

UNIDAD DE APOYO TÉCNICO
PARA EL SANEAMIENTO BÁSICO DEL ÁREA RURAL

FUNDAMENTOS PARA LA APLICACIÓN DE FERROCEMENTO



Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
Área de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental
Organización Panamericana de la Salud
Oficina Sanitaria Panamericana – Oficina Regional de la
Organización Mundial de la Salud

Auspiciado por:



**UNIDAD DE APOYO TÉCNICO PARA
EL SANEAMIENTO BÁSICO DEL ÁREA RURAL**

FUNDAMENTOS PARA LA APLICACIÓN DE FERROCEMENTO



Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
Área de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental
Organización Panamericana de la Salud
Oficina Sanitaria Panamericana – Oficina Regional de la
Organización Mundial de la Salud

Auspiciado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación

Lima, 2000

Tabla de contenido

1. Introducción
2. Antecedentes históricos
3. Materiales que lo constituyen
 - 3.1 Malla de refuerzo
 - 3.2 Acero del armazón
 - 3.3 Mortero
 - a. Cemento
 - b. Agregados
 - c. Agua
 - d. Aditivos
4. Propiedades mecánicas
 - 4.1 Definición
 - 4.2 Análisis de la curva esfuerzo –deformación
 - 4.3 Resistencia a la primera grieta bajo carga estática
5. Procedimientos de construcción
 - 5.1 Colocación del refuerzo
 - 5.2 Preparación del mortero
 - 5.3 Aplicación del mortero
 - a. Técnica en una capa
 - b. Técnica en dos capas
 - 5.4 Curado
 - 5.5 Recubrimientos
6. Diseño a tensión directa
 - 6.1 Procedimiento de diseño
 - 6.2 Ejemplo de diseño
7. Diseño a flexión
 - 7.1 Procedimiento de diseño
 - 7.2 Ejemplo de diseño
8. Resistencia a la fatiga y al impacto
 - 8.1 Resistencia a la fatiga
 - 8.2 Resistencia al impacto
9. Fluencia y contracción
 - 9.1 Fluencia
 - 9.2 Contracción
10. Durabilidad y corrosión
 - 10.1 Durabilidad
 - 10.2 Corrosión

11. Aplicaciones en el almacenamiento de agua

12. Abreviaturas

13. Bibliografía

1. Introducción

Ferrocemento es un término que se utiliza, para describir un tipo particular de concreto reforzado. Los materiales que conforman el ferrocemento son el mortero o “matriz” que es de consistencia frágil y el refuerzo consistente en mallas metálicas u otro material a través del compuesto.

En general el ferrocemento es considerado como una forma altamente versátil de un material compuesto hecho de mortero de cemento y capas de malla de alambre o de un emparrillado de acero de diámetro pequeño, ligados íntimamente para crear una estructura rígida. Este material, que es una forma especial del concreto reforzado muestra un comportamiento diferente de él, en cuanto a su funcionamiento efectivo, resistencia y aplicaciones potenciales.

En estructuras de ferrocemento racionalmente diseñadas, el refuerzo consiste en mallas de alambres de diámetro pequeño, distribuidas uniformemente en el espesor del elemento. Con esto se mejoran las propiedades físicas y mecánicas del material tales como fractura, resistencia a la tensión y a la flexión, resistencia a los esfuerzos de trabajo y al impacto.

A principios de 1977, el American Concrete Institute (ACI) estableció el comité 549, para revisar el estado actual de la tecnología y formular un reglamento de práctica para este material. Dicho comité lo como: “Ferrocemento es un tipo de construcción de concreto reforzado con espesores delgados, en el que generalmente el cemento hidráulico está reforzado con capas de malla continua de diámetro relativamente pequeño. La malla puede ser de material metálico o de otros materiales adecuados”

El ferrocemento dentro de ciertos límites de carga se comporta como un material elástico homogéneo y estos límites son más amplios que los del concreto normal. La distribución uniforme y la elevada superficie específica del refuerzo, da como resultado un mejor mecanismo de control para la formación de grietas, originando una alta resistencia a la tensión del material. En estudios recientes se ha demostrado que al incluir fibras cortas de acero en el ferrocemento (fibracreto), aumenta aún más la resistencia inicial del elemento a agrietarse, pero la resistencia última depende casi totalmente de la fracción de volumen de la malla de alambre.

El ferrocemento se usa en estructuras de espesores delgados tales como tanques de reserva, silos, coberturas, filtros para plantas de tratamiento, etc. en donde la resistencia y rigidez se desarrollan mediante la forma del elemento. Dentro de sus grandes ventajas está su bajo costo, sus características de incombustibilidad y su alta resistencia a la corrosión, estos factores y la facilidad de construcción ha hecho posible que esta tecnología sea de gran aplicación en los países en vías de desarrollo.

Las mallas de alambre empleadas, generalmente tienen diámetros de 0,5 a 5 mm y su separación varía de 0,5 a 2,5 cm y el volumen de la malla varía del 1% al 8% del volumen total del elemento estructural.

El espesor de las secciones de ferrocemento varía de 2 a 9 cm y el recubrimiento de la capa de refuerzo es usualmente de 0,15 a 0,2 cm. El mortero de concreto consiste en cemento Portland ordinario, agua y agregado finamente granulado (arena natural) que rara vez excede de 5 a 7 mm casi siempre es de 2 mm, pues esto permite el uso de una malla con separaciones menores.

2. Antecedentes históricos

Tuvo sus primeros usos en la fabricación de embarcaciones y otros usos arquitectónicos en Francia en el siglo pasado, en los últimos 50 años se ha intensificado su uso e investigado su aplicación en Asia y Oceanía. En Nueva Zelanda la compañía Ferrocement LTDA debido a sus años de experiencia en esta tecnología elaboró el Journal of Ferrocement de gran difusión en la actualidad.

En 1972 la Academia Nacional De Ciencias de los Estados Unidos llevó acabo una reunión para discutir respecto al uso del ferrocemento en los países en vías de desarrollo; el informe de la reunión publicado por primera vez a principios de 1973, ha tenido un gran impacto sobre las aplicaciones del ferrocemento.

En 1976 se estableció el Internacional Ferrocement Information Center, en el Asian Institute of Technology en Bangkok, Tailandia con el apoyo internacional de: Development Research Center de Canada y de United States Agency for International Development de los Estados Unidos. El “Journal of ferrocement”, es una revista que actualmente es publicada por el Centro Internacional de Información sobre Ferrocemento.

A principios de 1977 el American Concrete Institute estableció el comité ACI 549 sobre ferrocemento, para revisar el estado actual de la tecnología y para formular un reglamento de aplicación para este material.

3. Materiales que lo constituyen

Los materiales que constituyen el ferrocemento son: La malla de refuerzo, el armazón y el mortero o matriz.

3.1 Malla de refuerzo

La función principal de estas mallas es la de actuar como marco para sostener el mortero en estado fresco, así como absorber los esfuerzos de tensión en el estado endurecido, que el mortero por sí solo no podría soportar.

Generalmente consiste en alambres delgados, ya sean entretejidos o soldados, una de las características importantes es que sea lo suficientemente flexible para poderla doblar en las esquinas agudas; debe introducirse el suficiente acero de refuerzo para absorber los esfuerzos producidos por los golpes, torceduras y dobleces. El comportamiento mecánico del ferrocemento depende en gran parte del tipo, cantidad, orientación y propiedades de la

resistencia de la malla y de la varilla de refuerzo.

De los tipos de malla a usar, la malla de alambre hexagonal, es la más popular, económica y de fácil manejo, se le conoce comúnmente como malla de alambre de gallinero y su diámetro se encuentra entre 0,5 y 1 mm. La malla de alambre utilizada en el ferrocemento por lo general tiene un diámetro de 0,5 a 5 mm y las aberturas varían de 0,5 a 2,5 cm.

Existen las mallas de tumbado o de metal desplegado, mallas entretejidas o de cerramiento, etc., todas ellas utilizadas en menor grado debido a su baja resistencia a la tensión (malla de metal desplegado) o características de adherencia muy bajas (malla de cerramiento); siendo en algunos casos empleadas en estructuras de pequeña y mediana envergadura.

En la actualidad existe un nuevo tipo de malla que fue diseñada por Mesh Industries Ltda en Nueva Zelanda, la cual consiste en alambres rectos de alta resistencia y en un alambre ondulado transversal que mantiene en posición estos alambres. Los alambres de alta resistencia están colocados en dos niveles paralelos uno al otro y están separados de los primeros por alambre de acero dulce transversal; solamente el alambre ondulado de unión excede su límite de elasticidad y sólo en la proximidad del ondulado, 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 momento del fraguado, esta malla permite una completa flexibilidad y libertad de forma.

Existen algunas evidencias de estudios sobre la inclusión de fibras adicionales a los refuerzos de malla de alambres en las estructuras de ferrocemento, que permita mejorar algunas propiedades, como el desarrollo de una resistencia estructural mejor, reducción de la permeabilidad del elemento, mayor resistencia a la fatiga, al impacto, así como prolongar su durabilidad. El comité ACI 544 en su publicación "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete", señala las propiedades física-mecánicas, químicas de las diversas fibras naturales, sintéticas y cristalinas, empleadas en el reforzamiento de estructuras de concreto; parámetros que deben tomarse en cuenta para seguir investigando el comportamiento de estructuras de ferrocemento ante la inclusión de dichas fibras.

