos direcciones, alternadamente, proporciona más o menos material isotrópico y constituye una práctica común en la actualidad.

Es importante dejar que la malla se acomode por sí misma en cuanto sea posible, aunque esto signifique un mayor traslape en algunas partes. En todos

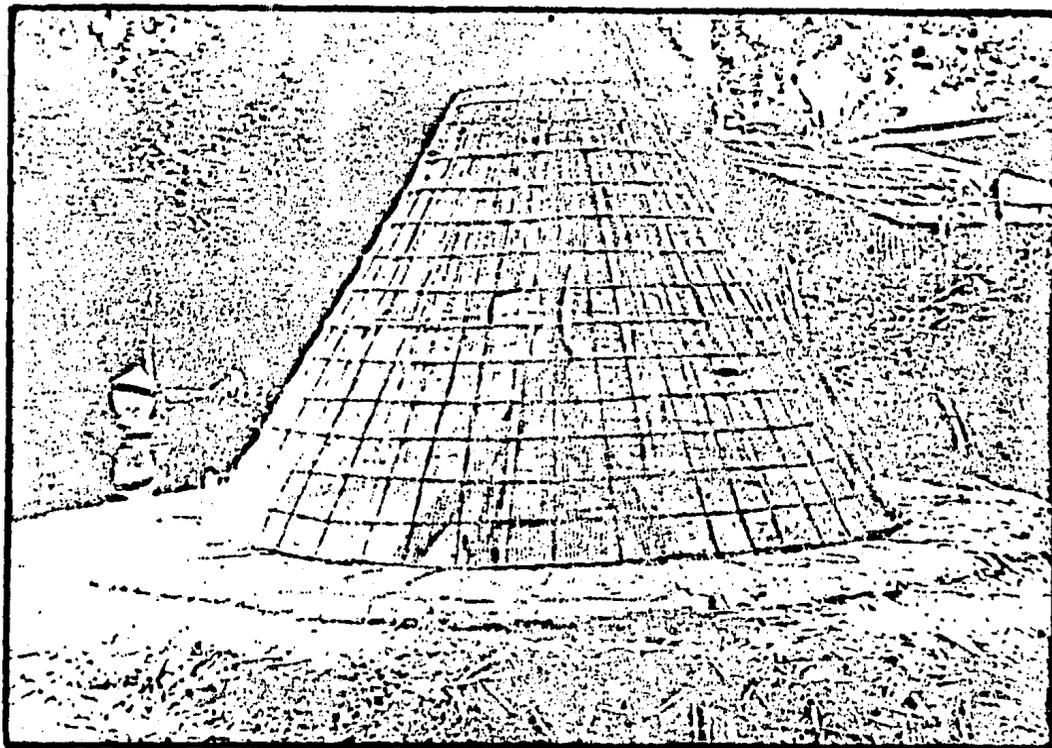


Fig. 3.2 El marco está terminado, con una capa de malla en la superficie exterior y otra en la interior. La malla y las varillas de refuerzo, tanto verticales como horizontales, se unen entre si con tramos cortos de alambre.

los casos debe mantenerse una longitud mínima de traslape de 5 cm.

3.2 Fases del mortero

3.2.1 Preparación

El mezclado del mortero debe hacerse en proporciones adecuadas para lograr la resistencia requerida de diseño. Las proporciones de la mezcla están en relación con el peso; la proporción de cemento-arena generalmente varía de 1 parte de cemento por 1.5 a 2 partes de arena. La relación agua/cemento debe mantenerse lo más baja posible (entre 0.35 y 0.55, en peso), para darle al material calidad y trabajabilidad consistentes.

Experimentalmente se ha demostrado que en la mayor parte de los casos el mezclado manual es satisfactorio si se hace apropiadamente. Pero para estructuras grandes y elementos fabricados en planta se recomienda el uso de una revoladora horizontal de aspas de paleta, para obtener una mezcla de alta calidad. En la práctica, la arena y el cemento se mezclan apropiadamente y después se les agrega la cantidad necesaria de agua.

3.2.2 Aplicación

Con frecuencia se considera que la aplicación del mortero es la fase más crítica de toda la técnica de construcción del ferrocemento. Antes de comenzar a aplicar el mortero a una estructura, debe verificarse que todas las varillas y las mallas estén en posición apropiada. Los refuerzos que se utilicen deben estar libres de rebaba de laminado, grasa y otros contaminantes. Deben cepillarse antes de comenzar el trabajo de aplicación del mortero.

La aplicación del mortero a mano ha demostrado ser el método más satisfactorio. Se utilizan los dedos y llanas para aplicar el mortero sobre la estructura formada por la malla de alambre. Debido a lo compacto de la mezcla, el mortero permanece en su posición después de colocado. No se necesita cimbrado, sin embargo, en algunos casos puede usarse una tabla de madera o una placa de acero como apoyo temporal del mortero y quitarse inmediatamente después de colocar y vibrar el mortero.

Existen diferentes técnicas para la aplicación del mortero, elaboradas especialmente en la industria de la construcción de barcos.

Técnica en una etapa. Se refiere a una sola aplicación monolítica del mortero para rellenar la malla, dando el acabado tanto interior como exterior al mismo tiempo, antes de que se inicie el fraguado del mortero.

La práctica recomendada es forzar el mortero de afuera hacia adentro de la malla y posteriormente darle un acabado liso. Pero esta técnica es muy difícil y requiere de una considerable habilidad para que el mortero penetre totalmente en las capas de malla y las varillas sin dejar hueco alguno en el interior.

En ninguna circunstancia debe aplicarse el mortero de un lado, hasta que el del otro haya penetrado totalmente. Al usar la técnica en una etapa, tal vez la mejor manera sea aplicar el mortero en un lado, poniendo en el otro, como cimbra temporal, hojas de triplay y tiras similares de madera, contra las cuales pueden trabajar los vibradores.

Debe tenerse cuidado con el recubrimiento final, o capa de acabado, ya que éste se coloca antes de que ocurra el fraguado final de la aplicación del -



Fig. 3.3 Recubrimiento manual de un tanque de ferrocemento.



Fig. 3.4 Aplicación del mortero a un silo de ferrocemento.

mortero principal.

Técnica en dos etapas. Consiste en aplicar el mortero primero en un lado, presionándolo hasta que pase las superficies internas del alambre central, se da el acabado al lado externo y se cura; los huecos que quedan se llenan después desde el otro lado, y posteriormente se les da el acabado y el curado. La ventaja principal en este proceso es que al aplicar en el lado contrario el mortero, éste puede forzarse en la superficie sólida ocasionando menos huecos. Sin embargo, la vibración es esencial cuando se está aplicando la segunda capa de mortero. Antes de aplicar la segunda capa, es indispensable limpiar bien la superficie y quitar todo el material suelto. Después puede extenderse o aplicarse a manera de pintura, sobre la superficie, una lechada de cemento de consistencia gruesa, antes de la aplicación del mortero. Esta técnica evita el riesgo de separación entre las dos capas, pero aún quedan dudas respecto a la calidad absoluta de la unión entre las mismas.

Aplicación del mortero por secciones. Al efectuar la operación de aplicación del mortero en estructuras grandes de ferrocemento, puede ser preferible hacerlo por secciones, utilizando el proceso en una sola etapa. En este caso se deben mantener las juntas de construcción lo más limpias posible. Antes de iniciar la siguiente aplicación de mortero, las juntas deben cubrirse con una lechada o, si se prefiere, con una resina epóxica que asegura una unión más perfecta. En muchos casos, este método ha demostrado ser extremadamente satisfactorio.

Acabado. En el curso de la operación normal de aplicación del mortero debe llevarse a cabo el acabado de la superficie antes de que ocurra el fraguado

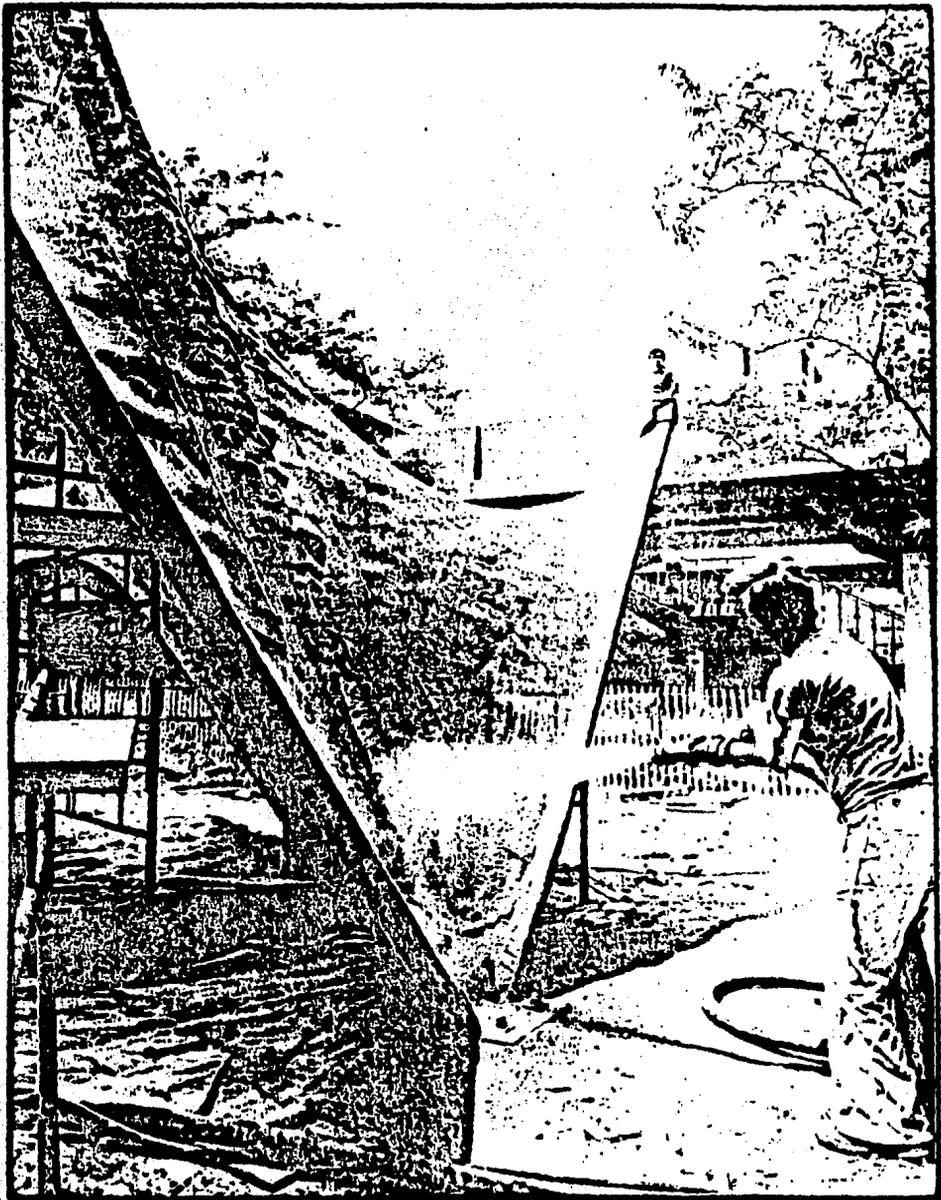


Fig. 3.5 Empleo del mortero lanzado en el recubrimiento de un cascarón de ferrocemento.

final. El recubrimiento libre del refuerzo en el ferrocemento no debe ser de más de 1.25 cm, aunque uno de 0.15 cm se considera conveniente en muchos casos. Durante todo el tiempo del proceso de aplicación del mortero deben usarse tablas grandes de madera para asegurar que la superficie esté pareja. Esto ayuda a quienes aplican el mortero a darse cuenta de dónde se requiere más mortero para llenar los huecos o dónde debe quitarse el exceso del mismo. Después de esta operación deberá aplanarse la superficie con llanas de madera para obtener un acabado liso.

3.2.3 Curado

Para poder obtener un mortero endurecido de buena calidad, la aplicación y compactación deberá estar seguida por un curado en ambiente adecuado durante las etapas tempranas de endurecimiento.

Curado es del nombre que se le da a los procedimientos utilizados para estimular la hidratación del cemento, y consiste en una temperatura controlada y en el movimiento de humedad causado por ésta dentro del mortero.

De manera más específica, el propósito del curado es conservar saturado el mortero hasta que el espacio originalmente lleno de agua en la pasta de cemento fresco, se haya llenado al grado deseado por los productos de hidratación del cemento. La hidratación no puede ocurrir sin agua y si se permite que el agua de la mezcla se seque en el mortero, se afectará severamente la hidratación y, por ende, el desarrollo de resistencia y de la durabilidad. Existen diversos métodos de curado empleados hasta la fecha, y mas adelante se dará una breve descripción de los utilizados normalmente en ferrocemento.

Curado por humedad. Una vez que ha fraguado el mortero, el curado por humedad puede proporcionarse manteniendo el mortero en contacto con alguna fuente de suministro de agua al menos durante aproximadamente 10 a 14 días. Esto se logra mediante aspersión o anegamiento o cubriendo la superficie con arena o tierra, aserrín o paja, mojados. Vale la pena emplear un sistema aspersor de alta presión, una manguera fija o algún otro dispositivo que pueda emplearse dos o tres veces al día en grandes proyectos de construcción como en el caso de barcos.

Curado con membrana impermeable. En este tipo de curado se utiliza una membrana impermeable o papel a prueba de agua para cubrir la superficie terminada. Si la cubierta no está perforada o dañada, evitará eficazmente la evaporación del agua del mortero.

Si la estructura está directamente bajo la luz del sol, la temperatura bajo la cubierta plástica aumentará considerablemente, acelerando de este modo el desarrollo de resistencia en el mortero. Existen muchas formas patentadas de membranas de curado. Generalmente se pueden utilizar materiales que contengan cera para extenderlos sobre la superficie del mortero. Sin embargo, aunque estos materiales evitan que se evapore algo de la humedad, también reducen la adherencia de la superficie de mortero, dificultando la aplicación de recubrimientos tales como pinturas. Deben por lo tanto, utilizarse con precaución.

En este caso, el curado debe continuarse al menos durante siete días, de lo contrario pueden ocurrir efectos perjudiciales tales como contracción, agrietamiento o menor desarrollo de resistencia debidos a un secado prematuro.

Curado con vapor. El curado con vapor es especialmente adecuado en climas fríos y cuando es necesario el desarrollo temprano de resistencia. El curado con vapor se ha empleado exitosamente en diferentes tipos de cemento Portland, pero nunca debe utilizarse con cemento aluminoso debido a los efectos adversos de las condiciones húmedo-calientes sobre la resistencia de dicho cemento.

Al emplear este proceso es conveniente esperar unas cuatro o cinco horas después de haber aplicado el mortero, antes de aplicar el vapor, para dar tiempo al fraguado inicial. Durante el proceso de curado, toda la estructura debe estar cubierta con láminas de plástico adecuadas, y las juntas deben estar selladas para evitar la pérdida de vapor. Es necesario aumentar lentamente la temperatura durante unas dos horas, hasta llegar a 71 °C, y luego mantener la misma temperatura durante un período de seis horas, después de lo cual puede dejarse enfriar durante un período que no sea menor de cuatro horas.

Siempre que sea posible es preferible aumentar el período de enfriamiento, pero en ninguna circunstancia debe permitirse un enfriamiento brusco, ya que esto tendría un efecto perjudicial en la estructura.

3.3 Pintura y recubrimiento

La experiencia demuestra que las estructuras de ferrocemento, recubiertas adecuadamente, no necesitan una protección especial, a no ser que vayan a estar expuestas a condiciones ambientales severas.

El trabajo de pintura en la mayor parte de los casos es únicamente por razones estéticas. Sin embargo, el recubrimiento protector es necesario cuando

do la estructura se somete a intensos ataques químicos que puedan dañar la integridad estructural de sus elementos. Generalmente, existe la necesidad de evitar el ataque químico en el ferrocemento en lugares como pisos de laboratorios, plantas de alimentos, plantas de procesos químicos, tanques de almacenamiento de productos químicos, plantas de tratamiento de aguas negras, y en casi todos los tipos de estructuras marinas.

3.3.1 Tipo de recubrimiento

La pintura utilizada normalmente para propósitos estéticos, puede emplearse en estructuras donde no es esencial un recubrimiento protector adicional - desde el punto de vista estructural. La protección externa de estructuras susceptibles al ataque químico se ha logrado eficazmente hasta ahora con recubrimientos orgánicos, de los cuales los tipos vinílicos y epóxicos son los más conocidos.

Para los barcos pequeños se recomienda el recubrimiento epóxico. Se trata de productos en dos envases que requieren de una proporción cuidadosa y que tienen una corta duración una vez mezclados, y por lo general se desperdician de manera considerable. Los recubrimientos vinílicos son muy populares entre los constructores de barcos de ferrocemento, pero la adherencia de un recubrimiento vinílico aplicado directamente sobre el mortero no es muy alta y se requiere una primera aplicación especial con propiedades adhesivas e inhibidoras. Esta primera aplicación debe ser del recubrimiento tipo laca, generalmente del tipo vinílico, pero un poco modificado mediante la adición de diversas resinas muy adherentes y de pigmentos inhibidores.