3.2 *Acero del armazón*

Sirve para hacer el armazón de la estructura, sobre la cual se colocan las capas de malla; se distribuyen uniformemente y se separan hasta una distancia de 30 cm, generalmente no son tratadas como refuerzo estructural, sino que se les considera como soporte de la malla de refuerzo. En algunos casos el acero de armazón se separa a una distancia de 7,5 cm de centro a centro actuando así como un elemento de refuerzo de la malla de alambre, como sucede en estructuras de botes, embarcaciones, tanques, secciones tubulares, etc.

El tamaño de la varilla varía entre 1/4" y 3/4", la de mayor uso es de 1/4". Puede combinarse varillas de diferentes diámetros dependiendo del tipo de estructura.

En estructuras como tanques circulares de reserva, las mallas de alambre electrosoldada, son empleadas como esqueleto del armazón y cumplen además la función de absorber los

esfuerzos que se producen por el empuje hidrostático del líquido almacenado.

3.3 Mortero

Llamado también mortero de alta calidad o matriz, forma parte de los materiales del ferrocemento; junto con el refuerzo actúan en conjunto para dar forma al elemento, soportar esfuerzos de compresión y evitar el ingreso de agentes externos que puedan contribuir a deteriorar la estructura.

El mortero está constituido por cemento, agregados, agua y eventualmente aditivos. Las dosificaciones son establecidas por peso y de acuerdo al tipo de estructura y esfuerzos a la que estarán sometidas, es así que para estructuras hidráulicas Namman recomienda dosificaciones de 1 parte de cemento por 1,5 a 2 partes de arena y 0,3 partes de agua.

a. Cemento

Normalmente usamos el cemento Pórtland, con el objeto de obtener elementos de ferrocemento que tengan resistencia a la compresión, impermeabilidad, dureza y resistencia lo más elevada posible al ataque químico y que su consistencia se mantenga uniforme, compacta, sin huecos, detrás de la concentración del refuerzo.

Los tipos de cemento Pórtland adecuados para la construcción de ferrocemento son el cemento tipo I y II. El cemento tipo I se usa para estructuras de ferrocemento generales, donde no se requieren de propiedades especiales; el cemento tipo II se usa cuando se desea alcanzar una resistencia final más alta, a costa de perder resistencia inicial y logrando una estructura más densa.

El cemento Pórtland tipo III es de endurecimiento rápido adquiere su resistencia más rápidamente y se elige cuando se requiere de una resistencia inicial muy alta.

Sabemos que en el Perú, actualmente no se fabrica cemento tipo III, sin embargo podemos especificar que el cemento Pórtland tipo I es el que desarrolla mayor calor de hidratación; así el cemento SOL desarrolla a los 7 días del 85 al 89% de la resistencia a los 28 días, igualmente el Cemento Andino tipo I a los 7 días tiene una resistencia del orden del 74 al 78% de su resistencia final, por lo demás tiene las mismas características del tipo I de Cementos Lima.

Es obvio que el cemento de endurecimiento rápido que muestra un alto nivel de desarrollo de calor de hidratación durante las construcciones masivas, no debe tener un efecto perjudicial cuando se utilice en secciones delgadas de ferrocemento, por otro lado 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 cemento Pórtland tipo IV, posee bajo calor de hidratación por lo tanto puede ser utilizado para la construcción de estructuras de ferrocemento.

EL cemento Pórtland Tipo V, se recomienda principalmente para construcciones con

ferrocemento en ambientes marinos y en estructuras susceptibles al ataque de los sulfatos, tienen un tiempo de fraguado promedio y por lo tanto no presionará al constructor para apresurar la obra durante la colocación del mortero. En el Perú los cementos apropiados para este uso son el cemento Atlas tipo IP, Cemento Andino tipo V, Cemento Sur tipo V, Cemento Pacasmayo tipo V; los cementos puzolánicos, como el Atlas IP, presentan un beneficio por su versatilidad para resistir el efecto de los sulfatos, además de esto está su menor costo, podríamos mencionar que si bien su resistencia la alcanzan de manera más lenta, ésta es la misma que la del cemento Pórtland.

En el cuadro siguiente se detallan un resumen de los cementos que se fabrican en el país.

EMPRESA	TIPOS FABRICADOS	RADIO DE INFLUENCIA
Cementos Lima	Tipo I, IP Sol y Atlas	Lima, Ica, Chimbote, Costa central.
Cemento Andino	Tipo I, II y V	Tarma, Junín, Sierra central.
Cementos Yura	Tipo I, IP, IPM	Arequipa, Juliaca, zona sur.
Cementos Pacasmayo	Tipo I, II, IP, V, IS	Zona Norte del país.
Cementos Rioja	Tipo IP	Zona Oriente del país.

De estos cementos se indican algunas características que los identifican:

- El cemento Sol tipo I tiene más alto contenido de aluminato tricálcico, lo que hace que el concreto elaborado con este cemento sea más sensible al ataque de los sulfatos.
- El cemento Tipo IP de hidratación baja, puede tener hasta un 30% de puzolana, es comparable a un tipo II o a un tipo V; este cemento no está hecho con puzolana natural sino con artificial, es decir sílice mezclada con arcilla. La puzolana natural tiene alto contenido de sílice, por tener este cemento puzolana artificial el cemento es más pegajoso y presenta mayor cohesividad.
- El cemento Atlas es muy cohesivo; presenta un requerimiento adicional de agua pues la Puzolana está más ávida de ésta; como la puzolana es un material más fino, rellena los pequeños espacios entre las partículas y convierte al concreto en más impermeable y por lo tanto en durable, pues colabora con su resistencia a la agresividad química ya que ésta se da cuando las sales que están en solución ingresan al concreto.
- El cemento Andino Tipo II presenta menos aluminato que el tipo I, por lo tanto se obtiene mediana resistencia a los sulfatos. Los cementos de la marca Andino son poco sensibles a producir reacciones alcalinas ya que contienen poco óxido de Potasio y de Sodio, sabemos que estos óxidos que constituyen los álcalis en el cemento, en ciertas cantidades y en presencia de condiciones particulares de temperatura y humedad, pueden reaccionar con ciertos minerales, produciendo un gel expansivo. Normalmente se requiere de un contenido de álcalis superior al 0,6% y temperaturas ambientales del orden de los 30 °C, humedades relativas del 80% y un tiempo generalmente no menor

de 5 años, para que se note este efecto.

En general los cementos nacionales siguen los comportamientos típicos a largo plazo, que es posible obtener de cementos similares fabricados en el extranjero; sin embargo se debe remarcar que los comportamientos de estos cementos, no siempre mantienen parámetros constantes a corto plazo.

Cabe señalar que no existe información periódica publicada por los fabricantes sobre aspectos básicos como la variación del desarrollo de la resistencia a través del tiempo, variación de la hidratación en función de las condiciones ambientales y características de la puzolana empleada en los cementos mezclados.

Existe cierta creencia de que los cementos puzolánicos debido a su bajo costo abaratan las obras de ingeniería; esta premisa se debería tomar con cuidado, ya que normalmente se supone que los diseños con estos cementos requieren igual cantidad de agua que los normales, lo cual en la práctica no es cierto, pues algunos de ellos necesitan hasta un 10% más de agua y poseen consistencia cohesiva, que amerita mayor energía en la compactación

b. Agregados

Los agregados utilizados para la producción de mortero de alta calidad para estructuras de ferrocemento deben ser fuertes, impermeables, libres de sustancias perjudiciales tales como polvo, terrones, pizarras, esquistos, álcalis, materia orgánica, sales u otras sustancias dañinas, y deben ser capaces de producir una mezcla suficientemente trabajable con una relación agua cemento mínima para lograr la penetración adecuada en la malla.

El agregado normalmente a usar es la arena natural, debe tenerse mucho cuidado en la selección de dichas arenas, ya que las arenas blandas pueden verse seriamente afectadas por la abrasión y las 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 deberá ser preferentemente continua, cumpliendo en lo posible con la especificación C33-86 de la norma ASTM para los agregados de concreto:

Especificación ASTM C33-86 para agregado fino		
Tamiz		Porcentaje que pasa
3/8"	(9,50mm)	100
No 4	(4,75mm)	95 -100
No 8	(2,36mm)	80 -100
No 16	(1,18mm)	50 - 85
No 30	(0,59mm)	25 - 60
No 50	(0,295mm)	10 - 30
No 100	(0,147mm)	2 - 10

No hay efectos sobre la resistencia a la tensión del ferrocemento debido a variaciones en la granulometría de la arena, sin embargo la resistencia a la compresión si es sensible a esta variación.

La experiencia sobre el uso de esta tecnología nos demuestra que el uso de arena que contenga sílice, sea dura angulosa es la adecuada para este caso.

En nuestro país la producción de agregados es artesanal o semiartesanal obteniéndose algunas veces un agregado no muy calificado, generalmente las canteras están contaminadas por materiales que pasan la malla #200 y por cloruros y sulfatos.

La resistencia a la compresión es inversamente proporcional con la porosidad y la absorción y directamente con el peso específico. Los agregados ligeros con peso específico entre 1,6 a 2,5 usualmente manifiestan resistencias de 200 a 750 kg/cm² Así mismo, agregados normales con peso específico entre 2,5 a 2,7 tienen resistencias en compresión del orden de 750 a 1200 kg/cm².

Cuando hablamos de los cementos en el país, debemos de referirnos a la reacción álcali-sílice, el cual es muy importante tener en cuenta por las consecuencias que puede originar en la durabilidad del concreto, debido a los compuestos expansivos formados, producto de la reacción entre ciertos agregados con los álcalis del cemento.

En el cuadro siguiente se detallan los minerales, rocas y materiales sintéticos que pueden ser potencialmente reactivos con los álcalis del cemento.

Reacción Álcali - Sílice	Reacción Álcali – Carbonato
<p style="text-align: center;">Andesitas Argilitas Calcedonia Esquistos Filitas Cuarcita Riolitas, etc</p>	<p style="text-align: center;">Dolomitas Calcinitas Calizas Dolomíticas</p>

Existen pruebas en el laboratorio estandarizadas para determinar la reactividad del agregado definidas en ASTM C-289, ASTM C-227 y ASTM C- 295: La primera es química, la segunda es una prueba denominada la barra de mortero y la tercera prueba consiste en un ensayo petrográfico.

El ASTM C-150, establece una limitación de 0,6% en el contenido de álcalis de los cementos para evitar la posibilidad de reacción álcali-sílice. La reacción álcali - carbonato produce al igual que la reacción álcali- sílice un gel expansivo.

c. *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 manchado en la superficie, causando eflorescencias y asimismo originar la corrosión del refuerzo. En ningún caso debe usarse agua de mar, generalmente el agua de servicios públicos está considerada apta y no requiere ningún tratamiento adicional.

También se debe tener en cuenta que la resistencia del mortero es inversamente proporcional a la relación agua-cemento; es así que la proporción en peso recomendable para estructuras como tanques de reserva de ferrocemento es de 0,3 a 0,4, es decir lo más bajo posible para darle calidad y trabajabilidad.

A diferencia del ACI y la ASTM, en el Perú existe la norma NTP 339-088 que establece los requisitos para agua de mezclas y curado, además la norma NTP 339-070 define los pasos a seguir para la toma de muestras del agua para concreto.

d. *Aditivos*

Podemos definir al aditivo como un material distinto del agua, agregado o cemento; el que se añade muchas veces a la mezcla, antes o durante el mezclado con la finalidad de modificar algunas de sus propiedades. Los aditivos que mayormente se emplean en ferrocemento, son aquellos que permiten mejorar la trabajabilidad, reducir la exigencia de agua y prolongar el fraguado del mortero.

Estos aditivos comúnmente utilizados en las estructuras de ferrocemento son:

- Aditivos reductores de agua Tipo A : ASTM C494-71
- Aditivos retardantes Tipo B : ASTM C494-71
- Aditivos reductores de agua y retardantes tipo D : ASTM C494 - 71
- Aditivos reductores de agua y acelerantes tipo E : ASTM C494-71

Para la dosificación se necesita un adecuado equipo de medición debido a que solo representan el 1 % del peso del cemento en la mezcla.

También debemos de eliminar la creencia que el uso de un aditivo, nos va a producir ahorro en el uso de cemento, pues si nuestro objetivo es lograr concretos durables, por ejemplo usando aditivos reductores de agua, lo que lograremos mediante su uso es mejorar la trabajabilidad de la mezcla.

4. Propiedades mecánicas

4.1 Definición

El ferrocemento es un material homogéneo que contiene un alto porcentaje de malla de alambre de acero dúctil, en una matriz frágil de cemento-arena, este refuerzo permite que la matriz asuma las características dúctiles del refuerzo.

Idealmente, el ferrocemento actúa como un material homogéneo en el rango elástico y el refuerzo del compuesto se obtiene de las leyes de la mezcla. Cuando una muestra de ferrocemento se somete a esfuerzos de tensión crecientes, se observan tres niveles de comportamiento; estos niveles o campos se clasifican de acuerdo con el ancho de las grietas como lo describe Welkus en sus libros “State of Cracking and Enlongation of Ferrocement Under Axial Tensión Load I and II” y “Behavior of ferrocement in Bending”

Esto se muestra en la tabla siguiente:

Nivel	Nivel del material	Comportamiento	Ancho de grietas En micras	Esfuerzos Kg /cm ²	Alargamiento unitario x 10 ⁻⁶
I	Linealmente elástico	Impermeable	0 – 20	33	200
Ia	Casi elástico	Impermeable	20 – 50	36	290
IIa	No lineal	No corrosivo I	50 – 100	43	645
IIb	Elastoplástico	No corrosivo II			
III	Plástico	Corrosivo	> 100		

Los parámetros que aparecen en la tabla, se detallan en la sección 4.2.

4.2 Análisis de la curva esfuerzo – deformación

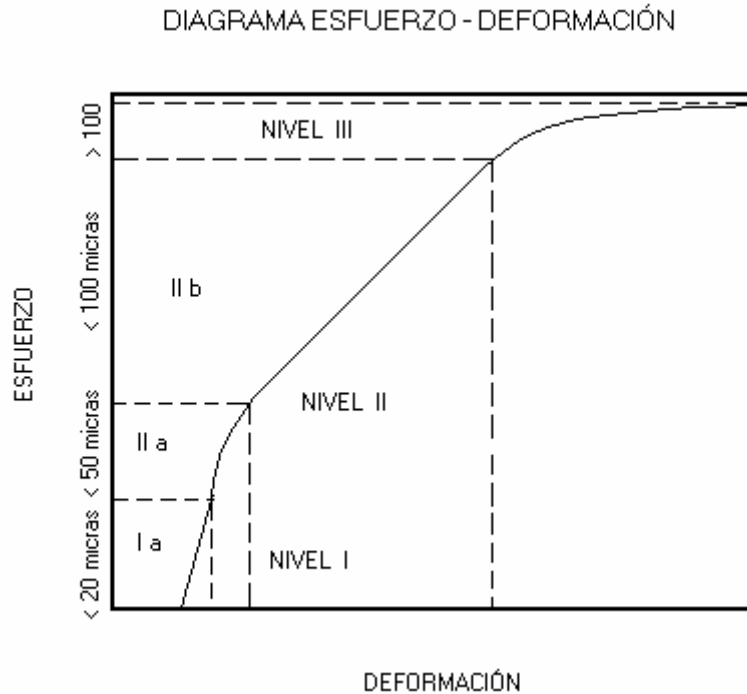
Esta curva presenta un primer rango elástico (Nivel Ia) que es básicamente lineal, asimismo ocurren deformaciones elásticas tanto en las parrillas de metal como en las cristalinas y coloides; no existe evidencia de formación de grietas aún cuando se observan en aumento los esfuerzos. El límite de elasticidad del ferrocemento es más alto que el del concreto no reforzado.

Luego se presenta una etapa de agrietamiento (Nivel IIa, IIb), en estas etapas se presentan deformaciones muy definidas en los coloides así como en las parrillas cristalinas, los refuerzos son quienes resisten dichos incrementos, en este momento empieza la formación y ensanchamiento de grietas originales; la curva esfuerzo – deformación deja de ser lineal, apreciándose un aumento de grietas con incrementos de esfuerzos sin ensanchamientos de las ya existentes. El mortero y el refuerzo tienen una acción en conjunto hasta que se llega a un ancho de grietas de 100 micras. Se ha observado que estas grietas están en función de la

superficie específica del refuerzo.

Finalmente se presenta la etapa de fluencia (Nivel III), en esta etapa el proceso de ensanchamiento de las grietas continúa de manera uniforme, y entonces es el refuerzo el que absorbe los esfuerzos del conjunto. El ancho de grietas es mayor que 100 micras y continúa el crecimiento de la grieta hasta que se produce el colapso total del elemento.

A continuación se muestra un gráfico de la curva Esfuerzo – Deformación, de una sección de ferrocemento sometida a esfuerzos de tensión.



4.3 Resistencia a la primera grieta bajo carga estática

En el libro de Naaman, “Reinforcing Mechanisms in Ferrocement”, se utiliza una fórmula empírica para llegar a la resistencia de la primera grieta.

$$\sigma_{cr} = 24,5 \cdot S_l + \sigma_{mu} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

Donde S_l es la superficie específica del refuerzo en la dirección de la carga, teniendo una dimensión de (cm^{-1}) en la ecuación.

Superficie específica

La superficie específica se define como el área total del refuerzo por unidad del volumen del compuesto.