3.3.2 Métodos de aplicación

Para el éxito de un recubrimiento de protección, es importante la preparación apropiada de la superficie. Cualquier superficie que se va a recubrir debe estar seca y completamente limpia. La mugre, el polvo y el recubrimiento anterior, si lo hubo, deben quitarse con cepillo de alambre o sopleteando con chorro de arena. Las capas de lechada que pudieran estar débilmente adheridas a la matriz, deben quitarse primero. Existen dos corrientes de ideas respecto a la eliminación de las lechadas. Una, usar nada más el cepillado mecánico con alambre y la otra, el tratamiento ácido. El aguafuerte de ácido clorhídrico normalmente utilizado en estructuras masivas de concreto no debe usarse en ferrocemento. El recubrimiento libre de la malla de alambre en el ferrocemento es de 0.15 a 0.2 cm y puede ser atacada y corroída por restos de cloruro de calcio que hayan quedado aun después de un lavado cuidadoso. El aguafuerte de ácido fosfórico parece ser mas seguro.

El recubrimiento debe aplicarse generalmente a temperaturas no inferiores a 10 °C, y para la aplicación de adhesivos de resinas epóxicas al mortero se sugiere una temperatura mínima de 15 °C.

El espesor que se requiere para el recubrimiento de protección depende del tipo de recubrimiento, de su formulación y de la aspereza de la superficie. Generalmente se requiere de un mínimo de tres capas y es aconsejable alternar el color de cada aplicación para asegurar un recubrimiento completo sobre toda la superficie.

Primera capa de recubrimiento. La primera capa de recubrimiento es un se-

llador inhibidor de vinilo o de base epóxica. Esta capa debe ser capaz de sellar la superficie agrietada mediante absorción y también de prevenir la corrosión del armazón de acero y de la malla expuestos.

Relleno y aplanado. Después de haber aplicado la primera capa vinílica o de base epóxica y permitido su curado, es muy importante examinar cuidadosamente la superficie. En esta etapa puede mejorarse la apariencia de la estructura mediante la aplicación de un relleno de mastique vinílico de mucho cuerpo. Los recubrimientos de mastique vinílico generalmente se aplican con escoba de goma o con espátula, al espesor deseado. Secan dentro de las 24 horas siguientes y puede dársele el acabado deseado.

Segunda capa de recubrimiento. Esta capa se aplica para asegurar que cualquier parte del mortero o del refuerzo, expuesto o descubierto durante el aplanado, quede apropiadamente cubierto por la capa final, y es del mismo tipo que la primera capa de recubrimiento.

Recubrimiento final. En todas las partes de la estructura se aplican de dos a cuatro capas de recubrimiento vinílico. Las diferentes marcas de recubrimiento en el mercado tienen tiempos diferentes de curado y en cada caso deben seguirse las recomendaciones del fabricante. De cualquier manera, nunca debe aplicarse una capa de recubrimiento hasta que la capa anterior haya sido apropiadamente curada. El tiempo de curado puede variar desde 30 minutos hasta 48 horas (recubrimientos derivados del petróleo).

C A P I T U L O 4

PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS

Muchas de las propiedades únicas del ferrocemento derivan del hecho de que por definición contiene una gran cantidad de refuerzo en dos sentidos, elaborado con elementos de diámetro relativamente pequeño que tienen una elevada superficie específica comparada con la del concreto convencional.

Desde la década pasada se han efectuado estudios sobre las propiedades mecánicas y físicas del ferrocemento, pero el enfoque fundamental para formular estas propiedades es muy reciente.

Algunas de sus propiedades no han sido suficientemente investigadas hasta la fecha, y no se dispone de suficiente información técnica para poder sugerir fórmulas de diseño aceptables. En otros casos si existe suficiente información de investigaciones como para realizar aproximaciones tentativas de diseño, sin embargo, el propósito de este trabajo no es el de dar a conocer tales tentativas, sino simplemente efectuar un análisis de cada una de sus propiedades fundamentales.

Según palabras de Nervi, la más notable de las características del ferrocemento es "gran elasticidad y resistencia al agrietamiento en el mortero debido a la extrema subdivisión y distribución del refuerzo". El reconocimiento de los parámetros que definen la subdivisión y distribución del refuerzo es fundamental para la comprensión de muchas de las propiedades del ferrocemento. Dos de esos parámetros son la fracción de volumen y la superficie -

específica del refuerzo. La fracción de volumen del refuerzo es el volumen total de refuerzo por unidad de volumen del compuesto; y la superficie específica del refuerzo se define como el área perimetral (superficie de adherencia) del refuerzo, por unidad de volumen del compuesto. Valores típicos de estos parámetros para el ferrocemento son: fracción de volumen de 5.1 a 6.3% y una superficie específica de 2 a 3 cm^{-1} .

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 del sistema de refuerzo E_R , necesita algunas aclaraciones. Esto es porque el módulo de la malla no es necesariamente el mismo que el módulo elástico del alambre con que esta hecha. En una malla entretrejida de acero, el tejido imparte a los alambres una ondulación. Cuando es probada en tensión, la malla entretrejida se enderezará más que una malla soldada similar hecha con alambres rectos. Por lo tanto, la malla entretrejida se comporta como si tuviera un módulo elástico menor que el de los alambres que la forman. Además, cuando una malla entretrejida es introducida en una matriz de mortero y tiende a enderezarse bajo tensión, la presencia de la matriz resiste tal enderezamiento, presentándose una forma de endurecimiento por tensión.

Para tomar en cuenta los efectos de esto, el término módulo efectivo del sistema de refuerzo (E_R) es usado. Para malla soldada de acero, E_R puede ser igual al módulo elástico de los alambres de acero; para otras mallas, E_R puede ser determinado de pruebas de tensión en compuestos de ferrocemento.

4.1 Resistencia última bajo carga estática

En esta sección, los parámetros asociados con la orientación, la cantidad total de refuerzo y el área efectiva de acero en una dirección en particular, son introducidos. La orientación es definida por un número o números que representan el ángulo en grados entre los elementos de refuerzo y la dirección del esfuerzo aplicado. Ejemplo, EWM 0/90 representa una malla electrosoldada con alambres a 0° (paralelos) y a 90° (transversales) con respecto al esfuerzo aplicado (FIG. 4.1). El área efectiva de acero en una dirección dada esta determinada por el área de la sección transversal de los elementos, multiplicada por el coseno del ángulo que se forma entre los elementos y el esfuerzo aplicado (FIG. 4.1). La cantidad total de refuerzo es expresada en dos formas: como un porcentaje del volumen de ferrocemento o como el peso del acero por unidad de área o volumen de ferrocemento.

4.1.1 Resistencia última a la tensión

En tensión, la capacidad de carga es esencialmente independiente del espesor del especimen debido a que la matriz se rompe mucho antes de la falla y no contribuye directamente en la resistencia del compuesto. Generalmente, la resistencia a la tensión del ferrocemento usando metal desplegado, malla soldada o entretejada en sus orientaciones normales, corresponde estrechamente a la capacidad de carga a la tensión de los elementos de refuerzo. Hay notables cambios en la resistencia que ocurren cuando la malla soldada es orientada a 45° de la carga aplicada, o cuando el metal desplegado es usado con el eje mayor de los agujeros perpendicular al esfuerzo aplicado. Por ejemplo, para malla soldada (FIG. 4.1-derecha), la resistencia última para 45° de orientación es el 50-60% de la que se tendría con la orienta-

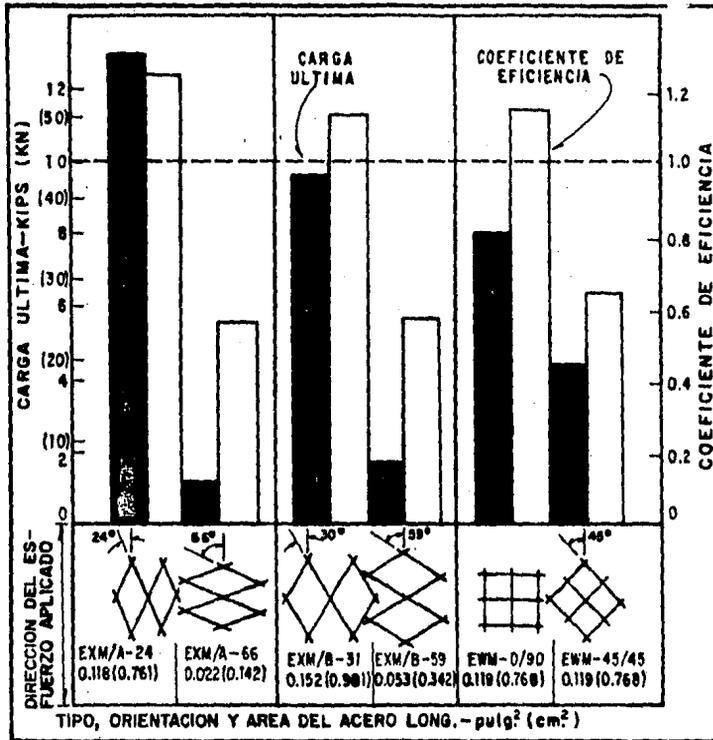


FIG. 4.7 - INFLUENCIA DE LA ORIENTACION DEL REFUERZO SOBRE LA RESISTENCIA ULTIMA A LA TENSION DEL FERROCEMENTO Y COEFICIENTE DE EFICIENCIA PARA DOS TIPOS "A" Y "B", DE METAL DESPLEGADO, EXM (IZQUIERDA Y CENTRO) Y MALLA SOLDADA CUADRADA, EWM, (DERECHA).

ción normal, mientras que para los dos tipos de metal desplegado (FIG. 4.1 -centro e izquierda) la resistencia en la dirección perpendicular a la -- orientación normal es solamente 15-35% de la resistencia que se tendría con la orientación normal. La malla hexagonal (malla de gallinero) ha mostrado también tendencia a presentar resistencias anisotrópicas en tensión, con la resistencia mas alta observada cuando la dirección de los elementos retorcidos es paralela al esfuerzo aplicado.

Para distinguir diferencias en la resistencia asociadas únicamente con la - orientación de aquellas que proceden de cambios en el área efectiva de la - sección transversal (número de elementos por unidad de ancho multiplicado - por el área de su sección transversal y multiplicado por el coseno del ángulo de inclinación del esfuerzo aplicado), es útil descartar ésto último y calcular el coeficiente de resistencia efectiva del ferrocemento que es el producto del área efectiva y la resistencia real a la tensión del refuerzo. A este proyecto también se le conoce como coeficiente de eficiencia. Esto proporciona una verdadera indicación de la efectividad de los distintos refuerzos en diferentes orientaciones (FIG. 4.1) y muestra que las diferencias de resistencia observadas estan fuertemente asociadas con la orientación de las capas de refuerzo y no con diferencias en el área efectiva del refuerzo.

En general, la elección óptima del refuerzo del ferrocemento para resistencia a la tensión depende de si la carga es esencialmente uniaxial o significativamente biaxial. Por ejemplo, la FIG. 4.1 muestra que el metal desplegado en su orientación normal es mas adecuado que cualquier otra malla de - refuerzo para carga uniaxial, debido a que una elevada proporción del total

de acero es efectiva en la dirección del esfuerzo aplicado. Para carga biaxial, la malla cuadrada es mas efectiva debido a que el acero está distribuido equitativamente en dos direcciones perpendiculares. No obstante, la anisotropía asociada con el metal desplegado y la malla hexagonal puede ser eliminada mediante la orientación alternada de sucesivas capas, justo como la anisotropía de la madera es dominada con la fabricación del triplay.

4.1.2 Resistencia última a la compresión

En este caso, a diferencia de la tensión, la matriz contribuye directamente en la resistencia del ferrocemento la cual es proporcional al área de la sección transversal, por lo tanto la resistencia y la cantidad de refuerzo - deben ser apropiadamente definidos en términos de esfuerzo y fracción de volumen de refuerzo. Obviamente, la resistencia de la matriz, regida primordialmente por la relación agua-cemento, es un factor principal, como lo es para el concreto convencional, pero el tipo, orientación y la forma de acomodar el refuerzo son también importantes.

Algunos investigadores sostienen que la resistencia última a la compresión puede determinarse haciendo caso omiso de la contribución de las fibras, ya que supuestamente sufren pandeo. Los resultados experimentales de estos investigadores demostraron que bajo compresión, la resistencia última a la compresión es menor que la del mortero puro equivalente. Se supone que la resistencia a la compresión en condición última es de $0.85f'_c$ donde f'_c es la resistencia última a la compresión del mortero.

Sin embargo, recientes experimentos realizados en columnas sólidas y huecas (con centro de poliestireno esponjoso), reforzadas perimetralmente con malla

soldada resultaron ser significativamente más resistentes que aquellas con matriz sin refuerzo. Esto se atribuye a que las varillas laterales de la malla actúan de manera similar al refuerzo espiral convencional, conteniendo la matriz adjunta. Los experimentos con metal desplegado no tuvieron tan buenos resultados y la resistencia de las columnas con este refuerzo sólo fue ligeramente mayor que en las columnas sin refuerzo (FIG. 4.2).

Resumiendo, las únicas formas adecuadas de refuerzo que proporcionan una significativa mejora en la resistencia a la compresión son las mallas cuadradas destinadas a la fabricación de arreglos cilíndricos que encierren la matriz, forzándola de esta forma a aceptar el esfuerzo triaxial, condición asociada para una resistencia mayor.

4.1.3 Resistencia última a la flexión

La resistencia última en flexión naturalmente refleja la influencia combinada de los factores que rigen en la resistencia a la tensión y compresión, como son cantidad, tipo, orientación y geometría intrínseca de las capas de refuerzo. Algunos investigadores han empleado los principios del análisis convencional de la resistencia última para el concreto reforzado a fin de lograr calcular la resistencia de los especímenes de ferrocemento. Esta metodología, a pesar de ser satisfactoria en muchos casos, toma en cuenta solamente el área efectiva de la sección transversal y la posición de las capas de refuerzo con respecto a un eje neutral. El tipo de refuerzo y la orientación, espaciamiento y geometría de las capas son variables adicionales muy importantes, únicas para el ferrocemento. Para aislar la importancia de estas variables y para destacar las circunstancias donde un análisis convencional de la resistencia última es inadecuado, es de utilidad, -

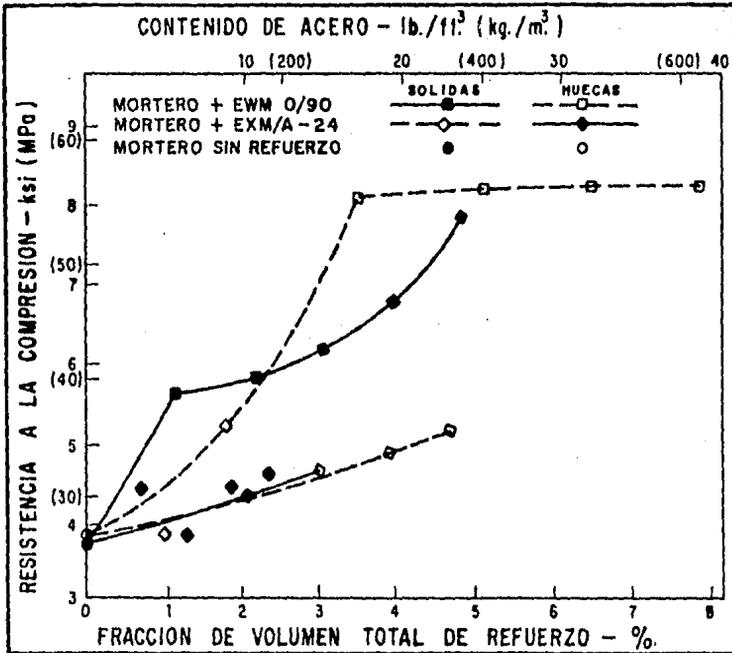


FIG. 4.2 - RELACION ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION Y EL CONTENIDO DE ACERO O FRACCION DE VOLUMEN PARA COLUMNAS DE FERROCEMENTO REFORZADAS CON METAL DESPLEGADO O MALLA SOLDADA.

además de la comparación de las resistencias absolutas, establecer un indicador general de funcionamiento aplicable a todos los datos, el cual elimine la influencia de diferencias en la matriz y resistencias del refuerzo, tamaño del espécimen, posición de las capas de refuerzo, etc. El indicador escogido es el coeficiente de eficiencia y es el equivalente de aquél seleccionado para la resistencia a la tensión. En este caso, el coeficiente de eficiencia es la relación entre el momento último efectivo determinado por una prueba y el momento último calculado por el método de la resistencia última.