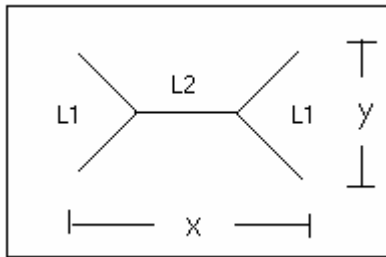
Para malla cuadrada o rectangular la superficie específica puede ser calculada mediante:

$$SI = (\pi * d * n * (1/d_L + 1/d_T)) / t \quad (\text{cm}^{-1})$$

Donde: d: Diámetro del alambre de la malla en cm.
d_L: Espaciamiento de centro a centro del alambre longitudinal en cm.
d_T: Espaciamiento de centro a centro del alambre transversal en cm.
n: Número de capas de malla
t : Espesor de la sección en cm

Para malla hexagonal la superficie específica puede ser calculada mediante:

$$SI = \pi * d * n * (4L1 + 2L2) / x * y * t \quad (\text{cm}^{-1})$$



Donde: L1 : Longitud total del alambre del extremo en cm
L2 : Longitud del alambre intermedio en cm
x : Separación horizontal entre alambres en cm.
y : Separación vertical entre alambres en cm.
n : Número de capas de malla
t : Espesor de la sección en cm.

Para un ferrocemento empleando mallas cuadradas, SI se divide en SI_L y SI_T, en la dirección longitudinal y transversal respectivamente.

Volumen del refuerzo

Se define como la fracción del volumen total del refuerzo por unidad de volumen del compuesto.

Para malla cuadrada o rectangular el volumen de refuerzo, puede calcularse como:

$$V_f = 25 * \pi * d^2 * n * (1/d_L + 1/d_T) / t \quad (\%)$$

Donde: d : Diámetro del alambre de la malla en cm.
d_L: Espaciamiento de centro a centro del alambre longitudinal en cm.
d_T: Espaciamiento de centro a centro del alambre transversal en cm.
n: Número de capas de malla
t : Espesor de la sección en cm

Para malla hexagonal el volumen de refuerzo, puede calcularse de:

$$V_f = 25 * \pi * d^2 * n * (4L_1 + 2L_2) / (x * y * t) \quad (\%)$$

Donde: L₁ : Longitud total del alambre del extremo en cm
L₂ : Longitud del alambre intermedio en cm
x : Separación horizontal entre alambres en cm.
y : Separación vertical entre alambres en cm.
n : Número de capas de malla
t : Espesor de la sección en cm.

Para un ferrocemento empleando mallas cuadradas, V_f se divide en V_{fL} y V_{fT} para las direcciones longitudinal y transversal respectivamente.

Cuando se utilizan mallas de alambre, la relación entre SI y V_f puede expresarse como:

$$SI = 4 * V_f / d$$

Donde: d: diámetro del alambre de malla en cm

Puesto que una de las ideas al utilizar ferrocemento, es lograr un mejor control de grietas que en el concreto reforzado que tiene poca dispersión de refuerzo, resulta de mucha utilidad en esta etapa examinar ideas básicas y el mecanismo de control de grietas con separaciones pequeñas del refuerzo.

La formación de grietas puede describirse de la siguiente manera: Las primeras grietas se forman en secciones críticas al azar, donde el esfuerzo uniforme de tensión excede a la resistencia de la matriz. En la sección de la primera grieta ocurre un deslizamiento entre la matriz y la varilla de refuerzo.

La existencia de un mecanismo de detención de grietas en concreto reforzado con alambre con separaciones pequeñas, también sugiere que se puede esperar una alta resistencia a la fatiga y al impacto de este material.

Por ejemplo mientras que para una separación del orden de 1 cm con 2,5 % de acero, el esfuerzo de agrietamiento es de aproximadamente 53 kg/cm², para una separación de 0,5 cm este se eleva a 77 kg/cm².

El concepto de ferrocemento se basa en la elemental y conocida observación de que la elasticidad de un elemento de concreto reforzado, aumenta en proporción de la subdivisión y distribución del refuerzo a través de la masa.

Se ha propuesto la siguiente fórmula para lograr equivalencias entre el uso de diferentes barras de refuerzo en ferrocemento:

$$S_f = 1,38 * d * (1/p)^{1/2}$$

Donde: Sf: Separación entre el centro de gravedad de las fibras del refuerzo (cm).
d: diámetro de las fibras (mm).
p: porcentaje de refuerzo por volumen.

La variación en la resistencia a flexión de las primeras grietas, obtenida para distintas condiciones de trabajabilidad de la mezcla en cuanto a la consolidación y uniformidad en la distribución de las fibras, indica que aunque el efecto de la separación de las fibras sobre la resistencia a flexión es generalmente prevista, ocasionalmente pueden gobernar en el efecto de los otros parámetros de la trabajabilidad. La variación en la resistencia obtenida se debe principalmente al grado de trabajabilidad y consolidación, el cual a su vez está influido por la geometría de las fibras.

Las descripciones hechas hasta el momento se limitan al efecto de separación de las fibras, más adelante se analizará la influencia de otros factores en el control de grietas y resistencia del ferrocemento.

Los estudios de investigación han demostrado que el ancho de las grietas en las estructuras de ferrocemento, pueden reducirse aumentando la adherencia entre el refuerzo y el mortero, al igual que la distribución del refuerzo y reducción del espesor de la capa de mortero. El ancho de las grietas es casi cero en las superficies de contacto del acero y el mortero y aumenta hacia el área superficial, por lo tanto mientras menor sea el recubrimiento llegaremos a espesores de grietas también menores. Se ha demostrado que la superficie específica y la fracción de volumen de refuerzo juegan un papel significativo en el comportamiento al agrietamiento del ferrocemento.

El efecto de la superficie específica fue estudiado por Amel Yanovich, Verbitsky y Bogoyavlenskye, en la publicación “ Ship Hulls Made of Reinforced Concrete” se llega a la conclusión de que el valor óptimo de la superficie específica considerando los esfuerzos en la primera grieta parece estar entre $1,4 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ y $2,00 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$.

Otro investigador del ACI, Shap, llegó a demostrar que al aumentar el volumen del refuerzo aumenta la resistencia a la primera grieta, sin embargo este aumento varía en cada tamaño de malla empleada. Pero no siempre se observó que a menor dimensión de la malla, esto es menor separación entre alambres longitudinales, el esfuerzo en la primera grieta fuese mayor para el mismo volumen.

En el cuadro adjunto se muestran resultados de los estudios llevados a cabo para determinar la influencia de estos parámetros.

Resistencia a la compresión del mortero (kg / cm ²)	Superficie específica del refuerzo (cm ² /cm ³)	% refuerzo en dirección de la carga	Esfuerzo en primera grieta kg/cm ²	Esfuerzo de rotura Kg/cm ²	Deformación Primera grieta (εcr) *10 ⁻⁵
650	1,20	1,85	39	48	45
650	2,08	1,80	42	48	55
650	3,04	1,75	45	50	70
650	1,80	2,80	59	80	60
650	3,12	2,70	73	90	100
750	3,12	2,70	82	90	100
650	4,50	2,68	50	80	100

Para la determinación del esfuerzo en la primera grieta se tomó en cuenta la formación de una grieta de 0,04 hasta 0,05 mm.

Rajagopalan y Paremswaranen su obra "Cracking and Ultimate Strength Characteristics of Ferrocement in Direct Tension and in Pure Bending" opinan que con las fibras de acero común de menor diámetro pequeño regularmente utilizadas en la fabricación de ferrocemento no se alcanza la adherencia de las fibras tan pronto se agriete la matriz (debido a la falta de control adecuado durante el proceso de construcción), por lo tanto el encadenamiento de sucesivas fallas de adherencia dará como resultado agrietamientos múltiples en el mortero y culminará con la fractura de las fibras longitudinales a la malla.

El propósito en el diseño de estructuras de ferrocemento no es el evitar agrietamiento si no el de limitar su ancho, para poder mantener la serviciabilidad de la estructura.

Haciendo un resumen de todo lo expuesto, se puede llegar a la conclusión de que el ferrocemento reforzado con el mismo porcentaje de acero a tensión monoaxial, puede resistir más esfuerzos que el concreto reforzado tradicional.

Los estudiosos Pama, Sutharatanachaiyaporn y Lee demostraron que la resistencia a la tensión del ferrocemento reforzado con malla de alambre hexagonal con fibras inclinadas 45° en la dirección de la carga esta dada por:

$$\sigma_{tu} = 0,44 * V_f * \sigma_{fu} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

Donde: V_f : fracción de volumen total del refuerzo en %.
 $\sigma_{fu} = f_y$: esfuerzo de la fibra en condición última.

Los estudios realizados han concluido que el acero del armazón del ferrocemento con separaciones considerables (30 cm a más), no contribuye a la resistencia última a la tensión por la falla prematura de adherencia debido a la poca dispersión en la matriz, como lo caracteriza su bajo peso específico.

Sin embargo, para algunas estructuras el acero de la armazón que se acostumbra emplear como acero longitudinal en tanques de reserva y como zuncho en secciones tubulares, es completamente efectivo para resistir el esfuerzo último de corte y el momento torsional. Se supone que los alambres a tensión y compresión son muy efectivos para resistir cortantes en los rangos de fluencia.