Antes de considerar el coeficiente de eficiencia de varios sistemas es instructivo comparar el funcionamiento de varios sistemas de refuerzo en términos de la relación entre la resistencia última efectiva a la flexión medida en forma experimental y el área efectiva del refuerzo en la dirección longitudinal. La comparación se efectúa con varios refuerzos en sus orientaciones normales para dos niveles de resistencia del refuerzo (FIG. 4.3). La distribución de las capas de refuerzo fue asumida como uniforme a través de todo el espesor de la sección transversal y la armazón de varillas de refuerzo no fue considerada. La comparación muestra que el metal desplegado y la malla cuadrada soldada funcionan significativamente mejor que la malla entretejida o las varillas convencionales con aclaje en los extremos. Además, la malla entretejida, las varillas convencionales y la malla hexagonal funcionan similarmente. Desde luego, basándose en el área efectiva longitudinal del refuerzo, el metal desplegado y la malla cuadrada soldada en sus orientaciones normales, son más efectivos a flexión que otros tipos de refuerzo a pesar de las diferencias en el tamaño del espécimen de prueba, recubrimiento, área efectiva y en el espaciamiento de las capas de refuerzo. El uso -

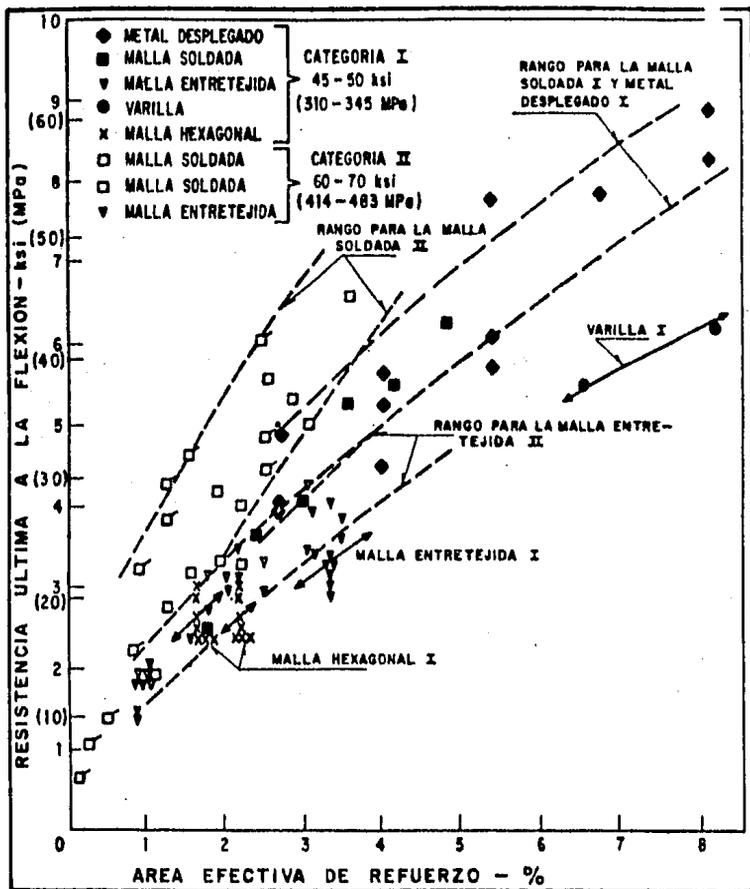


FIG. 4.3 - RELACION ENTRE LA RESISTENCIA ULTIMA A LA FLEXION DEL FERROCEMENTO Y EL AREA EFECTIVA DE REFUERZO EN LA DIRECCION DEL ESFUERZO APLICADO .

del coeficiente de eficiencia nos proporciona una verdadera indicación de la efectividad de los diferentes refuerzos. No obstante diferencias menores en los métodos aplicados al análisis de la resistencia última para calcular el momento último, el consenso es que el coeficiente de eficiencia para el metal desplegado y malla cuadrada soldada en sus orientaciones normales es mayor que el de la malla entretejida en un rango de 1.05 a 1.20. Similares coeficientes de eficiencia han sido obtenidos tanto para carga uniaxial como biaxial (losas circularse con una carga central) usando malla hexagonal colocada en capas alternadas con armazón de varillas entre ellas. El funcionamiento de todo este sistema de refuerzo levemente excede las especificaciones basadas en el análisis de carga última, con una resistencia adicional aparentemente impartida por la naturaleza del refuerzo en dos sentidos.

Hay probablemente tres razones por las cuales la malla soldada cuadrada y el metal desplegado tienen una mayor efectividad a la flexión que la malla entretejida. En primer lugar está la posibilidad de deslizamiento fomentada por el prematuro enderezamiento de las varillas longitudinales, las cuales en la malla entretejida no están inicialmente rectas debido al tejido. Este enderezamiento también reduce el módulo aparente del sistema de malla. La segunda razón es la resistencia a la falla en la unión, asociada con el anclaje de los elementos longitudinales a los elementos transversales u oblicuos en la malla soldada y en el metal desplegado. Por último, está el efecto de la componente transversal del refuerzo que contiene la expansión lateral de la matriz en la zona de compresión debido a la fijación inherente con el refuerzo longitudinal, reforzando así a la matriz por la creación de una condición de esfuerzo biaxial. Las tres consideraciones anteriores son también aplicables a la malla hexagonal, pudiendo influenciar su funcionamiento

en una forma similar.

La orientación del refuerzo es tan importante para la resistencia a la flexión como para la resistencia a la tensión, particularmente cuando se considera la resistencia bajo una condición de carga biaxial. Mientras la malla cuadrada ofrece igual resistencia en ambas direcciones paralelas a los alambres, la resistencia con una orientación a 45° es 67-80% de la resistencia con orientación paralela a los alambres de la malla soldada, siendo un poco menor la diferencia para la malla entretejida. Con metal desplegado y malla hexagonal, las resistencias presentan un elevado grado de anisotropía. Para el metal desplegado, resistencias en la dirección transversal son particularmente bajas, 23% del valor para la orientación normal. Para la malla hexagonal, resistencias en la dirección transversal son aproximadamente del 57% de aquellas cuando la orientación es normal. Estas reducciones son mayores de lo que se esperaba tomando en cuenta solamente las disminuciones en el área efectiva de la sección transversal del refuerzo. Coeficientes de eficiencia para metal desplegado en la dirección transversal son del orden de 0.5, indicando claramente otro caso donde el funcionamiento es inferior a lo esperado por el análisis de carga última.

La superficie específica del refuerzo, un parámetro que depende tanto del diámetro de los elementos de refuerzo como de la separación de los mismos, ha mostrado influenciar la resistencia última en mallas entretejidas con cuadros relativamente grandes (mayores de 150 mm). No obstante, la revisión de datos comparables tanto para mallas soldadas como entretejidas menores de 25 mm no muestran evidencias de influencia de la superficie específica en la resistencia última. Aparentemente, un aumento en la superficie específica es solamente benéfico cuando la falla en la superficie de unión de varilla-

-matriz sea un factor que afecte la resistencia última. Cuando la falla en la unión no es un factor gobernante, por ejemplo, en la malla soldada y el metal desplegado donde el anclaje efectivo es proporcionado por el refuerzo transversal, o en mallas muy finas de todo tipo, una superficie específica mayor que la mínima requerida para evitar la falla en la unión no beneficia en nada. De hecho, hasta puede ser desventajoso a causa de una reducción en la resistencia aparente ocasionada por la incapacidad para lograr una completa penetración del mortero en una malla fina.

El espaciamiento de las capas de refuerzo en el ferrocemento es normalmente bastante uniforme a través del espesor disponible de la sección transversal, excepto cuando las varillas del armazón de refuerzo están presentes. A pesar de todo, la idea de que concentrar las capas en las caras superior e inferior de un espécimen para flexión incrementa su resistencia debido a su mayor distancia del eje neutral, no es irrazonable. Sin embargo, tal arreglo muchas veces reduce la resistencia absoluta y el coeficiente de eficiencia debido a que favorece la falla horizontal por cortante, lo cual no es normalmente un problema en unidades de ferrocemento con refuerzo uniforme y cerrado y un gran coeficiente momento/espesor (FIG. 4.4). Cuando la malla de metal desplegado es usada, se pueden obtener coeficientes de eficiencia óptimos que esten de acuerdo con las expectativas del análisis convencional de la resistencia última separando las capas de refuerzo uniformemente a través del espesor efectivo (FIG. 4.4).

En general, la selección óptima del refuerzo para resistencias a la flexión, como ya fue dicho para resistencias a la tensión, depende en todo caso de si la carga es uniaxial o biaxial. Para carga uniaxial, el metal desplegado es

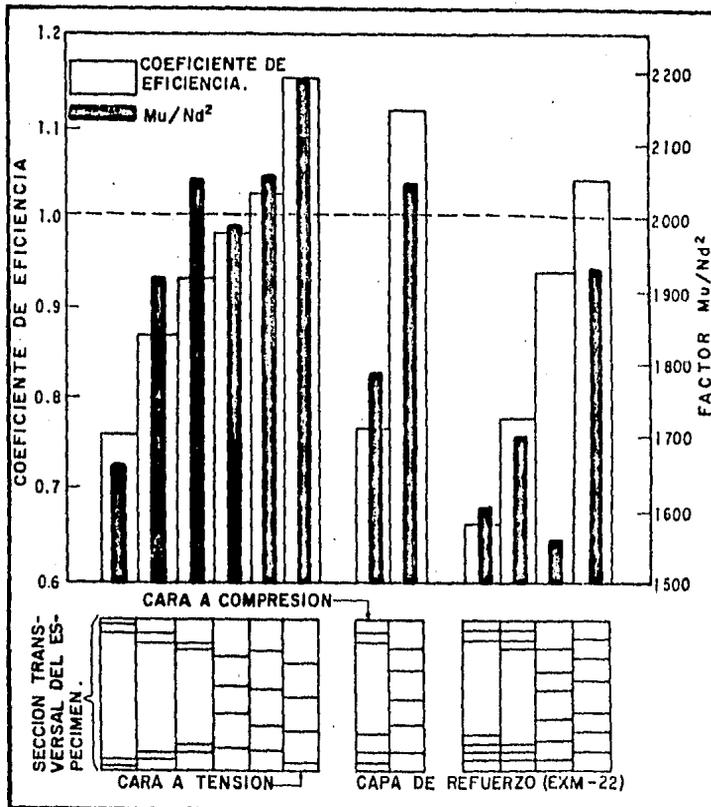


FIG. 4.4 - EFECTO DEL ESPACIAMIENTO DE LAS CAPAS DE REFUERZO - (4, 5 ó 6 CAPAS DE METAL DESPLEGADO) EN FUNCIONAMIENTO A FLEXION. "N" ES EL NUMERO DE CAPAS REFUERZO Y "d" ES EL ESPESOR EFECTIVO.

la mejor elección. Bajo condiciones biaxiales, la malla soldada es probablemente la mejor elección, aunque su debilidad para 45° en eje diagonal debe ser tomada en cuenta. Cuando el metal desplegado o la malla hexagonal son empleados bajo estas condiciones, la orientación de las capas sucesivas debe ser alternada para oponerse a sus características anisotrópicas.

Otra consideración que riega la elección del refuerzo es la capacidad para adoptar fácilmente la curvatura de la unidad que va a ser construida. La malla hexagonal es particularmente favorable para secciones de doble curvatura, malla cuadrada para secciones de simple curvatura y metal desplegado para secciones planas.

4.1.4 Resistencia al cortante

Notablemente pocos de los muchos estudios acerca del ferrocemento incluyen la evaluación de la resistencia al cortante, tal vez debido a que el ferrocemento es usado principalmente en paneles delgados donde el coeficiente momento/espesor en flexión es lo suficientemente grande como para no permitir que el cortante determine el criterio de falla. El alineamiento paralelo longitudinal de las capas de refuerzo en el ferrocemento elimina efectivamente la inclusión de refuerzo contra cortante y es equivalente a las varillas curvas o estribos usados en el concreto reforzado, es decir, el ferrocemento no está particularmente ajustado para resistir el cortante.

Algunos usuarios del ferrocemento que construyeron barcos han demostrado cualitativamente la dureza del material al cortante de impacto mediante pruebas deliberadas y accidentales, las cuales incluyen colisiones con rocas y otros barcos.

4.2 Resistencia al agrietamiento bajo carga estática

El término resistencia al agrietamiento, que aparece frecuentemente en la literatura como comportamiento del ferrocemento bajo tensión y flexión, ha sido definido de varias maneras y por lo tanto puede significar cosas diferentes para distintas personas. En una discusión amigable de este problema, se notó que las microgrietas son inherentes a la matriz de mortero aun antes de ser cargada, y es así como el ancho de las microgrietas, propagado, y progresivamente asociado con la acción de la carga, son detectadas - por algunos medios, visuales o de otro tipo, y denominadas "primeras grietas". Sin embargo, en los variados estudios polacos y rusos, "primer agrietamiento" está definido por una grieta con rango de 0.005 mm a un valor visible a simple vista, 0.03-0.1 mm. En otros estudios, "primera grieta" está definido como la primera desviación de la linealidad de la función carga-elongación en tensión o la desviación correspondiente de la curva carga-deflexión en flexión; también como una grieta bajo carga de flexión de - 0.0075 mm o simplemente como la primera grieta visible.

Obviamente, hasta que sea adoptada por la generalidad una definición de primera grieta, asociando un esfuerzo o resistencia con esta condición, habrá dificultades y malas interpretaciones. Un enfoque mas útil para el futuro, puede ser relacionar carga o esfuerzo con el ancho de grieta promedio y llegar a un esfuerzo permisible de diseño correspondiente al ancho promedio de grieta considerado como permisible en servicio.

A despecho del problema de la definición, se está de acuerdo generalmente en que, en tensión directa al menos, la resistencia al agrietamiento aumenta con el incremento en la cantidad o grado de subdivisión del refuerzo -

(FIG. 4.5). Mientras la diferencia entre la malla entretrejida y las solda da es aparentemente menor, la diferencia entre metal desplegado y los otros tipos de malla es muy significativa, y está obviamente asociada con otros factores aparte de la superficie específica. Especímenes reforzados con metal desplegado resisten agrietamiento visible de cerca del 80% de su resistencia última, mientras que el agrietamiento en especímenes reforzados con malla comienza en un porcentaje mucho menor de su resistencia última, y se desarrolla gradualmente hacia un punto donde el espaciamento de las grietas corresponde al espaciamento de los alambres de la malla.

En flexión, las relaciones del agrietamiento con la superficie específica están menos bien definidas, y considerables datos dispersos reflejan la posible influencia de otras variables. La superficie específica en estos casos está definida como el área superficial del refuerzo total por unidad de volumen de ferrocemento localizado en la zona de tensión únicamente.

Esto es tal vez cuestionable debido a que ese agrietamiento es primeramente controlado por las capas que se encuentran en la inmediata vecindad de la cara en tensión y las restantes capas internas tienen menos influencia. A pesar de la lógica cuestionable de esta definición, el dato disponible para metal desplegado y malla hexagonal o cuadrada muestra que, en general, la resistencia al agrietamiento se incrementa desde un bajo valor ligado a la resistencia de la matriz de mortero, hasta elevados valores proporcionales a la superficie específica.

La gran efectividad del metal desplegado para inhibir el agrietamiento es nuevamente notable, con un coeficiente de primera grieta con respecto a la carga última de cerca de 80%, casi tan alto como para tensión directa.

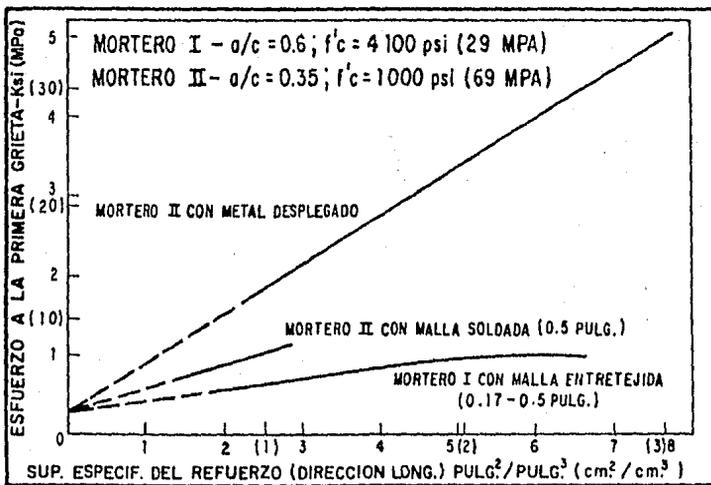


FIG. 4.5- RELACION ENTRE LA RESISTENCIA A LA PRIMERA GRIETA EN FERROCEMENTO A TENSION PURA Y LA SUPERFICIE ESPECIFICA DEL REFUERZO.

Otra investigación se refiere específicamente, sin proporcionar datos, a la capacidad que tienen los paneles reforzados con metal desplegado para aceptar esfuerzos con menos agrietamiento visible que los paneles que contienen el mismo peso de malla soldada o entretejida. Los datos disponibles generalmente sugieren que, mientras la superficie específica es un factor que tiene influencia sobre la resistencia a la primera grieta, otros factores relativos a la geometría del refuerzo son también importantes.

4.3 Elasticidad y comportamiento carga-deformación

Siguiendo las consideraciones dadas para la resistencia última y para la resistencia al agrietamiento, es apropiado examinar por completo el comportamiento carga-deformación del ferrocemento bajo varias formas de carga estática, en particular su elasticidad, la cual históricamente ha sido identificada como uno de sus mejores atributos.

4.3.1 Comportamiento carga-deformación en tensión

Para refuerzos de malla cuadrada, el comportamiento carga-deformación del ferrocemento ha sido caracterizado en tres etapas (FIG. 4.6). En la etapa inicial el ferrocemento tiene un comportamiento elástico, el cual termina al producirse el primer agrietamiento en la matriz. La segunda etapa, asociada con una matriz completamente agrietada, es también lineal. Su módulo elástico es algo mayor que el producto de la fracción de volumen y el módulo del refuerzo longitudinal, apoyando así la consideración de que el mortero y el refuerzo lateral continúan desempeñando un papel activo después del primer agrietamiento, cada uno individualmente o en combinación. En la tercera etapa, la matriz cesa de desempeñar un papel activo y la falla depende únicamente del comportamiento del refuerzo.

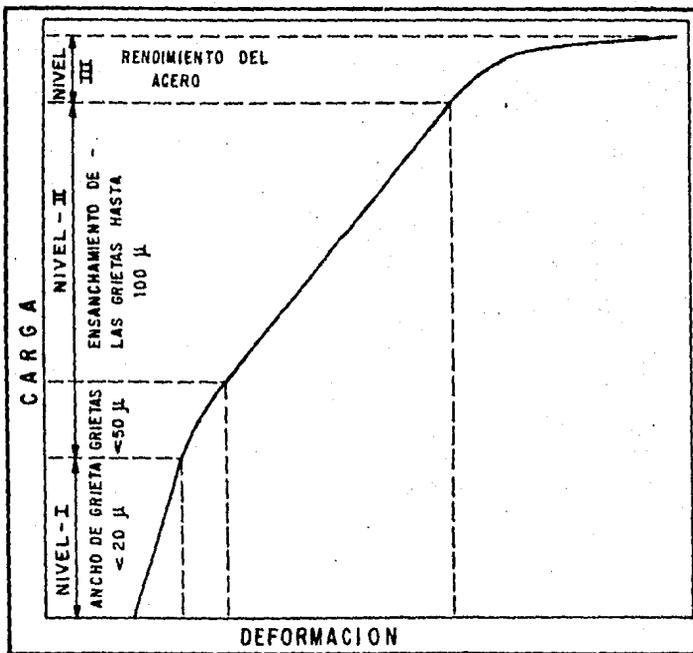


FIG. 4.6 - ESQUEMATIZACION DE LOS TRES NIVELES DE LA RELACION CARGA-DEFORMACION PARA FERROCEMENTO EN TENSION PURA .

Mientras que lo anterior está basado en la observación de especímenes reforzados con malla cuadrada y, puede ser cualitativamente cierta para otros tipos de refuerzo, el tipo de refuerzo y su geometría intrínseca son los factores que determinan el módulo de elasticidad (etapas 1 y 2) y el comportamiento carga-deformación total (FIG. 4.7). Por ejemplo, un análisis más complejo tomando en cuenta la orientación de los elementos de refuerzo oblicuos es necesario para predecir el módulo del ferrocemento con malla hexagonal. También la rigidez total y la elongación en la falla son claramente diferentes para metal desplegado y malla soldada (FIG. 4.7), probablemente reflejando diferencias en la ductilidad del acero de origen y en la rigidez de la red de refuerzo misma.

4.3.2 Comportamiento carga-deformación en compresión

Cuando el refuerzo está en un plano solamente, tiene un mínimo efecto sobre la relación carga-deformación, y el módulo de elasticidad asociado permanece virtualmente igual como aquel para la matriz de mortero. Cuando está presente en forma periférica cerrada, la relación carga-deformación es curvilínea. El módulo de elasticidad inicial puede ser determinado en forma bastante exacta tomando en cuenta la influencia volumétrica de los dos componentes materiales actuando juntos. Los valores de los módulos elásticos para especímenes reforzados con malla soldada son escasamente mayores que los de sus equivalentes con metal desplegado. Esto refleja la mejor resistencia efectiva triaxial de la matriz a causa de la malla soldada, lo cual es también aparente en el cambio en el coeficiente de Poisson del ferrocemento con el incremento de carga. Desde valores iniciales de 0.06-0.07 y 0.11-0.13 para malla soldada y metal desplegado respectivamente el coeficiente aumenta sólo gradualmente hasta menos de 0.10 justo antes de la fa-

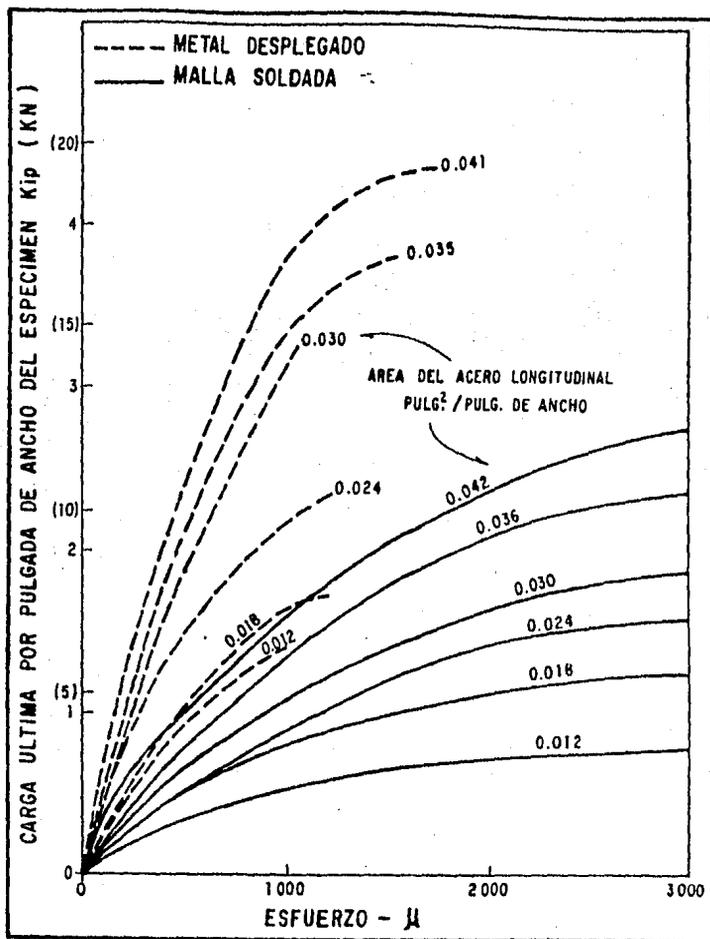


FIG. 4.7 - COMPARACION DE RELACIONES CARGA-DEFORMACION EN TENSION PURA PARA FERROCEMENTO CON DIFERENTES TIPOS DE REFUERZO.

lla en los especímenes reforzados con malla, mientras que aumenta pronuncia-
damente hasta mas de 0.20 para especímenes reforzados con metal desplegado.

4.3.3 Comportamiento carga-deformación para flexión

El comportamiento en las tres etapas ya identificado para tensión directa -
(FIG. 4.6) es también aplicable al ferrocemento en flexión. Un método de -
predicción de la relación momento-curvatura basado en la suposición de que
la curva esfuerzo-deformación es de segundo grado para el mortero en com-
presión y una simple relación bilineal (elástico/plástico) para el acero en
tensión, ha sido propuesto, pero no ha sido verificado experimentalmente. -
Otro método propuesto usa series de Fourier para definir las funciones es-
fuerzo-deformación del mortero y del refuerzo, y así calcula las relaciones
momento-curvatura. Este último enfoque da resultados que son bastante con-
cordantes con su relación correspondiente determinada experimentalmente pa-
ra las dos primeras etapas, pero algunas discrepancias son reportadas para
la tercera etapa.

4.4 Resistencia bajo carga de fatiga

Los dos constituyentes del ferrocemento, acero y mortero, tienen caracterís-
ticas de fatiga bastante diferentes.

La mayoría de los aceros tienen una resistencia límite definida, es así que,
a niveles de esfuerzo inferiores a este límite tienen una infinita o al me-
nos una muy larga vida de fatiga. En contraste, un material frágil como el
mortero no tienen un límite de resistencia definido, y por lo tanto, even-
tualmente fallará bajo cargas repetidas no importando cuan bajo sea el es-
fuerzo aplicado. En los reportes publicados, sólo en su forma a flexión ha

sido estudiado.

4.4.1 Fatiga a la flexión

Investigaciones del funcionamiento de fatiga del ferrocemento en flexión - han empleado varias formas de carga, con aplicaciones al centro y a un tercio del claro. Mientras cuatro de los cinco estudios concluyeron que el funcionamiento de fatiga de los compuestos del ferrocemento depende directamente del funcionamiento de fatiga del acero de refuerzo, el quinto señala muy específicamente que el refuerzo (malla soldada cuadrada) no falla por fatiga, sino mas bien por fractura normal de tensión, y esa falla fue causada por la incapacidad del mortero para resistir desintegración y descascaramiento. El punto de vista mayoritario que sostiene que el funcionamiento del ferrocemento está regido principalmente por el comportamiento de fatiga del refuerzo, recibe apoyo de una relación desarrollada usando refuerzos de malla soldada y entretejida, la cual muestra que el comportamiento de fatiga del ferrocemento en flexión es casi idéntico al comportamiento de segmentos de acero de refuerzo en tensión (FIG. 4.8). Si este es el caso, la elección del refuerzo para funcionamiento óptimo bajo carga de fatiga puede ser influenciado por consideraciones enteramente diferentes de aquellas propuestas previamente para carga estática. Por ejemplo, mientras la malla soldada puede ser mejor que la malla entretejida para carga estática, la malla entretejida puede ser preferible para carga de fatiga debido a que se ha mostrado que el comportamiento de fatiga de la malla soldada está influenciado por el grado de concentración del esfuerzo geométrico introducido durante el soldeo y por el método de moldeo de las uniones. Observaciones confirman, con algunas excepciones, que la falla del refuerzo ocurre -

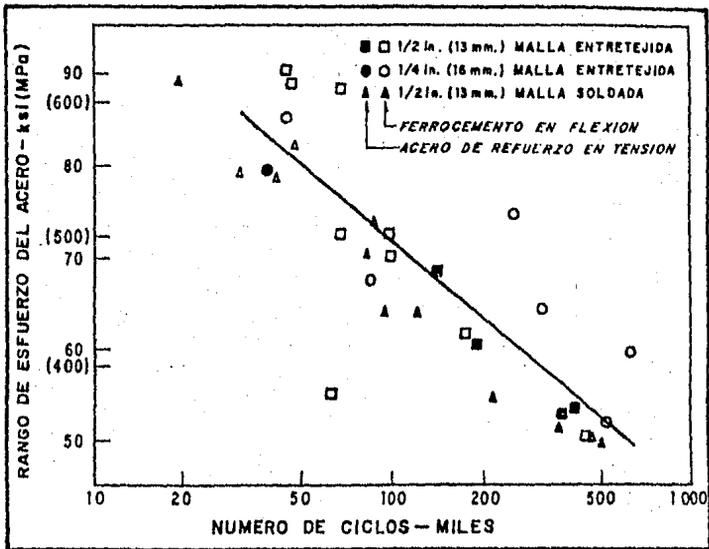


FIG. 4.8 - COMPARACION DEL COMPORTAMIENTO DE FATIGA A LA FLE-
 XION DEL FERROCEMENTO CON EL COMPORTAMIENTO A -
 TENSION DE LOS ALAMBRES DE LA MALLA DE REFUERZO .

predominantemente en las uniones. En el caso del metal desplegado, la falla ocurre principalmente en los nodos o juntas. La malla hexagonal aparentemente no exhibe regiones de falla preferenciales, y puede ofrecer ventajas similares a las de la malla entretejida. En general, el comportamiento de fatiga del acero sugiere que todos los factores están influenciados por la naturaleza y calidad del acabado de la superficie del refuerzo, es decir, el galvanizado puede afectar el funcionamiento hasta cierto punto.

Desde que es costumbre examinar el comportamiento de fatiga en términos de relaciones S-N (esfuerzo aplicado contra número de ciclos de falla), los datos disponibles y comparables son presentados en esta forma (FIG. 4.9). - Esto aclara que, de la mayoría de las variables involucradas, la naturaleza de la carga es de suprema importancia. Esto refleja el significado trascendente del rango de esfuerzo en el comportamiento de fatiga de muchos materiales. Otras diferencias como es la aparentemente mayor velocidad de fatiga usando metal desplegado, o los posibles efectos adversos del galvanizado (FIG. 4.9) están menos bien definidos, y pueden ser aplicados solamente a los datos particulares mostrados.

La mayoría de los investigadores han observado un gradual incremento en la deflexión, una disminución en la rigidez y un incremento en el ancho promedio de grieta con repetidos ciclos de carga. Una mas rápida velocidad de incremento en la deflexión y en el ancho promedio de grieta precede a la falla, y ecuaciones prediciendo el desarrollo de ambos parámetros para ferrocemento reforzado con malla cuadrada soldada o entretejida deben ser desarrolladas.

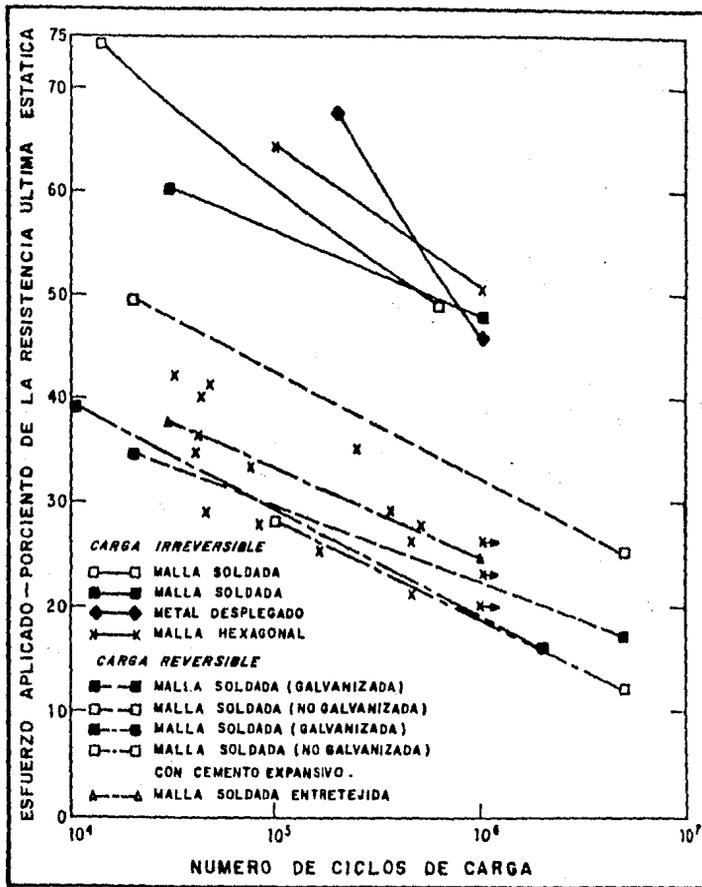


FIG. 4.9 - RELACION S-N PARA FERROCEMENTO EN FLEXION.

4.5 Resistencia al impacto

Reportes atestiguan las características favorables del ferrocemento en colisiones de barcos contra rocas o contra otros barcos con bastante numerosos. Los principales atributos parecen ser la resistencia a la desintegración, localización del daño y facilidad de reparación. Sin embarco, en vista de la complejidad experimental asociada con la medición de la resistencia al impacto, existen pocos datos cuantitativos o comparativos. Pruebas en paneles indican que la severidad del agrietamiento infligido varía significativamente con el tipo de refuerzo, pero los parámetros fundamentales - que rigen la resistencia al impacto están establecidos. Pruebas usando - péndulos balísticos para producir el impacto, y flujo de agua a través del espécimen después de la prueba para apreciar el daño, muestran que éste disminuye si la resistencia y superficie específica de la malla se incrementa. No obstante, en este momento la información disponible es insuficiente para determinar lo que constituye un óptimo sistema de refuerzo desde el punto - de vista de resistencia al impacto. Los factores que influyen en la resistencia a la primera grieta, así como el tipo, geometría y superficie específica del refuerzo son probablemente de primordial importancia.