5. Procedimientos de construcción

La habilidad, en las técnicas de construcción con ferrocemento, se aprende muy rápidamente. Los cuatro pasos principales en la construcción de ferrocemento son:

- Colocación de la malla de alambre en la posición adecuada
- Mezcla del mortero.
- Aplicación del mortero.
- El curado.

5.1 Colocación del refuerzo

- a) La malla de refuerzo y acero del armazón deben estar firmemente soldados o sujetos cada uno de alguna forma, para que se mantengan en su posición original durante la aplicación del mortero y el vibrado, también deben estar bien tensados a fin de que cuando las solicitaciones lo requieran toda la armadura trabaje en conjunto.
- b) La longitud de traslape entre mallas varía de 25 a 30 cm, las varillas en las uniones generalmente se amarran con alambre de acero, pero en algunos casos se hacen uniones soldadas, cuando se cuenta con el equipo necesario.

Es importante dejar que la malla se acomode por sí misma en cuanto sea posible, aunque esto signifique un traslape mayor en algunas partes. Si los traslapes ocasionan dificultades para el trabajador, entonces se podrá cortar el exceso del traslape. Sin embargo en todos los casos debe mantenerse una longitud mínima de traslape de 5 cm.

- c) Las mallas de refuerzo se amarran a las varillas de acero del armazón, con alambre de amarre en intervalos de 15 a 30 cm.
- d) En caso de encontrarse el acero de las armaduras con sustancias como grasa u otros contaminantes, deben de cepillarse antes de comenzar el trabajo de colocación del mortero.

5.2 Preparación del mortero

En la preparación del mortero se emplea una proporción en peso de cemento - arena que consiste en una parte de cemento por 1,5 a 2 partes de arena. La relación agua cemento en peso, debe mantenerse lo más baja posible entre 0,3 y 0,4, para darle al material calidad y trabajabilidad consistentes.

Si fuera necesario pueden usarse puzolana u otros aditivos al momento de hacer la mezcla de acuerdo con la cantidad prescrita, cumpliendo estos aditivos con los requisitos de la norma ASTM C-618.

Se recomienda el uso de mezcladora para vaciado de volúmenes importantes y el uso de trompos para vaciados pequeños.

5.3 Aplicación del mortero

El mortero generalmente se coloca a través del enlucido a mano, en este proceso el mortero es forzado a través de la malla. De manera alternativa el mortero puede ser insertado a través de un dispositivo de pistola pulverizadora.

La aplicación del mortero a mano ha resultado ser el medio más conveniente, se utilizan los dedos y las palmas para aplicar el mortero sobre la estructura formada por la malla de alambre y debido a lo compacto de la mezcla, el mortero permanece en su posición después de colocado.

Existen técnicas de aplicación del mortero, siendo las más usadas la técnica en una capa y la de dos capas.

a. La técnica en una capa:

Consiste en reforzar el mortero de afuera hacia dentro de la malla y posteriormente darle el acabado final. Nunca debe aplicarse el mortero simultáneamente en los dos lados, pues esto da como resultado que quede aire atrapado entre las capas produciendo laminación en la superficie del casco.

Al usar la técnica en una capa, la mejor manera de aplicar el mortero en un lado, es poniendo en el otro lado como encofrado temporal hojas de triplay y tiras similares de madera contra los cuales pueda trabajar los vibradores. En la mayor parte de los casos un vibrador manual con un pedazo de madera y un mango integrado es suficiente para lograr la penetración total del mortero en la malla.

Al aplicar el mortero también es importante asegurar que el recubrimiento final o capa de acabado que conforma la estructura, se coloque antes de que ocurra el fraguado final de la aplicación de mortero principal.

b. La técnica en dos capas:

Este método se prefiere mucho en la construcción de embarcaciones; la ventaja principal en este proceso es que al aplicar el mortero en el lado contrario puede colocarse al mortero sobre una superficie sólida obteniéndose una estructura más densa, sin embargo la vibración es esencial cuando se esté aplicando la segunda capa de mortero. Después de terminar la primera aplicación del mortero en la operación en 2 capas y de haber aplanado la superficie de la manera acostumbrada,

debe dejarse curar la estructura con humedad al menos durante 10 a 14 días.

Antes de aplicar la segunda capa, es esencial 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 con consistencia gruesa, antes de la aplicación del mortero. Esta técnica trata de evitar el riesgo de separación entre las dos capas, pero aún quedan dudas respecto a la calidad absoluta de la unión entre las dos capas.

5.4 Curado

El curado que se da a las estructuras de ferrocemento es de vital importancia para lograr una buena hidratación en el cemento en sus fases de endurecimiento. 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.

El curado lo podemos lograr aplicando diferentes métodos como son: El curado por humedad, con membrana impermeable y con vapor; cabe destacar que el curado por humedad se hace por un espacio de 10 a 14 días consecutivos.

5.5 Recubrimientos

Aunque se indique que las estructuras de ferrocemento no necesitan de protección, a menos que estén expuestas a condiciones ambientales severas, en las oportunidades que se requieran poner revestimientos, usar aquellos que cumplan con las siguientes características:

- Debe tener buena adherencia al mortero.
- Debe tener tolerancia a la alcalinidad del ferrocemento.
- Debe tener buena resistencia química a la abrasión.
- Impermeabilidad al agua y a las sustancias químicas

Para estructuras que no estén sometidas a esfuerzos considerables se recomiendan recubrimientos mínimos de 0,15 cm y máximos de 1,25 cm.

Para que los recubrimientos cumplan la función de protección a cabalidad es importante la preparación adecuada de la superficie sobre la que se debe aplicar, para ello debe estar libre de polvo e impurezas y si hubo un recubrimiento anterior se le debe quitar con aire comprimido, con chorro de arena o con cepillos de alambre.

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

La diversificación del uso de ferrocemento en el mundo, está llevando a los investigadores a estudiar los recubrimientos más recomendables para cada caso y el tratamiento que debe darse en función del uso que se tenga que dar a las estructuras.

6. Diseño a tensión directa

6.1 Procedimiento de diseño

Para este caso se utiliza el criterio de control a través de la resistencia a la formación de la primera grieta. Los parámetros necesarios para el cálculo son la resistencia última a la tensión de la matriz y la carga aplicada "P".

El procedimiento es el siguiente:

1. Calcular la carga de diseño Pd mediante la siguiente expresión, estimándose un factor de seguridad FS.

$$Pd = P \cdot FS \quad (\text{kg})$$

2. Calcular el área de la sección compuesta, seleccionando un valor razonable para la resistencia a la primera grieta de la matriz (σ_{cr}).

$$Ac = Pd / \sigma_{cr} \quad (\text{cm}^2)$$

3. En función a esta área adoptar una sección de prueba b x t.
4. Calcular el número de capas de malla requerido, utilizando las ecuaciones mostradas a continuación, previa selección de una malla de refuerzo y conociendo el diámetro del alambre, su geometría y modulo de elasticidad Ef.

$$\sigma_{cr} = 24,5 \cdot SI + \sigma_{mu} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

Para malla cuadrada o rectangular la superficie específica puede ser calculada por:

$$SI = (\pi \cdot d \cdot n \cdot (1/d_L + 1/d_T)) / t \quad (\text{cm}^{-1})$$

El volumen de refuerzo para malla cuadrada o rectangular puede calcularse mediante:

$$Vf = 25 \pi \cdot d^2 \cdot n \cdot (1/d_L + 1/d_T) / t \quad (\%)$$

1. Verificar si el espesor supuesto t es suficiente para acomodar el número requerido de capas de malla. Hacer ajustes si fuera necesario.
6. Verificar la fracción de volumen mínimo mediante la siguiente expresión:

$$V_f(\min) = \sigma_{cr} / f_y$$

7. Verificar la resistencia a la primera grieta, mediante la siguiente ecuación :

$$\sigma_{cr} = 24,5 * S_I + \sigma_{mu} \quad (\text{kg} / \text{cm}^2)$$

6.2 Ejemplo de diseño

Diseñar un elemento estructural de ferrocemento para soportar una fuerza de tensión directa de 2300 kg; las condiciones de utilidad exigen una estructura sin grietas, suponer que $\sigma_{mu} = 28 \text{ kg/cm}^2$, $E_m = 211 \text{ ton/cm}^2$, $f_y = 3,5 \text{ ton/cm}^2$.