4.6 Formación de grietas y filtración

La formación de grietas está considerado en esta sección en términos del - promedio de separación de grietas, y el promedio y máximo ancho de grieta. Para sistemas reforzados con malla, el promedio de separación de las grietas disminuye con el incremento de la superficie específica, tanto para tensión como para flexión, aunque otros factores tales como la geometría del - refuerzo también influyen en el desarrollo de grietas como ya se dijo en la

sección 4.2. En flexión, el tamaño de la malla es también importante, el espaciamiento promedio de grieta corresponde estrechamente con la separación de los alambres transversales, y el ancho promedio de grieta se reduce en la medida en que este espacio disminuye. La relación entre el ancho de grieta máxima o el ancho de grieta promedio y el esfuerzo en el acero en la capa extrema de tensión del refuerzo, muestra que el esfuerzo equivalente en el acero para un ancho de grieta dado, es sustancialmente menor en el ferrocemento que en el concreto reforzado convencional (FIG. 4.10). Para mallas del mismo tamaño, los anchos de grieta son menores para el tipo sol dado que para la variedad entretejida. Desafortunadamente, no hay datos -- comparables para metal desplegado, el cual ha sido previamente indentificado como de gran resistencia al agrietamiento.

En aplicaciones que involucran almacenamiento de líquidos, la formación de las grietas influye directamente en las filtraciones. Ha sido demostrado experimentalmente que en tanques sometidos a presión de agua, los factores que reducen el ancho promedio de grieta generalmente reducen las filtraciones. El límite del ancho promedio de grieta propuesto para diseño de estas pruebas (presión mayor a 100 psi) es de 0.0015 in. (0.04 mm), aunque los autores señalan que esto puede ser aplicado conservadoramente para presiones de diseño menores. Investigaciones polacas y rusas sugieren un límite inferior uniforme para hermeticidad en ferrocemento de 0.0008 in. (0.02 mm), aunque el límite asociado con la corrosión del refuerzo es algo mayor: --- 0.002 - 0.004 in. (0.05 - 0.10 mm).

4.7 Fluencia y contracción

Nada en la literatura examinada hace referencia a datos cuantitativos compa-

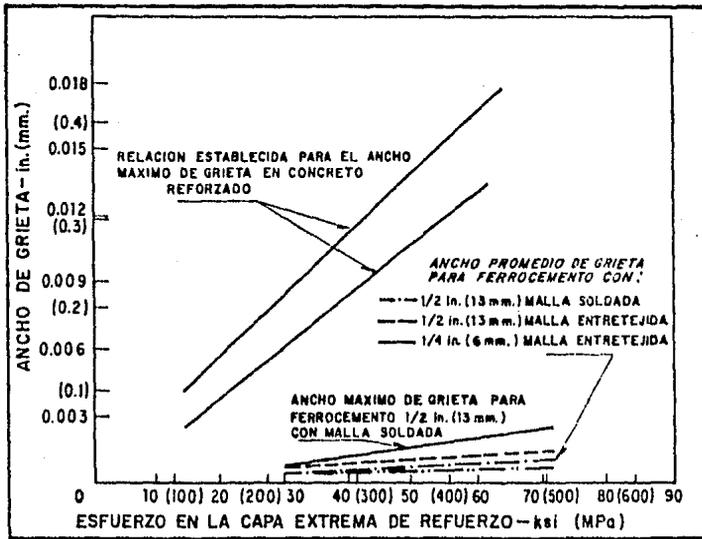


FIG. 4.10 --COMPARACION DE LOS ANCHOS DE GRIETA DEL FERROCEMENTO REFORZADO CON MALLA Y EL CONCRETO REFORZADO, EN FLEXION.

rando las características de fluencia y contracción de diferentes formas de ferrocemento. No obstante, no hay razón por la cual los principios que rigen el comportamiento del concreto reforzado convencional no puedan ser aplicados generalmente al ferrocemento.

El potencial de contracción de la matriz de mortero (no contenida por el refuerzo) está determinado en su mayor parte por el contenido de agua, el cual a su vez está regido por la trabajabilidad requerida para su aplicación, la graduación de la arena, y la presencia de sustancias tales como puzolana, limo, agentes reductores de agua, inclusores de aire, etc. Hasta ahora, la selección de técnicas de aplicación de baja trabajabilidad como el lanzado; la elección de arena sin excesivos finos, y el uso de aditivos puede reflejar un empeño intencional hacia la reducción en la contracción de la matriz tanto como las circunstancias lo permitan. La contracción efectiva del ferrocemento también depende de la restricción ofrecida por el refuerzo, la cual es función de la fracción de volumen en la dirección considerada y probablemente de otros factores previamente asociados con el desarrollo de grietas, tales como la superficie específica, el tipo de refuerzo y la separación de los alambres en la malla.

Como la contracción, la fluencia del ferrocemento puede ser supuesta como una función del potencial de fluencia (condición de no contenida) de la matriz y de la restricción ofrecida por el refuerzo. Otra vez, ciertos parámetros tales como una baja fracción de volumen pasta/agregado y un bajo coeficiente esfuerzo/resistencia aplicado, puede ser dispuesto para minimizar la fluencia de la matriz de mortero, mientras que la fluencia del ferrocemento puede ser además influenciada por factores tales como la fracción de volumen del refuerzo en la dirección de la carga.

4.8 Durabilidad

Aunque las medidas requeridas para asegurar durabilidad en concreto reforzado convencional son aplicables al ferrocemento, otros tres factores que afectan la durabilidad son únicos en el ferrocemento. Primero, el recubrimiento dado al refuerzo es anormalmente bajo, por lo tanto es relativamente fácil para los líquidos corrosivos alcanzarlo. Segundo, la superficie específica del refuerzo es inusualmente elevada, de tal manera que el área en contacto sobre la cual reacciones corrosivas pueden tener lugar, y el coeficiente resultante de corrosión son potencialmente altos. Tercero, aunque muchas formas de refuerzo usadas en ferrocemento son galvanizadas para prevenir la corrosión, la cobertura de zinc puede tener ciertos efectos adversos debido a la generación de burbujas de gas. Estos tres factores asumen importancia variable dependiendo de la naturaleza de las condiciones de exposición. Sin embargo, a pesar de estos efectos únicos, no hay reporte en la literatura de corrosión seria del ferrocemento que no esté asociada con argamasa pobre o pobre compactación de la matriz. Para asegurar adecuada durabilidad en la mayoría de las aplicaciones, una perfecta compactación es necesaria. Un recubrimiento portector es también deseable.

4.8.1 Deterioración asociada con la matriz de mortero

Tal deterioración aparece como una consecuencia del contacto con líquidos - los cuales reaccionan con la pasta de cemento, o como el resultado del desbaratamiento físico inducido por congelamiento, o por deterioro de la superficie debido a la abrasión.

El ataque por la reacción de los líquidos con la pasta de cemento es minimi

zada para asegurar baja permeabilidad, limitando la relación agua-cemento a 0.5. La permeabilidad de la pasta aumenta marcadamente arriba de este valor. Curar apropiadamente para maximizar la hidratación, y compactar efectivamente para minimizar la inclusión de aire son también de utilidad.

Para la relativamente común condición de exposición al agua de mar o al agua freática, donde la concentración de sulfatos es mayor de 150 ppm (partes por millón), resistencia adicional a los sulfatos puede ser obtenida limitando la relación agua-cemento a 0.45 o menos, independientemente del tipo de cemento. Otra forma es usando cemento tipo II o tipo V, ya que su reducido contenido de aluminato tricálcico hace al cemento menos vulnerable al ataque de los sulfatos sódicos o potásicos. Sin embargo, el sulfato magnésico que ataca al silicato tricálcico hidratado presente en todas las pastas de cemento portland, es potencialmente más peligroso que los sulfatos potásico y sódico. También, en términos del coeficiente de rapidez de deterioración inducida, la ineffectividad de los cementos resistentes a los sulfatos contra el sulfato de amonio es algo particularmente digno de anotarse. Para exposición al agua de mar, la limitación de la relación agua-cemento parece ser suficiente, puesto que muestras de varios paneles de ferrocemento hechos con cemento tipo I y con una relación agua-cemento de 0.35 a 0.45, han funcionado satisfactoriamente después de 350 ciclos de mojado y secado. Condiciones más severas de exposición requieren de recubrimientos protectores especiales.

La deterioración por congelamiento-deshielo se previene mas efectivamente - por medio de la apropiada inclusión de aire (aproximadamente 9% del volumen de mortero), un hecho bien establecido para concreto y aplicable igualmente en el ferrocemento. El mantenimiento de la relación agua-cemento baja, menos de 0.45, es también recomendable. A diferencia del concreto, la resistencia

del ferrocemento al congelamiento-deshielo ha sido poco investigada.

La resistencia a la abrasión está regida principalmente por la resistencia a la compresión de la matriz, la cual a su vez depende grandemente de la relación agua-cemento. Una vez mas la importancia de una relación agua-cemento baja se presenta. Sin embargo, las características de la arena pueden ser también significativas; un elevado contenido de sílice es generalmente importante para una mejor resistencia a la abrasión. Una disminución en el tamaño del agregado tienen un efecto adverso sobre la resistencia a la abrasión y, por lo tanto, la cantidad de material que pasa el tamiz No. 50 debe ser mantenida tan baja como sea posible.

4.8.2 Deterioración asociada con el refuerzo

Tal deterioración puede aparecer cuando la matriz está en estado de agrietamiento o en estado de no agrietamiento.

Cuando la matriz está sin agrietar, formas galvanizadas de refuerzo, a diferencia de las normales, no son esencialmente inertes.

El recubrimiento de zinc puede ser atacado por el alcalis (hidróxido de calcio) en la pasta de cemento fresco, iniciando la formación de zincato de calcio e hidrógeno. Una manera efectiva para inhibir la formación de hidrógeno es agregando cerca de 100 ppm de trióxido de cromo al agua de la mezcla. Una vez fraguado el mortero, la evolución del hidrógeno cesa; el recubrimiento de zincato de calcio que se forma aparentemente proporciona una protección al refuerzo y ningún nuevo ataque tiene lugar luego del fraguado inicial. - Una dificultad potencialmente mas seria es la corrosión galvánica, la cual tiene lugar cuando el acero galvanizado (malla) y el acero ordinario (vari-

llas del armazón) están en contacto a través de las soluciones electrolíticas presentes en el mortero. La formación de zincatos conduce a un incremento en el volumen sólido, el cual puede causar arpillamiento de la superficie, reducir el enlace, y debilitar estructuralmente al ferromento. El gas hidrógeno puede ser también liberado durante la corrosión galvánica y esto puede ser inhibido mediante la adición de trióxido de cromo.

La tasa real de corrosión galvánica dependerá de diversos factores y podrá minimizarse tomando las siguientes precauciones:

1. Siempre que sea posible utilícense los mismos metales que se encuentran cerca uno del otro en la serie galvánica (FIG. 4.11).
2. Cuando tengan que utilizarse metales que se encuentran bastante separados en la FIG. 4.11, trátese de emplear mayor área superficial del metal menos noble o más corrosible, que del metal más noble.
3. Siempre que sea posible, aislense los metales diferentes o utilícense recubrimientos protectores adecuados.
4. Cuando no sea posible proteger estos metales, trátese de mantenerlos lo mas apartado posible.

Cuando la matriz llega a agrietarse, otras formas de deterioración se facilitan, ya que accesos para agua o líquidos corrosivos son formados. Con el galvanizado se combate este problema. Nótese, sin embargo, que esa galvanización es un sacrificio para el sistema y es benéfico solamente hasta que el zinc es consumido en la celda galvánica, pero en su ausencia el ancho de las grietas y sus continuidades pueden afectar la resistencia a la corrosión. El ancho de grieta permisible apropiado para cualquier condición de

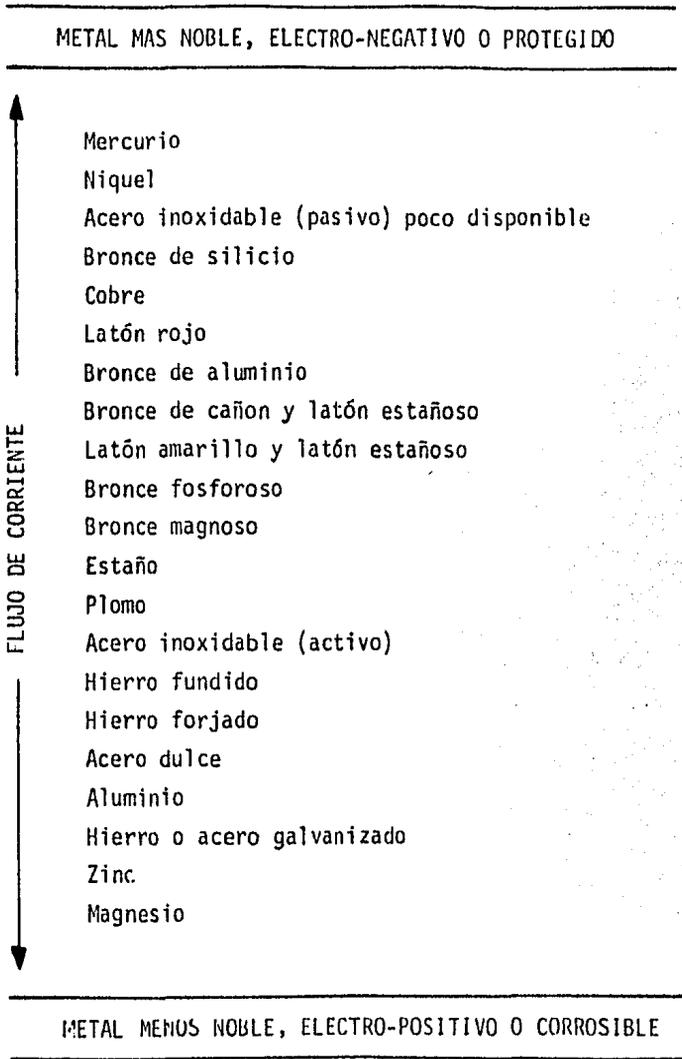


Fig. 11 Series galvánicas de los metales

servicio, probablemente depende del tamaño molecular del líquido penetrante y de la presión a la cual está sometido.

4.9 Resistencial al fuego

Independientemente de si la matriz está agrietada o no, un problema único - para el ferrocemento es su potencialmente pobre resistencia al fuego, debida a la inherente esbeltez de sus formas estructurales y al anormalmente bajo recubrimiento dado el refuerzo. La presencia en algunas mallas de refuerzo de uniones soldadas que se funden a una temperatura significativamente - más baja que la del refuerzo mismo, puede también reducir la resistencia al fuego. Hasta la fecha, no hay evidencia en la literatura de pruebas con fuego ejecutadas sobre estructuras de ferrocemento.

C A P I T U L O 5

APLICACIONES DEL FERROCEMENTO

El ferrocemento en su estado actual de desarrollo ha encontrado extensa aplicación en diferentes campos. Las principales aplicaciones del ferrocemento se encuentran en la construcción de barcos, techos y silos. Barcos de pesca rastreadores, barcos de recreo, tanques de almacenamiento, elementos de viviendas, e instalaciones agrícolas e industriales de buena calidad se han construido con ferrocemento, y el potencial de éste como un complemento viable para los materiales ya existentes ha sido debidamente considerado. El informe del "Ad Hoc Panel sobre la utilización del ferrocemento en los países en desarrollo" convocado por el Consejo de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Internacional (BDSTID) de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos de América, mencionó aplicaciones potenciales del ferrocemento, material adecuado especialmente para los países en desarrollo. En los países desarrollados, donde el costo de la mano de obra es alto, los costos totales de las estructuras de ferrocemento pueden minimizarse utilizando elementos prefabricados. El proceso de prefabricación puede ser, posiblemente, el mejor uso que puede dársele a este material.

Mientras que se presenten las diferentes aplicaciones del ferrocemento, para propósitos de claridad sería más metódico clasificarlas en aplicaciones marinas y terrestres. Durante las primeras etapas de desarrollo, el uso del ferrocemento se restringía a la construcción de barcos y, por lo mismo, sería conveniente hablar primero de las aplicaciones marinas.

5.1 Aplicaciones marinas

Barcos. Botes de ferrocemento se han construido y están funcionando en países tales como Bangladesh, Nueva Zelanda, China, India, Indonesia, Corea, - Sri Lanka y Tailandia.