Solución

1. Utilizando un $F_s = 1,25$

$$P_d = 2300 * 1,25 = 2875 \text{ kg}$$

2. Si la primera resistencia al agrietamiento es de 49 kg/cm^2 , se tiene que:

$$A_c = 2875 \text{ kg} / 49 \text{ kg/cm}^2 = 58,67 \text{ cm}^2$$

3. Consideramos una sección de prueba de $30 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$.

4. Utilizando una malla cuadrada de 5×5 con alambre de diámetro de $0,06 \text{ cm}$.

Por tanto: $d_L = d_T = 5 \text{ mm} = 0,5 \text{ cm}$, luego:

$$S_I = (\pi * d * n * (1 / d_L + 1 / d_T)) / t$$

$$S_I = (\pi * 0,06 * n * (1 / 0,5 + 1 / 0,5)) / 2 = 0,38 n \quad (\text{SI en dos direcciones})$$

Entonces: $S_I = 0,38 * 0,5 = 0,19 n$ (en una dirección)

Luego: $\sigma_{cr} = 49 = 24,5 * 0,19 n + 28$

De donde: $n = 4,51 \approx 5$ capas de malla cuadrada de 5×5

5. En este caso si se utiliza una capa de mortero de 2 mm de espesor como recubrimiento, calculamos el espaciamiento de centro a centro de la malla de refuerzo:

$$s = (t - (2d'' + d)) / (n - 1) = 0,39 \text{ cm}$$

Lo que indica que se tiene un espesor ocupado por el refuerzo de:

$$0,39 * 4 + 0,06 = 1,62 \text{ cm}$$

Que es menor que el espesor de la sección disponible de 2 cm.

2. La fracción de volumen real de la fibra en la dirección de la carga es :

$$V_{fL} = 25 \pi d^2 n (1/dL + 1/dT)/t = 0,0281$$

Y la fracción de volumen mínimo de la fibra alineada requerida es:

$$V_f(\min) = \sigma_{cr} / f_y = 49 / 3500 = 0,014$$

Luego: $V_{fL} > V_f(\min)$

7. La resistencia a la primera grieta puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{cr} = 24,5 * 0,19 * 5 + 28 = 51,27 \text{ kg / cm}^2 > 49 \quad (\text{correcto})$$

7. Diseño a flexión

7.1 Procedimiento de diseño

Para el diseño de elementos estructurales de ferrocemento sometidos a flexión pura, puede seguirse el siguiente procedimiento:

1. Calcular el momento máximo debido a la carga aplicada.
2. Seleccionar una sección de prueba asumiendo una fracción promedio de volumen de refuerzo.
3. Graficar las curvas idealizadas de esfuerzo - deformación tanto a tensión como a compresión de la sección asumida.
4. Determinar la deformación en la fibra extrema a compresión ξ_c y calcular el esfuerzo correspondiente.
5. Determinar el momento resistente de la sección de análisis.
6. Comparar el momento resistente para la sección de prueba con el momento aplicado. Si no está cubierto o si es demasiado ajustado repetir los pasos del 2 al 5 para una nueva sección de prueba.
7. Con los datos de la sección satisfactoria, determinar el ancho máximo de grieta y verificar si está dentro del límite permisible.

7.2 Ejemplo de diseño

Determinar la capacidad de momento nominal de una sección de ferrocemento de 12,5 cm x 1,9 cm, con seis capas espaciadas iguales de 1/2", el refuerzo es malla cuadrada soldada, considerar $V_f = 4,32 \%$, $f'_c = 350 \text{ Kg/cm}^2$ y $d = 1,05 \text{ mm}$.

Solución:

1. Seleccionar los valores para f_y , E_f y η del cuadro 1.1 y 1.2 propuestos por el ACI.

De la tabla 1.1 para malla cuadrada soldada: $f_y = 4550 \text{ kg/cm}^2$ y $E_f = 2\,030\,000 \text{ kg/cm}^2$

Cuadro 1.1. Valores mínimos de resistencia a la fluencia y módulos efectivos para Mallas y barras de acero recomendadas para el diseño (ACI 549.1R-93)

		Malla cuadrada Tejida	Malla cuadrada Soldada	Malla hexagonal	Malla de Metal Expandido	Barras longitudinales
Esfuerzo de Fluencia	f_y (kg/cm^2)	4550	4550	3150	3150	4200
Módulo Efectivo	E_{fL} (10^3 kg/cm^2)	1400	2030	1050	1400	2030
	E_{fT} (10^3 kg/cm^2)	1680	2030	700	700	-----

Cuadro 1.2. Valores de diseño recomendados del factor de eficiencia global del refuerzo para un miembro sometido a tensión o flexión uniaxial

		Malla cuadrada tejida	Malla cuadrada soldada	Malla hexagonal	Malla de metal expandido	Barras longitudinales
Factor de eficiencia global	Longitudinal η	0,5	0,5	0,45	0,65	1
	Transversal η	0,5	0,5	0,30	0,20	-
	A 45 grados η_θ	0,35	0,35	0,30	0,30	0,70

De la tabla 1.2 para el mismo tipo de malla tenemos que $\eta_L = \eta_T = 0.5$

2. Cálculo de β_1 , Vf_i y A_{Si}

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 * (f'c - 280) / 70 > 0,65$$

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 * (350 - 280) / 70 = 0,80 > 0,65$$

$$Vf_i = Vf / n = 4,32\% / 6 = 0,72\%$$

$$A_{Si} = \eta * Vf_i * A_C = 0,5 * (0,72 / 100) * (12,5 * 1,9)$$

$$A_{Si} = 0,085 \text{ cm}^2$$

3. Cálculo de la profundidad de cada capa de refuerzo (d_i), como las capas de mallas están espaciadas igualmente con recubrimiento libre de $d'' = 1,5$ mm, el espaciamiento de centro a centro de la malla de refuerzo será:

$$s = (t - (2d'' + d)) / (n - 1)$$

$$s = (1,9 - (2 * 0,15 + 0,105)) / (6 - 1) = 0,3 \text{ cm}$$

$$d_1 = d'' + 0,5d = 0,2 \text{ cm}$$

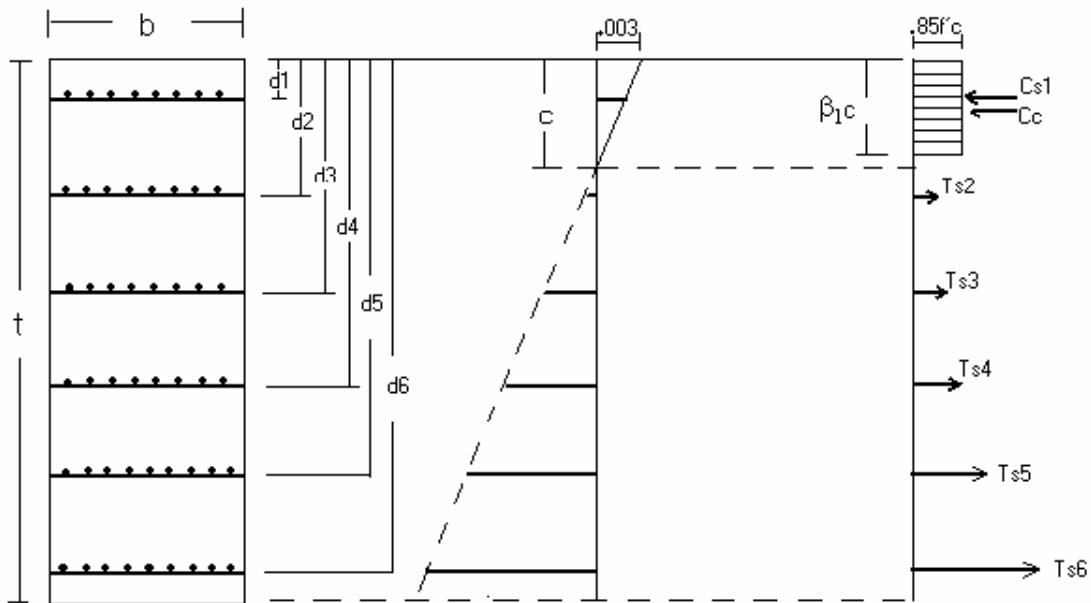
$$d_2 = d_1 + s = 0,5 \text{ cm}$$

$$d_3 = d_2 + s = 0,8 \text{ cm}$$

$$d_4 = d_3 + s = 1,1 \text{ cm}$$

$$d_5 = d_4 + s = 1,4 \text{ cm}$$

$$d_6 = d_5 + s = 1,7 \text{ cm}$$



4. La distancia de la fibra extrema a compresión “c” al eje neutro se calcula por tanteos con la consideración de que las fuerzas a compresión que actúan en la sección deben ser igual a las fuerzas de tracción.

Para el presente caso se ha calculado $c = 0.45$ cm, con este dato se procede a calcular los esfuerzos de tensión en cada una de las capas de malla, aplicando el criterio de falla por resistencia última.