El ferrocemento, al igual que cualquier otro material de construcción, tiene sus puntos fuertes y débiles, por lo que es importante que se aplique a tipos y tamaños de embarcaciones donde sus características pueden aprovecharse mejor. El ferrocemento, comparado con la madera y el plástico reforzado con fibras, es un material relativamente pesado. La mayoría de los barcos de madera de menos de 10 m de largo se construyen con planchas de un espesor inferior a 25 mm. Para obtener el mismo peso en ferrocemento, tendríamos que utilizar un casco con un espesor de 8 mm. Aunque se han construido barcos pequeños con casco de ferrocemento de este espesor, la resistencia al impacto no es satisfactoria para un barco de trabajo utilizado para pesca o transporte. En su actual estado de desarrollo, el ferrocemento ha demostrado ser más adecuado para barcos con longitud mayor que 10 m. - Aun de tamaños más grandes, un barco de ferrocemento será más pesado que un barco de madera, pero esto no representa gran desventaja a velocidades moderadas. Un barco de 10 m requiere de una potencia de 3 HP por tonelada de peso, para moverse a una velocidad de 6 nudos. Para velocidades más bajas, el mayor peso de la embarcación de ferrocemento no importa mucho, pero para velocidades mayores, el peso adicional requiere de mayor potencia. Los barcos no mecanizados, tales como los barcos de río impulsados por pértigas o remos, no navegan a velocidades superiores a 4 nudos, y para estas bajas velocidades el peso adicional del ferrocemento no importa mucho en el esfuer-

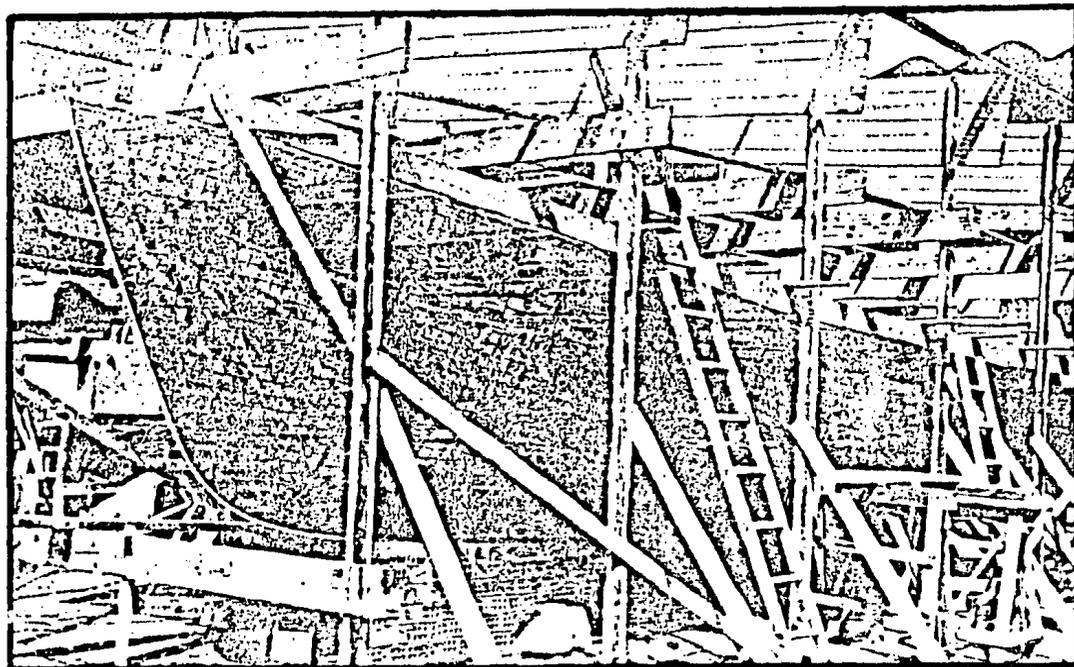


Fig. 5.1 Barco de ferrocemento en construcción. Nótese la pequeña separación que tienen las varillas de refuerzo.

zo de propulsión.

De los dos tipos generales de barcos construidos de ferrocemento, uno se ha puesto en práctica en muchos países del mundo, y el otro, el que acabamos de describir en el párrafo anterior, se le ha encontrado una aplicación típica en la República Popular China. El primer tipo comprende embarcaciones estilo occidental con cascos diseñados y construidos para recreo, para pesca en aguas profundas. Este tipo de construcción requiere de mano de obra especializada y es relativamente costoso, y con frecuencia es tan complicado como otros métodos de construcción de barcos.

El segundo tipo de barco de ferrocemento es la construcción de cascos sencillos, indígenas, diseñados para utilizarse en aguas tranquilas como los miles de sampanes construidos en China.

Las embarcaciones indígenas para trabajo, tales como los sampanes, las piraguas, los dhows (embarcaciones árabes de un solo mástil) y el tipo de embarcaciones utilizadas en los ríos Ganges, Nilo, Zaire (Congo) y el Mekong, con los cascos curvos de 8 a 20 m de largo, son idealmente adecuadas para las características únicas del ferrocemento, las cuales pueden aprovecharse mejor. Los cascos de ferrocemento adquieren una gran resistencia cuando tienen forma curva. Para estas embarcaciones, la falta de especificaciones de diseño, la preocupación de los ingenieros navales que trabajan actualmente en embarcaciones para aguas profundas, tiene relativamente poca importancia. Requieren de menos tecnología estricta y de control de calidad, ya que se someten a muchos menos esfuerzos y riesgos que las embarcaciones para aguas profundas.

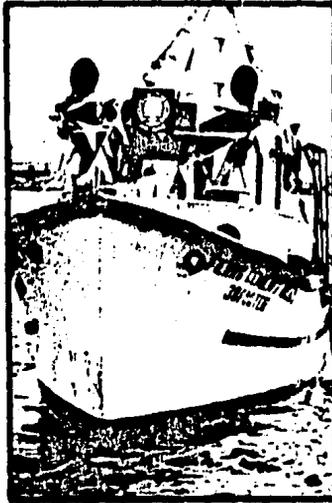


Fig. 5.2 Bote mecanizado de ferrocemento de 11.6 m de longitud, para pesca, en la India.

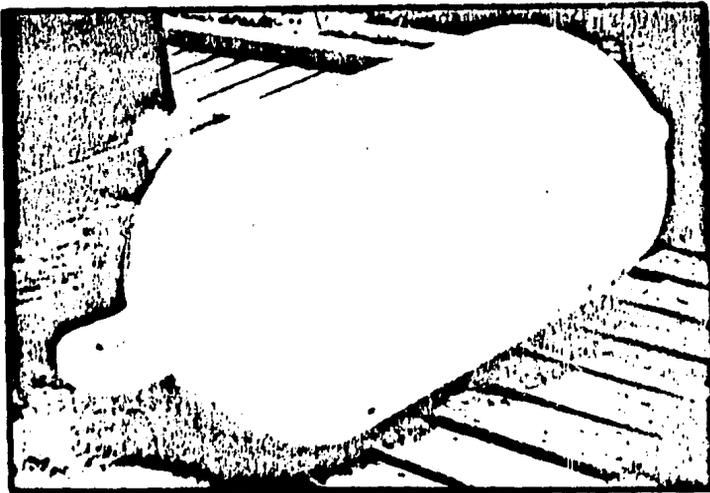


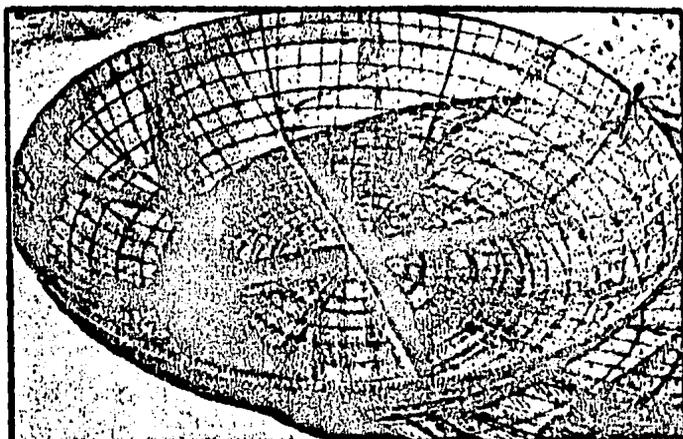
Fig. 5.3 Boya cilíndrica para un sistema de flotación - usado en el cultivo de mejillones verdes, en Filipinas.

En los barcos indígenas lo más importante es el casco, que permite al constructor hacer máximos ahorros en el costo del ferrocemento, en tanto que en los barcos de estilo occidental, los accesorios internos frecuentemente - constituyen un elevado porcentaje del costo total; cualquier ahorro en el casco es una pequeña parte del costo total. Los barcos de estilo indígena se construyen mejor en la localidad, como en la mayoría de los países asiáticos, debido a que la mano de obra es más accesible y de bajo costo, supervisada por técnicos expertos.

Las embarcaciones indígenas generalmente no están motorizadas, al menos no tienen máquinas internas, por lo que el problema de un apoyo adecuado en el casco, para las vibraciones del motor, no tienen importancia. Sin embargo estos barcos pueden motorizarse externamente, ventaja importante cuando los barcos de madera existentes son muy frágiles para soportar la propulsión.

Boyas y flotadores. Entre las aplicaciones marinas más recientes se encuentran las boyas y los flotadores de ferrocemento. Durante un programa de capacitación de cuatro meses para la tecnología del ferrocemento, realizado en 1978 por el Instituto Asiático de Tecnología (AIT) de Bangkok, Tailandia, para un grupo de ingenieros indonesios, se llevó a cabo la construcción de flotadores de ferrocemento con formas rectangulares y cilíndricas.

El flotador rectangular está diseñado para que funcione como una estación flotante de bombeo. Los espesores de sus paredes son de 25 mm, y sus dimensiones totales son las siguientes: longitud 1.2 m, anchura 1.2 m, y altura 0.75 m. Está diseñado con un núcleo hueco de forma cuadrada, ubicado en el sentido de su altura y que sirve para acomodar el tubo de succión o de entrada. La bomba debe instalarse en la parte más alta de la abertura cuadrada.



(a)



(b)

Fig. 5.4 Embarcación hindú de ferrocemento.
a). Antes del recubrimiento con mortero.
b). Embarcación terminada en uso.

da. Sin la bomba y otras instalaciones el flotador pesa 580 kg; con una carga de 200 kg, puede flotar 0.35 m sobre el nivel del agua, las pruebas de flotación llevadas a cabo dieron buenos resultados. Tales estructuras pueden ser útiles en pequeños proyectos de abastecimiento de agua en áreas rurales de los países en desarrollo, especialmente donde el agua se obtiene de ríos fangosos.

El flotador cilíndrico tiene un diámetro de 0.9 m y una longitud de 6 m, y está diseñado con terminales hemisféricas. Puede utilizarse como puente flotante junto con unidades similares (dos flotadores cilíndricos colocados unos junto a otro con sus ejes longitudinales paralelos entre sí y con placas de madera sobre ellos a fin de formar el camino). El peso de una de estas unidades es aproximadamente de 510 kg. Aun sin el uso de aditivos en el mortero o sin ningún recubrimiento en la superficie, el flotador resistió exitosamente las pruebas de flotación.

Del mismo modo se ha tenido éxito con boyas cilíndricas similares, que se utilizan en el Departamento de Acuicultura del Centro de Desarrollo de Pesca de Asia Suroriental ubicado en las Filipinas, elaboradas para un sistema de flotación usado en el cultivo de mejillones verdes.

Cajas flotantes. Debido a las desfavorables condiciones de construcción y a las limitaciones en el presupuesto para el proyecto del rompeolas de la bahía de pesca Hsin-Kanq en Taiwán, se fabricaron parcialmente con ferrocemento cajas flotantes para el rompeolas de tipo compuesto. Las cajas de 10 m de ancho, 12 m de longitud y 6.7 m de altura, se construyeron con una pared lateral doble de concreto reforzado y ferrocemento; las partes de ferrocemento y la base de concreto reforzado estaban protegidas con una cubierta

corrugada de ferrocemento en la superficie inferior. El corrugado incrementó el coeficiente de fricción de las cajas con el piso de piedra y la anchura de la caja consecuentemente pudo reducirse bastante. El peso de una de estas cajas era del 40% solamente del peso de una caja de concreto reforzado; como resultado de ello, los gastos de las instalaciones de lanzamiento también se redujeron proporcionalmente, disminuyendo a su vez el costo total de proyecto.

Después de esta experiencia, la mayoría de los países en vías de desarrollo podrán continuar estudiando la posibilidad de usar cajas flotantes de ferrocemento para proyectos de rompeolas en puertos o bahías de pesca de pequeñas dimensiones.

5.2 Aplicaciones terrestres

El término "aplicaciones terrestres" comprende un amplio rango de usos del ferrocemento, del que sólo se excluyen los usos marítimos explicados anteriormente. Básicamente, estas aplicaciones pueden clasificarse en tres grandes grupos: vivienda, industria, y agricultura y pesca.

5.2.1 Vivienda

El ferrocemento es el material ideal para la construcción de viviendas, principalmente techos, debido a su costo relativamente bajo, a su durabilidad y a su resistencia al intemperismo. Además su versatilidad, aunada al hecho de que la construcción con ferrocemento no requiere equipo complicado o mano de obra especializada, incrementa su utilidad, para producir elementos esenciales en la construcción de viviendas. A diferencia de la mayoría



Fig. 5.5 Residencia construida con elementos modulares - de ferrocemento para techo, en Filipinas.

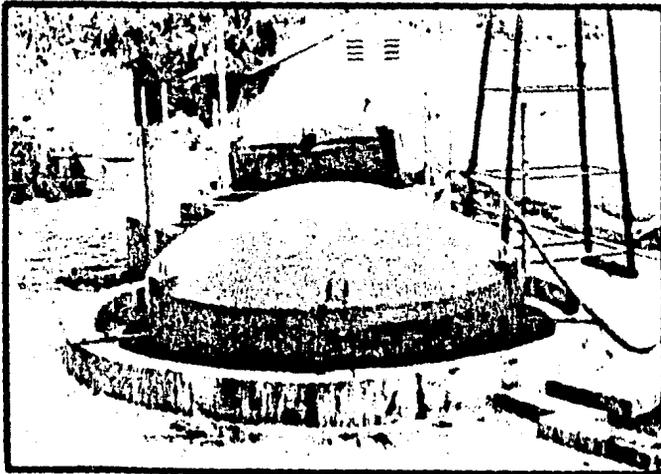


Fig. 5.6 Recipientes de ferrocemento para plantas de bio gás, elaborados por el Centro de Investigación de Ingeniería Estructural, en Roorkee, India.

de los materiales tradicionales, el ferrocemento puede ser fácilmente moldeado en forma de domo, de bóveda o como superficies planas o de forma libre, o hasta formas extruidas. En investigaciones más recientes se ha informado que el moldeado, estampado, doblado y colado por vibración también pueden aplicarse de manera satisfactoria al ferrocemento.

En las Filipinas, en 1974, se desarrolló un sistema habitacional modular de bajo costo utilizando ferrocemento. El Sistema de techado consiste en un módulo ensamblado llamado monopod; este tipo de módulos unidos forman conjuntos para construir una casa completa. Desde esa época se han construido muchas casas con este sistema y actualmente está en construcción un hospital de 25 camas, y que podrá ampliarse a 75, con un costo de 20 ó 30% menor que una construcción tradicional de concreto reforzado. En 1977, Arobindo - Ashram, de la India, construyó un techo de ferrocemento a bajo costo, en forma de catenaria, para la Iron Ore Miners de Orissa, India. La Dome Construction (Auckland) Ltd. de Nueva Zelanda ha construido edificios para viviendas en forma de domos. El tamaño promedio es de aproximadamente 90 m - que pueden ampliarse hasta 400 m, con espacio adicional de piso en niveles de mezzanines. Ese mismo año, se construyeron en México domos de ferrocemento prefabricados y hechos en obra, de 6.1 x 6.1 m en autoconstrucción, y se encontró que eran muy adecuados para techos. El comportamiento estructural de estas casas es muy satisfactorio y sobre todo son muy económicas.

Las láminas de ferrocemento se idearon y patentaron en Sri Lanka a principios de 1960. Naaman y Shah hicieron investigaciones sobre tableros similares y observaron que, en 1976, éstos eran competitivos en cuanto al costo en los Estados Unidos, y que su comportamiento fue marcadamente superior.

La investigación sobre tableros para techo en placas plegadizas de ferrocemento llevada a cabo en el AIT probó que tales elementos que medían más de 5 m podían sustituir a los tejados para cobertizos de automóviles elaborados con asbesto. Para un tablero de ferrocemento con un precio similar, se observó que la capacidad portante de carga era del doble de la que tiene un tablero de asbesto. En la actualidad, el único demérito de los techos de ferrocemento prefabricados es su peso comparado con el de los techos de asbesto; como consecuencia, los costos de transporte y colocación suelen ser más elevados.

Los tamaños reales de los tableros de forma corrugada se determinaron por un intercambio entre el módulo de sección y la versatilidad de ensamblarlos. Los tableros son de 1.25 cm de espesor, 30.48 cm de ancho y 244 cm de largo, con un peso de 39 kg. El campo de aplicación de este tablero es muy amplio: muros, pisos, techos, columnas compuestas, vigas compuestas, etc.