Para ello se considera que:

$$\epsilon_{Si} = (d_n - c) * \epsilon_m / c ; f_{Si} = E_f * \epsilon_{Si} \text{ y } \epsilon_m = 0,003$$

$$\text{Si } \epsilon_{Si} > \epsilon_y = 0,0035 \text{ entonces } f_{Si} = f_y$$

$$\epsilon_{S1} = (0,20\text{cm} - 0,45\text{cm}) * 0,003 / 0,45\text{cm} = -0,00167$$

$$f_{S1} = E_r * \epsilon_{S1} = 2\,030\,000 * 0,00167 = 3390,1 \text{ k/cm}^2$$

$$\epsilon_{S2} = (0,50\text{cm} - 0,45\text{cm}) * 0,003 / 0,45\text{cm} = 0,00033$$

$$f_{S2} = 2\,030\,000 * 0,00033 = 669,9\text{k/cm}^2 \text{ (tracción)}$$

$$\epsilon_{S3} = (0,80\text{cm} - 0,45) * 0,003 / 0,45\text{cm} = 0,00233$$

$$f_{S3} = 2\,030\,000 * 0,00233 = 4729,9\text{k/cm}^2, \text{ entonces } f_{S3} = f_y = 4550\text{k/cm}^2$$

$$\epsilon_{S4} = (1,10\text{cm} - 0,45\text{cm}) * 0,003 / 0,45\text{cm} = 0,0043 > \epsilon_y$$

$$f_{S4} = f_y = 4550\text{k/cm}^2$$

$$\epsilon_{S5} = (1,40\text{cm} - 0,45\text{cm}) * 0,003 / 0,45\text{cm} = 0,0063 > \epsilon_y$$

$$f_{S5} = f_{S6} = f_y = 4550\text{k/cm}^2$$

Las fuerzas actuantes en la sección de análisis serán

$$C_c = 0,85 * f'_c * b * \beta_1 * c = 0,85 * 350 * 12,5 * 0,80 * 0,45 = 1338,75\text{k}$$

$$C_{S1} = (f_{S1} - 0,85f'_c) * A_{S1} = (3390,1 - 0,85 * 350) * 0,085 = 262,87\text{k}$$

$$T_{S2} = f_{S2} * A_{S2} = 56,94\text{k}$$

$$T_{S3} = f_{S3} * A_{S3} = 386,75\text{k}$$

$$T_{S4} = T_{S5} = T_{S6} = 386,75\text{k}$$

Ahora la sumatoria de las fuerzas a tensión menos la sumatoria de las fuerzas a compresión deben ser igual a cero.

$$\sum T - \sum C = 0$$

$$4 * (386,75) + 56,94 - 262,97 - 1338,75 \approx 0$$

5. Cálculo de la capacidad de momento nominal M_n

$$M_n = \sum (C_{Si} \text{ ó } T_{Si}) * (d_i - \beta_1 * c / 2)$$

$$M_n = 262,87 * (0,20 - 0,19) + 56,94 * (0,50 - 0,19) + 386,75 * (0,80 - 0,19) + 386,75 * (1,10 - 0,19) + 386,75 * (1,40 - 0,19) + 386,75 * (1,70 - 0,19)$$

$$M_n = 1660,1 \text{ k-cm}$$

8. Resistencia a la fatiga y al impacto

8.1 Resistencia a la fatiga

Existen pocas evidencias de estudios con respecto a las respuestas del ferrocemento ante comportamientos a la fatiga. El comité 549 del ACI señala que los dos elementos que constituyen el ferrocemento, el acero y el mortero tienen un comportamiento diferente a la fatiga, debido a que mientras los aceros tienen un límite de resistencia definido, el mortero no lo tiene.

A pesar de que solo el modo flexional ha sido estudiado en los reportes publicados, los resultados de las investigaciones realizadas indican que la resistencia a la fatiga del ferrocemento depende de las propiedades a la fatiga del refuerzo incluyendo tanto la malla de alambre y el acero de armazón; estos estudios demostraron además que la malla hexagonal tiene mayor resistencia a la fatiga que la malla cuadrada y la de metal desplegado. Los resultados también indican que la malla reforzada sin galvanizar parece tener mayor resistencia que la galvanizada.

8.2 Resistencia al impacto

En cuanto a la resistencia al impacto el ferrocemento presenta una mayor resistencia que el concreto reforzado tradicional, debido a su elevada capacidad de absorción de energía. También se ha determinado que los tableros con mayor superficie específica de malla y con separaciones pequeñas del refuerzo tienen una mayor resistencia al impacto.

9. Fluencia y contracción

Existen un número limitado de publicaciones que hacen referencia a las características de fluencia y contracción de las diferentes formas de ferrocemento.

9.1 Fluencia

La fluencia del ferrocemento está en función principalmente a la restricción ofrecida por parte del refuerzo. Se ha descubierto que el ferrocemento reforzado con mallas de alambre sin galvanizar, muestra mayor fluencia que el reforzado con mallas de alambre galvanizado.

9.2 Contracción

La contracción de la matriz (mortero), depende en gran parte del contenido de agua, que a su vez está en función de la trabajabilidad requerida para la colocación, consolidación y acabado del mortero fresco. Así mismo depende de la gradación de la arena, la presencia de aditivos como puzolana, cal, etc.

La contracción del ferrocemento depende también de las restricciones ofrecidas por el refuerzo, el cual está en función de la fracción de volumen en la dirección considerada y probablemente otros factores asociados con el desarrollo de la grieta, esto es superficie específica, tipo de refuerzo y espaciamiento de los alambres en la malla.

10. Durabilidad y corrosión

10.1 Durabilidad

El ACI define a la durabilidad, como la habilidad que poseen las estructuras para soportar las inclemencias del tiempo sin que sufra deterioro alguno.

El comité ACI 201 se formó en 1957, en el número de diciembre de 1962 del “ACI journal”, publicó un informe titulado “Durabilidad del Concreto en Servicio”. Aunque estas medidas son requeridas para asegurar la durabilidad en estructuras de concreto reforzado convencional (ACI 201.2R), también son aplicables para estructuras de ferrocemento.

Bajo esta premisa, los siguientes factores afectan la durabilidad de las estructuras de Ferrocemento:

Recubrimiento:

La capa de cubierta, es pequeña y por consecuencia es relativamente fácil ser alcanzada por líquidos corrosivos al refuerzo.

Cantidad y calidad del refuerzo:

El área de la superficie del refuerzo es alta inicialmente, así el área de contacto sobre el cual la corrosión reacciona puede tomar lugar y los resultados de porcentaje de corrosión son potencialmente altos.

Aunque el refuerzo de acero utilizado en ferrocemento es generalmente galvanizado y suprime la corrosión, pero la capa de zinc puede tener ciertos efectos adversos de generación de burbujas de gas. Todos estos factores asumen una variedad de grados de importancia, dependiendo de la condición de exposición en la naturaleza.

Calidad del mortero:

La integridad del mortero es el factor más importante para evitar el ataque del refuerzo. Causas internas como la reacción alcalina del agregado, variaciones volumétricas y sobre

todo a la permeabilidad del mortero. Pruebas de permeabilidad efectuadas en ferrocemento, muestran que la absorción de la humedad es casi insignificante y puede reducirse aun más con el uso de aditivos.

Medio ambiente:

Una mención aparte es el caso del factor corrosión, la cual puede ser producida por el medio ambiente al cual se encuentra expuesto el ferrocemento. Las causas externas pueden ser físicas, químicas o mecánicas, pueden deberse al intemperismo, temperaturas extremas, abrasión, a la acción electrolítica, ataque de gases y líquidos naturales o industriales.

La congelación y el deshielo son factores importantes que también deben tomarse en cuenta con relación a la durabilidad. Estudios realizados nos indican que la adición de puzolanas o aditivos, proporcionan una mayor resistencia al ciclo de congelación y deshielo.

10.2 Corrosión

Todas las estructuras de ferrocemento están sujetas a ser atacadas por corrosión, siempre que existan los medios adecuados para que esta se origine. El riesgo de corrosión de dichas estructuras en comparación con las estructuras de concreto reforzado convencional es aún mayor, debido a la extrema delgadez del recubrimiento del mortero sobre el refuerzo de acero.

Para estructuras marinas de ferrocemento se recomienda que mortero sea fabricado con cemento Portland que contenga no más del 8% de aluminato tricálcico, a este requerimiento se adecuan los cementos tipo II y V; además una baja relación agua – cemento y la inclusión de aire, aumenten la resistencia al ataque de agua de mar.

Dentro de las causas más importantes de corrosión del ferrocemento tenemos:

a. Problemas de celda galvánica

Este tipo de problema se puede presentar cuando existen dos metales diferentes en el medio electrolítico. Nos da como resultado una tasa acelerada de disolución de un elemento del par (ánodo) y la protección del otro metal (cátodo). La dirección del flujo de la corriente depende de la naturaleza de los metales; así en el ferrocemento los dos metales diferentes son el recubrimiento de zinc de la malla galvanizada y el hierro en las varillas de refuerzo sin galvanizar.