En la URSS, desde los años sesenta se está aplicando mucho como elemento de techumbres. Se han hecho investigaciones para el uso del ferrocemento en techumbres, en galerías de transportadores y edificios deportivos con claros hasta de 30 m. Los techos tienen la forma de cascarones cilíndricos reforzados con anillos y nervaduras longitudinales. En comparación con otras estructuras, las de ferrocemento son menos costosas, hasta 20 ó 40% menos, que las estructuras de concreto y acero, y tienen mejor comportamiento estructural.

Los elementos de vivienda de ferrocemento pueden prefabricarse en forma masiva, proceso más adecuado para la demanda concentrada de las áreas urbanas. En la URSS los métodos industrializados de producción de elementos de

techos de ferrocemento has tenido éxito y se están utilizando para edificios deportivos con claros de 18 a 24 m. Se encontró que las placas dobladas en forma de V, de ferrocemento, son bastante adecuadas para construcción de techos y pisos prefabricados, y que muestran buen funcionamiento estructural en grietas y deflexiones. Aun cuando podría ser mas económico producir masivamente los elementos para techo y otras aplicaciones en fábricas urbanas y transportarlos a áreas rurales, también es fácil fabricar el ferrocemento en la obra utilizando materiales y mano de obra locales. Todavía falta mucho trabajo por hacer para determinar las formas y tipos en que deben fabricarse los elementos adecuados y para explotar los métodos y diseños para fijar y asegurar estos elementos en posición adecuada.

Además de los elementos integrales para vivienda descritos anteriormente, el ferrocemento también se ha usado con buenos resultados en la construcción de elementos auxiliares como los tinacos para agua, pavimentos para jardín, fosas sépticas, instalaciones sanitarias y revestimientos interiores para albercas. En Nueva Zelanda los tinacos prefabricados han tenido gran demanda para el almacenamiento de agua en las granjas. Se pueden conseguir tinacos con una capacidad de 757 a 18 925 litros; además se ha observado que los tinacos pequeños cuestan lo mismo que los tinacos construidos con otros materiales, pero los costos de almacenamiento por litro disminuyen rápidamente cuando se utilizan tinacos de mayores dimensiones.

El Centro de Investigación sobre Ingeniería Estructural localizado en Roorke, India, ideó un procedimiento de colado intensivo semimecanizado, para fabricar tinacos cilíndricos con una capacidad de hasta 2 500 litros. Estos tinacos se fabrican hoy en día a escala comercial en la India y son -

muy populares como recipientes de almacenamiento para rascacielos.

Fosas sépticas elípticas y rectangulares se han instalado en Nueva Zelanda y en Indonesia respectivamente. Las dimensiones de la fosa pueden elegirse de acuerdo con las necesidades de toda una comunidad rural o de una región en desarrollo donde se sabe que las condiciones sanitarias son muy deficientes. Estas fosas sépticas se han construido recientemente en Sulawesi del Sur, Indonesia, mediante el sistema de autoconstrucción.

5.2.2 Industria

A diferencia de la vivienda, donde las cargas consideradas para diseñar los diversos elementos son nominales, los elementos que se utilizan en la industria están sujetos a cargas estáticas más pesadas además de frecuentes cargas de impacto y dinámicas. Es en este aspecto donde se aprovechan mejor las propiedades superiores del ferrocemento. Como resultado del acero de refuerzo finamente repartido, se ha observado que el ferrocemento se comporta como un material dúctil homogéneo; consecuentemente, su resistencia al impacto y a la fatiga es más alta, comparada con la que tiene un elemento de concreto reforzado equivalente. Aunque existen muchos usos potenciales para el ferrocemento como cubiertas para pozos entubados, tanques de sedimentación y estanques de oxidación, sólo las aplicaciones que se enlistan a continuación han sido fomentadas o desarrolladas en buena escala.

Debido a las técnicas de producción en serie desarrolladas por la URSS el rango de las aplicaciones efectivas del ferrocemento se ha ampliado en gran medida. Los elementos para el techado industrial y para otros edificios públicos pueden ahora fabricarse perfeccionando las normas que tales estructuras demandan. La forma del refuerzo se logra con la ayuda de prensas de

troquel automáticas, y la malla de alambre que cubre este armazón de refuerzo se rocía con un aislante polimero que protege el elemento contra la corrosión. Este procedimiento, además de que incrementa la durabilidad, disminuye los requerimientos de mantenimiento a un mínimo necesario, haciendo a este material especialmente adecuado para edificios industriales.

Un diseño de interés es el techo de una sala para diversos propósitos con claros de 24 m; elementos piramidales fabricados en vibromoldes dobles de metal, con mortero de cemento vaciado a través del vértice de las pirámides, y vapor para el tratamiento térmico del molde inferior, cubren esta construcción. Las flexiones que se observaron en este tipo de techo fueron muy pequeñas; además, la impermeabilidad de estas bóvedas, la cual fue lograda con un mastique especial ha mejorado considerablemente el aislamiento del calor.

Aunque no existe información publicada de que se hayan usado tubos de ferrocemento, una investigación llevada a cabo en el AIT muestra que esos tubos tienen propiedades superiores cuando se les compara con tubos equivalentes de concreto reforzado. Un tubo de ferrocemento con la misma capacidad de carga, pesa la mitad, tiene una mayor resistencia a las cargas dinámicas y de impacto, un mejor mecanismo para detener las grietas, y cuesta lo mismo que un tubo de concreto reforzado. Si se adopta la técnica desarrollada para el colado de unidades cilíndricas o si se hacen girar estas unidades, los costos de producción se reducirán, además de que se mejoraría el control del espesor, por lo que vale la pena que sea investigado.

La Administración Nacional Aeronáutica y Espacial de los Estados Unidos ha considerado la posibilidad de usar ferrocemento en la construcción de un -

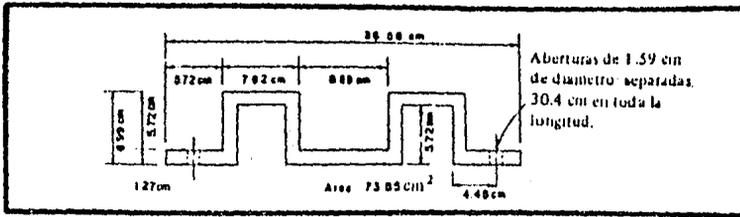


Fig. 5.7 Tablero transversal de copa.

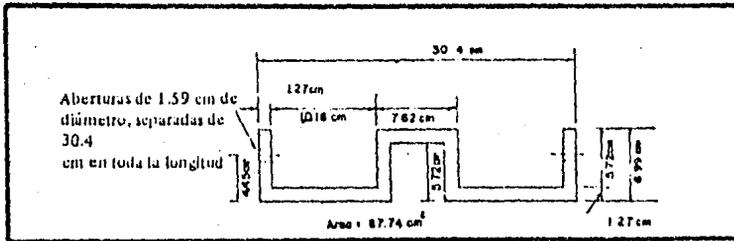


Fig. 5.8 Tablero transversal en canal.

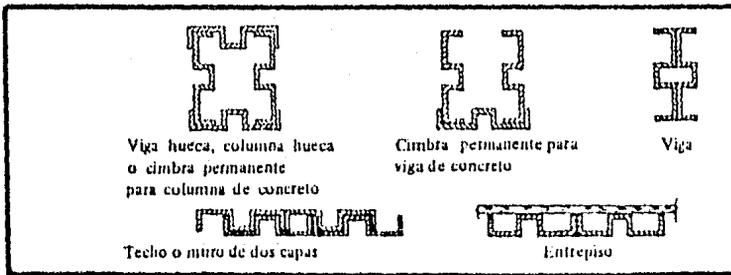


Fig. 5.9 Ensamblajes diferentes de sección en canal.

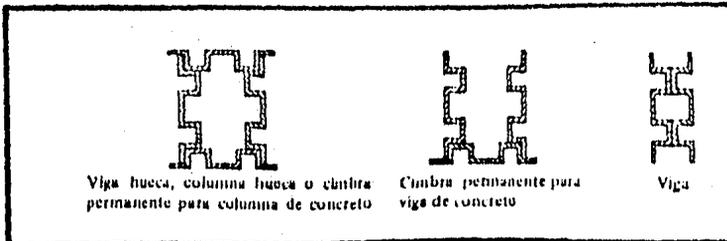


Fig. 5.10 Ensamblajes diferentes de sección de copa.

tunel de viento. En el informe de este estudio, publicado en 1972, se informa que es posible usar el ferrocemento para recubrir las superficies de la cubierta y del casco, tanto desde el punto de vista de construcción como del de la economía. Aunque se realizaron pruebas rigurosas para las propiedades de estos elementos, especialmente para su uso en la sección de impulso del tunel, no existen indicios de que realmente se hubiera fabricado para usarse en gran escala. Un estudio mas completo sobre la fabricación automatizada de estos elementos puede dar mayor aceptación a estructuras tan complejas.

Vigas cajón de ferrocemento se han utilizado en Sri Lanka como sustituto de las trabes de acero utilizadas en grúas viajeras de gran capacidad. Los conductos para el manejo de materiales y otros sistemas de transporte similares son otros elementos en los que se pueden aprovechar las propiedades de resistencia a la abrasión que tiene el ferrocemento.

En la India se han elaborado tapas de registro y recubrimientos de pozos de visita con ferrocemento. Estos serían los sustitutos ideales para las tapas de hierro normales, y los mas económicos para los recubrimientos de concreto reforzado.

Muros de cortante contruidos con elementos de ferrocemento que también sirven como toldos se han usado con éxito en edificios altos en Nueva Zelanda. Tanques de agua, como recipientes industriales de almacenamiento, se han utilizado con mucha frecuencia en diferentes partes del mundo, como se señaló en el apartado correspondiente a la vivienda.

5.2.3 Agricultura y pesca

Los métodos tradicionales de almacenaje y su efectividad relativa contra pérdidas debidas a aves, insectos, roedores y hongos, difieren de un país a otro. El incremento en los suministros de granos alimenticios tales como arroz, trigo y maíz han ocasionado una necesidad sin precedente de almacenaje para granos en los países en desarrollo, y muchos de ellos se enfrentan a la necesidad de contar con las instalaciones apropiadas de almacenaje.

Los recientes avances en la tecnología del ferrocemento han demostrado sus ventajas indiscutibles en la construcción de silos. Pueden construirse en la obra y/o en forma prefabricada. Los silos de ferrocemento requieren de poco mantenimiento y proporcionan protección contra el fuego, contra roedores, aves, insectos, agua e intemperie. El ferrocemento es impermeable al agua y con los selladores apropiados también puede hacerse hermético al aire.

El potencial de empleo de silos de ferrocemento se encuentra mas claramente a nivel comunal o de pueblo. Estos pueden ser una serie de silos individuales similares al "Thailo", o un silo individual con capacidad aproximada de 100 toneladas similar a los de Chipre o a los grandes silos argentinos.

Pueden construirse los silos de ferrocemento en fábricas, pero también pueden construirse en el lugar. Al igual que para sus otras aplicaciones, los silos requieren únicamente de habilidades artesanales sencillas, efectuadas con mano de obra local y con una supervisión mínima. En muchas áreas en desarrollo, la construcción con ferrocemento de instalaciones para almacenaje de alimentos, no es muy diferente de la construcción tradicional. En Bangladesh los silos de ferrocemento de 6 a 10 toneladas de capacidad, con refuer-

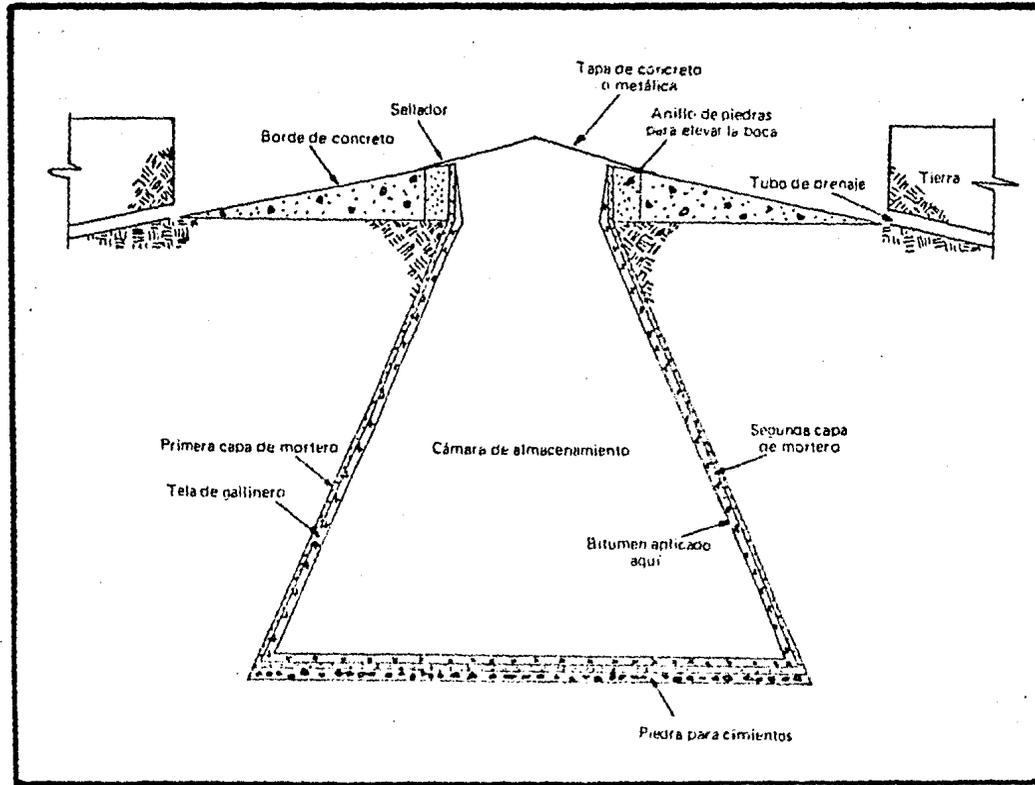


Fig. 5.11 Sección transversal de una fosa de almacenamiento subterráneo.

zo de armazón de bambú, con dos capas de malla hexagonal de 1.25 cm de calibre 20, en ambos lados del bambú, resultaron muy satisfactorios. El "Thailo" con capacidad de 4 a 10 toneledas, diseñado y aprobado en Tailandia, es especialmente adecuado para países tropicales húmedos. Los diseños son versátiles, los elementos de almacenaje pueden construirse en sitios extremadamente adversos, donde la capa freática está a nivel de la superficie del terreno o en áreas remotas donde aun el acceso en vehículos es imposible. En la India el Centro de Investigación sobre Ingeniería Estructural - localizado en Roorke, construyó silos prefabricados de ferrocemento hasta de 3 toneladas de capacidad para el almacenaje de arroz. Los silos son de forma cilíndrica y según las necesidades del cliente, fácilmente pueden armarse depósitos de 1 a 3 toneladas de capacidad, eligiendo uno, dos o tres elementos de muros, uno sobre el otro, y rellenando las juntas con mortero. Esta misma unidad puede utilizarse para el almacenaje subterráneo de granos alimenticios. En este caso deben aplicarse dos capas de emulsión de brea - sobre la superficie externa del silo para protegerlo del contacto directo con la tierra, agua, etc.

En Etiopía se diseñó una unidad de almacenaje subterráneo de ferrocemento - recubierto para reemplazar los tradicionales depósitos de almacenaje no recubiertos. Se sabe que también en América Latina ha tenido mucha aceptación un sistema de almacenaje subterráneo similar. Los depósitos tradicionales en la provincia de Harara en Etiopía, tienen capacidad desde 0.5 hasta 20 toneladas, pero existen registros de depósitos que contienen de 50 a 70 toneladas. Hasta 1973, se informó de la existencia de depósitos subterráneos para almacenaje de 7 toneladas de capacidad, hechos de ferrocemento. Estos depósitos son herméticos al aire y proporcionan protección con-

tra todo tipo de daños, siendo muy populares en las comunidades agrícolas.

Recientemente, en el Centro de Investigación sobre Ingeniería Estructural - de Roorke en la India, se probaron con buenos resultados recipientes para biogás. Estos recipientes de ferrocemento sustituyen a los depósitos de acero dulce en las plantas de biogás. Los recipientes de ferrocemento son aproximadamente un 50% mas económicos que los de acero, y tienen buenas propiedades de funcionamiento. También pueden prefabricarse y ensamblarse en la obra los elementos de los muros. Se siguen llevando a cabo trabajos de desarrollo para mejorar los diseños actuales, y su uso probablemente reduzca el costo de la planta en un 20 ó 25%.

En la URSS se han utilizado cubas de ferrocemento para almacenar vino, mismas que en la India se han destinado al ensilaje de pescado. Por otra parte, en las Filipinas se han utilizado tanques de ferrocemento destinados a la cría del camarón.

La investigación realizada por el AIT ha demostrado que los recubrimientos de ferrocemento que se aplican en los canales para proyectos de irrigación son mas económicos si se comparan con los de concreto reforzado tradicionales. En la URSS se construyen en serie, como unidades prefabricadas de ferrocemento, acueductos elevados con un espesor de paredes de 20 mm y hasta 8 m de longitud.

C A P I T U L O 6

DESARROLLO FUTURO DEL FERROCEMENTO

En la primera construcción de Lambot en el siglo pasado, se tomó como base el concreto reforzado convencional, el cual tenía características diferentes a las del ferrocemento que requerían que el refuerzo fuera colocado de una forma determinada para posteriormente ser cubierto por el concreto. El principal papel del refuerzo en el concreto reforzado convencional es resistir las tensiones y, el efecto de controlar el agrietamiento es de secundaria importancia.

Ha sido necesario el paso de varias décadas para que el ferrocemento resurgiera y ahora comience a ser visto como un posible y enteramente único material de construcción. No obstante, el resurgimiento del ferrocemento ha tenido dos etapas. Durante los cincuenta y sesenta, la mayoría de los esfuerzos dedicados al ferrocemento eran relacionados con las construcciones marinas; en su mayor parte para barcos del placer, aunque no eran insignificantes los destinados a barcos de trabajo y de pesca. A principios de los setentas, en parte debido a la publicación que hizo la Academia Nacional de Ciencias de un extenso reportaje titulado "Ferrocemento: Aplicaciones en los países en Desarrollo", se determinó que este material tenía una gran cantidad de aplicaciones en estructuras terrestres y en cambio, una cantidad limitada de aplicaciones marinas. Investigaciones subsecuentes, unos años después, han progresado rápidamente y el ferrocemento es ahora seriamente considerado como un posible material estructural con características y usos únicos.

Al calcular los requerimientos de investigación y evaluar el futuro del ferrocemento, se debe considerar el reciente y algo paralelo desarrollo del concreto reforzado con fibras. Ambos dependen de una subdivisión de espacios pequeños y de elementos de refuerzo de diámetro relativamente pequeño, en virtud de lo cual, en los dos materiales se tiene una gran superficie específica que les proporciona un grado de control de grietas y de dureza que para todos los propósitos prácticos, estos materiales son formas completamente distintas del concreto reforzado convencional.

Desde el punto de vista de la elaboración, el concreto reforzado con fibras y el ferrocemento difieren en algunas formas prácticas. El concreto reforzado con fibras debe ser colocado en formas (cimbra), mientras que al ferrocemento se le puede dar la forma deseada moldeando la armadura y las mallas, para posteriormente cubrirlas con el mortero. El proceso de moldeado es obviamente una labor mas compleja (las fibras son simplemente agregadas a la mezcla de concreto).

No obstante que la colocación de varias capas de malla para el refuerzo en un trabajo mas complicado, la resistencia a la tensión después de la primera grieta en el ferrocemento es desde luego mayor que en el concreto reforzado con fibras, porque la resistencia última está determinada por la resistencia última a la tensión de cada elemento individual. De esta manera, las semejanzas entre el concreto reforzado con fibras y el ferrocemento se vuelven complejas y dependen en mucho del uso a que está destinado el producto final. A este respecto, es de considerable significancia el hecho de combinar el concreto reforzado con fibras con una malla de acero relativamente gruesa, en un intento por obtener las ventajas inherentes tanto del concreto reforzado con fibras como del ferrocemento. Al resultado de

esta construcción compuesta se le ha denominado ferrocemento fibroso.

6.1 Investigaciones necesarias para el desarrollo del ferrocemento

Entre los problemas mas apremiantes relativos al desarrollo del ferrocemento esta la cuestión de definirlo en forma adecuada. Esto puede parecer cosa de rutina, pero es de fundamental importancia. Las características especiales del ferrocemento están basadas en la distribución y subdivisión del refuerzo a través del mortero. Pero, ¿en que punto de la subdivisión es el ferrocemento exactamente otra forma de concreto reforzado? Se ha intentado fijar límites con respecto a la superficie específica o el porcentaje de volumen de refuerzo, que permitan establecer la frontera entre el concreto reforzado y el ferrocemento. Pero estos esfuerzos pueden ser infructuosos debido a que las características del ferrocemento están en función del grado de subdivisión del refuerzo. Este punto se vuelve mas complejo si tomamos en cuenta que, en muchas de las aplicaciones del ferrocemento el refuerzo puede ser a base de varillas de acero usadas en combinación con malla de elementos de diámetro relativamente pequeño. De esta manera, las especificaciones de una fracción mínima de volumen de refuerzo o un promedio de superficie específica puede desecharse.

El problema de definir al ferrocemento en función de la distribución del refuerzo se presenta cuando se considera la cuestión de los esfuerzos permisibles a la tensión. Tomando en cuenta que la definición de esfuerzo permisible de trabajo puede de hecho estar basada en el agrietamiento permisible, podemos encontrarnos ante el dilema de tener esfuerzos de diseño basados en la manera en la cual el refuerzo es distribuido. Además, los esfuerzos per

misibles, sin lugar a dudas, están en función del tipo de aplicación (tanques, techos, barcos, tec.) y del tipo de refuerzo (dúctil o alta resistencia).

Es poco probable que el potencial de este material se desarrolle introduciendo una definición arbitraria basada en el grado de distribución del refuerzo. De hecho, semejante empeño puede ser contraproducente. Una guía de diseño para ferrocemento probablemente surgirá proporcionando los esfuerzos de trabajo, que dependen de: el tipo de estructura, agrietamiento permisible, tipo de refuerzo, recubrimiento del refuerzo y distribución del mismo.

Además del punto anterior, que requiere de una intensa investigación, hay desde luego una cantidad adicional de áreas de investigación que deben ser abordadas para lograr el desarrollo completo del potencial del ferrocemento. Estas son las relativas a la resistencia al impacto, a la fatiga, a la corrosión, y el efecto del proporcionamiento del mortero en la resistencia de la mezcla. También se debe investigar el efecto del tipo de refuerzo y su distribución con respecto a la resistencia a la compresión y resistencia bajo cargas multiaxiales.

Criterios de diseño para diferentes tipos de malla deben ser desarrollados. El diseño del ferrocemento depende en gran parte de las características de la malla de refuerzo. Es necesario determinar y especificar un rango óptimo de propiedades para la malla, tales como: abertura, diámetro de los alambres y características del sistema de la malla en base a su esfuerzo-deformación. Nuevos sistemas de mallas y formas de ensamble pueden ser diseñados dependiendo de la aplicación del ferrocemento.

Recubrimientos y selladores mas efectivos y durables son necesarios para el ferrocemento, sobre todo en las aplicaciones marinas, para prevenir la penetración de agua y sales que podrian producir la corrosión de la malla de refuerzo.

No obstante que semejantes temas de investigación continuarán siendo de considerable interés, la explotación masiva del ferrocemento como material de construcción, depende poderosamente de los esfuerzos concentrados en la investigación para determinar el papel de la pequeña separación de los elementos de refuerzo dentro del compuesto.

6.2 El futuro del ferrocemento

El punto hasta el cual el ferrocemento continuará generando interés como un útil y económico material de construcción, depende no solo de los esfuerzos de investigación sino también de la creatividad e imaginación de los diseñadores. Proporcionar a los diseñadores las herramientas necesarias será desde luego importante para el desarrollo de útiles criterios de diseño y métodos simplificados de análisis. Esto puede no ser fácil, porque probablemente no se llegue a unos pocos esfuerzos permisibles de diseño que nos permitan dimensionar elementos por el proceso de esfuerzo-deformación. Mas bien, los criterios de diseño serán expresados en términos del uso proyectado, aberturas de grieta permisibles y tipo y distribución del refuerzo. A pesar de todo, la complejidad inherente al ferrocemento debe ser reducida a procedimientos de diseño fácilmente aplicables.

Un problema importante es el relativo al recubrimiento. Intentos con respecto al uso del ferrocemento en la construcción de edificaciones, frecuentemente van en contra del código de disposiciones para el recubrimiento mi-

nimo. Una explotación a fondo de este material, dependerá de especificaciones de diseño y definiciones que puedan ser adoptadas por las oficinas de construcción locales.

Aparte de la dificultad para interpretar los resultados de las investigaciones en términos de estándares de diseño, el rango potencial de aplicaciones del ferrocemento es verdaderamente amplio. La habilidad para diseñar elementos delgados que poseen resistencia y ductilidad permite emplear el concreto en aplicaciones que anteriormente estaban reservadas para los plásticos y los metales.

No solo son excitantes las oportunidades para la creación de nuevos usos estructurales para este material, los procedimientos de construcción y manufactura son igualmente desafiantes. La colocación de capas de malla y la impregnación subsecuente de ellas con mortero es un proceso de intensa labor, y el futuro del ferrocemento está basado en la medida en que se automatice el proceso o de otra forma se haga mas eficiente.

CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES

Aunque se sabe que el ferrocemento ha sido usado desde hace mas de cien años, sólo en las últimas dos décadas ha adquirido la categoría de material versátil que tiene numerosas aplicaciones en la industria, la vivienda, la agricultura y la pesca. Cuando un nuevo material se introduce al mercado, existe una tendencia por parte de sus defensores a presentarlo como un material maravilloso mejor que cualquier otro; pero existe también una resistencia importante por parte de aquellos que piensan que el uso de los materiales ya existentes o tradicionales está siendo amenazado. El único camino racional para evaluar el material es buscar un punto de vista equilibrado que permita optimizar la utilización de todos los materiales disponibles. Con mucha frecuencia, los materiales nuevos deberán complementar a los materiales conocidos, en tanto que se realizan esfuerzos adicionales para descubrir aplicaciones mas novedosas; algunas veces, la unión de los viejos y los nuevos materiales puede hacer posible lo que no se logra con cada uno separadamente.

A partir de los argumentos expuestos en el presente trabajo es evidente que, en la mayoría de los casos, el ferrocemento tiene la capacidad para sustituir a los materiales tradicionales de la construcción en aplicaciones específicas. La eficiencia con que un ingeniero de diseño pueda mezclar este material con otros materiales convencionales para usarlos en una estructura, depende solamente del tipo de estructura, de los costos loca-

les y del uso óptimo del material.

La tecnología del ferrocemento es muy apropiada para los países en desarrollo principalmente porque:

- a) Sus materias primas básicas pueden conseguirse en la mayoría de los países.
- b) Se puede fabricar casi con cualquier forma para satisfacer las necesidades del usuario; consecuentemente, los diseños tradicionales con frecuencia pueden reproducirse y mejorarse. Debido a que es más elaborado, es más durable que la madera y más barato que el acero importado.
- c) La habilidad que debe tenerse para la construcción con ferrocemento se puede adquirir rápidamente, e incluye muchas de las maniobras tradicionales en los países en desarrollo. No necesita maquinaria pesada o una planta especial, pero sí mucha mano de obra. Con excepción de los diseños demasiado complejos, un supervisor capacitado puede lograr el control de calidad necesario en la fabricación utilizando mano de obra semicalificada.

En la construcción con ferrocemento siempre debe tomarse en cuenta el aspecto económico respecto a la calidad del producto deseado, a la localidad y a los materiales disponibles. Se ha observado por ejemplo, que en la mayoría de los países asiáticos, la malla de acero representa del 66 al 75% del costo total de los materiales usados en una estructura de ferrocemento, y una malla tejida de alambre elaborada con una simple máquina manual para

tejer puede significar una reducción importante en el costo unitario de la estructura, además de que el material se obtiene mas fácilmente. La malla tejida a mano tendrá una resistencia superior a la de la malla hexagonal - galvanizada que se usa hoy en día.

No obstante que información adecuada para diseño y experiencia de campo han sido adquiridas para algunos tipos de estructuras de ferrocemento, el futuro de éste depende también, hasta cierto punto, de consideraciones económicas.

La competitividad del ferrocemento, económicamente hablando, con respecto a otros materiales, depende del tipo de aplicación y del país donde se realice la construcción. No es posible hacer una conclusión general con respecto a la viabilidad económica de la construcción con ferrocemento, teniendo en cuenta que el costo puede variar significativamente de país a país y dependerá del método de fabricación (por ejemplo concreto lanzado contra aplicación manual) y de otros parámetros microeconómicos.

Para países que se encuentran en vías de desarrollo industrial, donde el costo de los materiales es relativamente mayor que el costo del trabajo, algunas aplicaciones del ferrocemento parecen ser especialmente atractivas. En éstas se incluyen barcos, silos, tanques y techos. Para países industrializados, el ferrocemento parece económico para tanques de almacenamiento de mediano tamaño, algunos tipos de cascarones de formas complicadas y en donde la ligereza del peso pueda ser explotada con seguridad.

Cualquier recomendación con respecto al diseño de estructuras de ferrocemento dependerá del tipo de aplicación y deberá estar basada en un análisis ra

cional sustentado por resultados experimentales. Sin embargo, en vista del actual estado de conocimiento que se tiene del ferrocemento y excepto para aplicaciones especiales donde un estricto análisis puede ser necesario para garantizar un funcionamiento seguro, las siguientes recomendaciones pueden ser aplicadas en elementos donde se utilice malla cuadrada.

Para predecir el comportamiento del ferrocemento bajo condiciones de carga de servicio, un análisis elástico similar al método de diseño por esfuerzos de trabajo utilizado en concreto reforzado es aceptable, siempre y cuando el módulo de la malla de acero del sistema (el cual puede diferir del módulo de los alambres de acero, como ya se explicó al inicio del Capítulo 5) sea considerado. La carga última también puede ser determinada para miembros a flexión, analizando al ferrocemento como un elemento de concreto reforzado usando el método ACI para resistencia última. Para miembros a tensión, la carga última puede ser determinada aproximadamente por medio de la capacidad de carga de la malla de refuerzo solamente en la dirección de carga.

No obstante los grandes avances logrados hasta la fecha con respecto al ferrocemento, todavía falta mucho por hacer ya que el futuro del ferrocemento dependerá en gran medida de la creatividad en los diseños y también de los esfuerzos dedicados a la investigación. Es importante reconocer que el ferrocemento, como el concreto reforzado con fibras, nos permite diseñar para rangos de esfuerzos de tensión y estiramientos en el compuesto mas allá de los rangos previamente permitidos. Este aspecto, combinado con la ausencia de un requerimiento mínimo en el espesor del recubrimiento del refuerzo, proporcionará gran flexibilidad en el diseño de techos, paredes

y formas arquitectónicas precoladas, permitiendo esto último dar un acabado de fábrica a las superficies de elementos que actualmente son colados - en el campo.

B I B L I O G R A F I A

Batson, G. B., Sabnis, G.M. y Naaman, A.E. Survey of mechanical properties of ferrocement as a structural material. Ferrocement-Materials and Applications, SP-61, American Concrete Institute, Detroit, 1979, pp. 9-24.

Paul, B.K. y Pama, R.P. Ferrocemento. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., México, 1981.

Raichvarger, Z. y Raphael, Miriam. Grading desing of sand for ferrocement mixes. Ferrocement-Material and Applications, SP-61, American Concrete Institute, Detroit, 1979, pp. 115-132.

Romualdi, J.P. Research needs and the future of ferrocement. Ferrocement-Materials and Applications, SP-61, American Concrete Institute, Detroit, 1979, pp. 173-177.

Ferrocement: Applications in Developing Countries, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1973.

Sabnis, G.M. Ferrocement-past and present. Ferrocement-Materials and Applications, SP-61, American Concrete Institute, Detroit, 1979, pp. 1-8.

Shah, S.P. Ferrocemento, un Nuevo Material de Construcción. Revista IMCYC, Vol. 19, No. 126, Octubre 1981, pp. 46-59.

State-of-the-Art Report on Ferrocement, ACI Committee 549, Concrete International, Vol. 4, No. 8, August 1982, pp. 13-38.

Gordon, J. E., The New Science of Strong Materials, Penguin Books, Baltimore, 1968

Karasudhi, P.; Mathew, A. G.; and Nimityonskul, P., Fatigue of Ferrocement in - Flexure, Journal of Ferrocement (Bangkok), V.7, No. 2, oct. 1977, pp. 80-95.

Requirements for the Construction of Ferrocement Boats, Journal of Ferrocement (Bangkok), V.4, No. 1, Jan. 1975, pp. 14-16.

Housing Application in Ferrocement, Journal of Ferrocement. (Bangkok), V.11, - No. 1, Jan. 1981, Special ISSUE.

Shah, S.P. and Key, W.H., Impact Resistance of Ferrocement, Journal of the - Structural Division, ASCE, V.98, No. ST1, Jan. 1972, pp. 111-123.

Baugh, I. and Bowen, G.L., Corrosion in Ferrocement, The Ferrocement Hand - books No. 3, Journal of Ferrocement, V.5, No. 4, 1976.

Lee, S.L., Raisinghan; M. and Pama, R.P., Mechanical Properties of Ferrocement Seminario de la FAO sobre diseño y construcción de embarcaciones de ferrocemento, octubre de 1972.