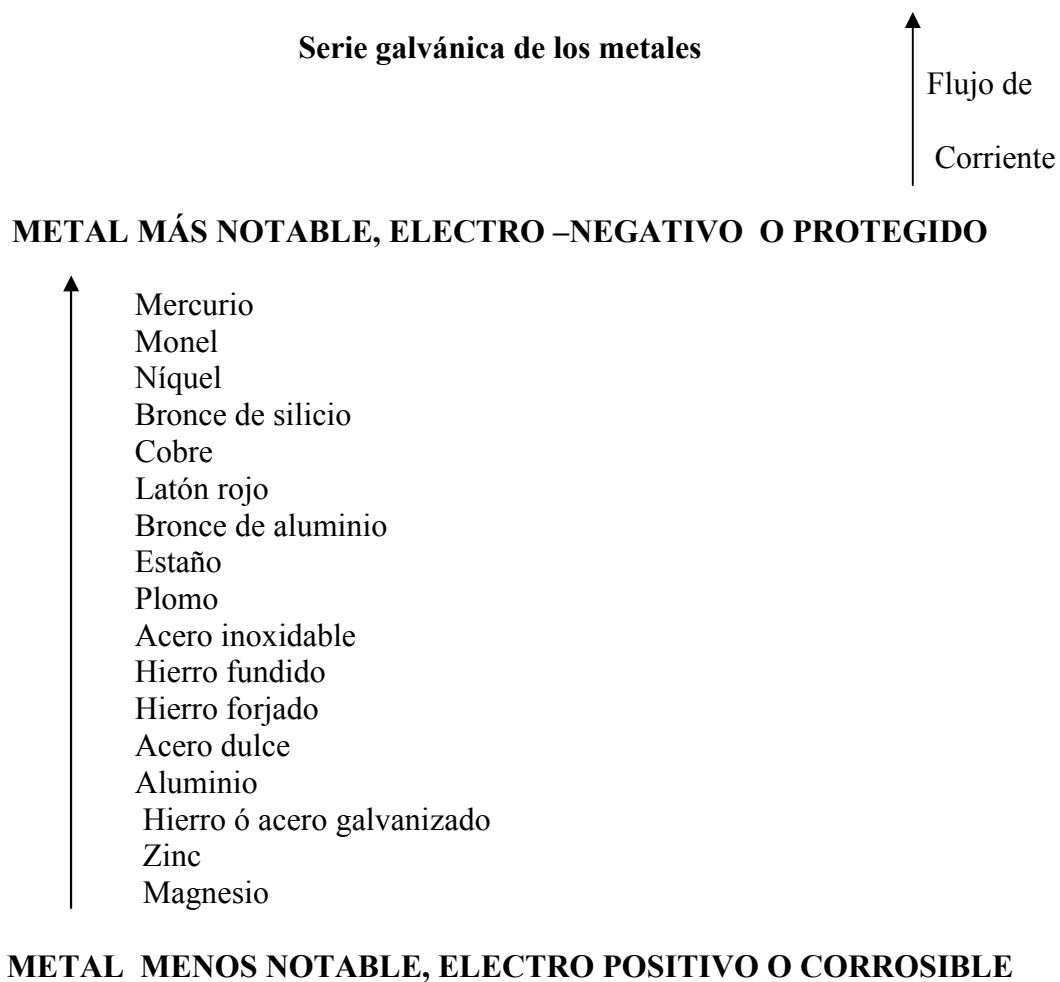
Se pueden tomar algunas medidas para evitar el desarrollo de este proceso de corrosión:

- Aislar eléctricamente el ánodo del cátodo.
- Hacer el ánodo y el cátodo del mismo metal ó de metales de potencial eléctrico similar.
- Mantener al electrolito fuera de contacto con el ánodo y el cátodo.

b. Serie galvánica

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

- Siempre que sea posible, utilizar los mismos metales que se encuentran cerca uno del otro en la serie galvánica; así utilizaremos varillas de refuerzo de acero negro (sin galvanizar) o varillas de refuerzo galvanizadas con malla galvanizada.
- Cuando se utilizan metales que se encuentran bastante separados en la serie Galvánica, hay que tratar de emplear mayor área superficial del metal más corrosible.
- Tratar de aislar metales diferentes o utilizar recubrimientos protectores adecuados.
- Evitar conexiones en forma de rosca, para unir metales diferentes.
- Neutralizar químicamente la acción de la celda galvánica.



11. Aplicaciones en el almacenamiento de agua

En muchos lugares del mundo, donde el agua actualmente tiene que recogerse diariamente desde largas distancias mediante el esfuerzo humano, existe la gran necesidad de buscar donde almacenarla para su consumo. Es así que se reporta que la mayor demanda de almacenamiento de agua en las granjas de Nueva Zelanda ha propiciado la introducción de los tanques de ferrocemento.

EL Structural Engineering Research Center (Madrás), en la India, construyó tanques prefabricados de ferrocemento para agua, que son utilizados en pueblos y pequeñas comunidades, estos tanques tienen una capacidad para 600 litros.

Este tipo de tecnología también tiene gran aplicación en los países en vías de desarrollo como el nuestro, pudiendo ser aplicado en forma masiva en las poblaciones rurales donde se puede aprovechar el uso de materiales locales y mano de obra barata. Es por ello que en los últimos años diversos países de Centro y Sudamérica se han interesado en la tecnología alternativa que ofrece ferrocemento, en especial para la construcción de sistemas de agua potable y saneamiento para las zonas urbano marginales y rurales, donde se requiere del uso de tanques de reserva, filtros, sistemas caseros de tratamiento de aguas servidas, cubiertas para viviendas, revestimientos de canales, etc.

En Ecuador se construyó por primera vez un tanque circular de ferrocemento para almacenamiento de agua en el año 1986, con una capacidad de 50 m^3 , obteniéndose como resultado en esta primera experiencia que su implementación producía considerables ahorros tanto en costos como en tiempos de construcción. Luego en 1991 se construyó un tanque de 100 m^3 para el sistema de agua potable de la comunidad de Palugo en Quito, combinando mampostería de ladrillo, columnas de hormigón armado y ferrocemento como recubrimiento interior de la pared del tanque de reserva. Actualmente se han elaborado diseños para tanques de 5 a 500 m^3 de capacidad.

En Colombia se han construido tanques circulares de 10 m^3 para el condominio Portal del Valle, así mismo tanques de paredes onduladas conformados por bóvedas prefabricadas, presentando la ventaja desde el punto de vista de capacidad casi ilimitada, habiéndose construido por el grupo San Carlos de Brasil tanques de 900 y 2700 m^3 de capacidad, con unos ahorros en costos del orden del 40% con respecto a los tanques cilíndricos de concreto.

Para el diseño y construcción en estos países cada uno de ellos han desarrollado su propia metodología a partir de experiencias en asia y oceanía principalmente y de investigaciones realizadas por el American Concrete Institute (ACI) de los Estados Unidos.

Por lo demás si hacemos una comparación de reservorios de acero y concreto, los de ferrocemento tienen un costo inferior a los otros; además que contribuyen en la reducción del peso total de la estructura, ahorrando así en el costo de los elementos de apoyo y la cimentación. Otra ventaja es la facilidad con que se construyen, especialmente aquellos tanques de almacenamiento para las poblaciones rurales, donde los volúmenes no son mayores a 20 m^3 , es allí donde se puede sacar mayor provecho.

12. Abreviaturas

A_c : Area transversal total de la sección de mortero (concreto).

b : Ancho de la sección de ferrocemento .

$\beta_{1c} = a$: Distancia de la fibra de deformación unitaria máxima de compresión.

c : Distancia desde la fibra de deformación unitaria máxima al eje neutro.

d_L, d_T : Espaciamiento de centro a centro de alambres alineados longitudinal y transversalmente en la malla de refuerzo.

d : Diámetro del alambre de la malla.

d_i : Profundidad de la capa i de refuerzo.

C_c : Fuerza de compresión en la sección de análisis.

t : Espesor de la sección de ferrocemento.

E_f, E_m : Módulo de elasticidad del refuerzo y de la matriz respectivamente.

f'_c : Resistencia a la compresión última del mortero.

f_y : Esfuerzo de fluencia del refuerzo

η : Factor de eficiencia global del refuerzo de malla en la dirección de la carga considerada

S_f : Separación del alambre en la malla .

SI : Superficie específica total del refuerzo.

V_f : volumen total del refuerzo en la sección del compuesto.

V_{fi} : Fracción de volumen del refuerzo para la capa de la malla i en %

V_{fmin} : Fracción mínima de volumen de las fibras en la dirección de la carga .

σ_{mu} : Resistencia última a la tensión de la matriz .

σ_{tu} : Esfuerzo de tensión última del compuesto .

M_n : Momento nominal o teórico

13. Bibliografía

- ❖ Tópicos de Tecnología del Concreto - Ing Enrique Pasquel C.
- ❖ Diseño de Mezclas - Ing Enrique Rivva L.
- ❖ Durabilidad del Concreto ACI – 201 - Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto (I.M.C.Y.C)
- ❖ Concrete And Chlorides- American Concrete Institute – Boletin ACI SP – 102
- ❖ National Academy Of Sciences “Ferrocement : Aplication in Developing Countries “
- ❖ Committee 549 “state of the report on ferrocement”
- ❖ Committee 549 “Guide for the Design , construction and Repair of Ferrocement”
- ❖ Committee 544 “State of -the -Art Report on fiber Reinforced Concrete”
- ❖ Committee 515 “Guide for the Protection of concrete Against Chemical by Means of coatings and other corrosion Resistant Materials”
- ❖ Tecnologías apropiadas , Diseño y Construcción de Tanques de Ferrocemento - C. Ibarra Sandoval
- ❖ B.K Paul , R.P Pama “Ferrocement”