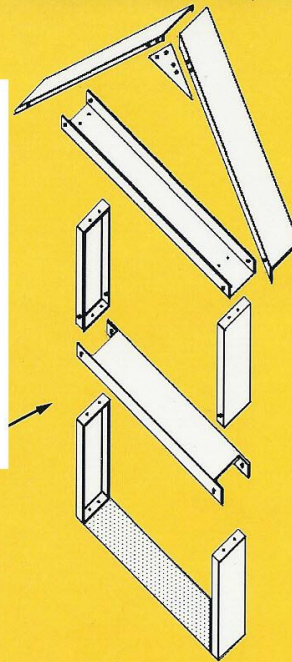
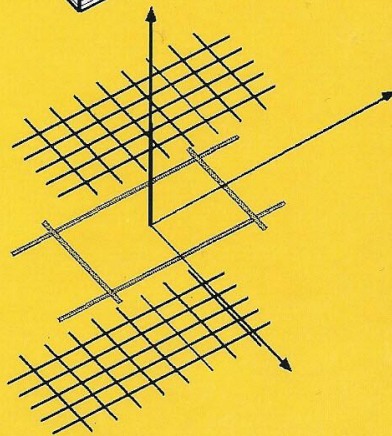
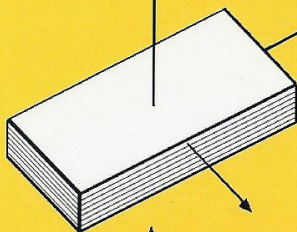


ANTOINE E. NAAMAN

Traducción española:

**FERROCEMENTO
Y COMPUESTOS
CEMENTICIOS
LAMINADOS**

Traducido al español por:
Patricia Guerrero y Jose Javier Martinez



**FERROCEMENT
& LAMINATED
CEMENTITIOUS
COMPOSITES**

TECHNO PRESS 3000

FERROCEMENTO Y COMPUESTOS CEMENTICIOS LAMINADOS

Traducido de la edición titulada en inglés:

FERROCEMENT AND LAMINATED CEMENTITIOUS COMPOSITES

ISBN: 0-9674939-0-0

FERROCEMENTO Y COMPUESTOS CEMENTICIOS LAMINADOS

Antoine E. Naaman

*Profesor de Ingeniería Civil
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Universidad de Michigan
Ann Arbor, Michigan, 48109-2125, USA*

Traducido al español por:

Patricia Guerrero

*Universidad del Valle
Cali, Colombia*

José Javier Martínez

*Pontificia Universidad Javeriana
Cali, Colombia*

Techno Press
P.O. Box 131038, Ann Arbor
Michigan 48105
USA

A mis hijos
Patrick y Charles
y a mis estudiantes
por todo
lo que me han enseñado

*“Saber que el ayer es tan solo memoria del presente
y que el mañana es tan solo sueño del presente”*
K. Gibran

Datos de Catalogación para Publicación

(Proporcionado por Quality Books, Inc.)

Naaman, Antoine E.

Ferrocement & Laminated Cementitious Composites
(Ferrocemento y Compuestos Cementicios Laminados)

/ Antoine E. Naaman – Primera Edición

p. cm.

Incluye índice y referencias bibliográficas

ISBN: 0-9674939-0-0

1. Concreto reforzado, Fibras. 2. Construcción en Concreto Reforzado
3. Compuestos con Concreto Reforzado. I. Título

TA444.N33 2000

624. 1'8341

QBI99-1295

Número de Ficha en Catálogo de Biblioteca del Congreso (USA)

LCCN: 99-96382

Editor de Copias: Helayne Beaver

Diseño de la Portada: Stephanie Terroir

Ferrocement & Laminated Cementitious Composites

(Ferrocemento y Compuestos Cementicios Laminados)

Derechos de autor © 2000 por Antoine E. Naaman. Ninguna parte de este libro debe ser reproducido de alguna forma o por cualquier medio, traducido a otro idioma, guardado en una base de datos o sistema para obtención de información, o transmitido de alguna manera o por cualquier medio, sin el permiso del autor o de la casa editorial.

Impreso en los Estados Unidos de América

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

Techno Press 3000

P.O. Box 131038

528 Green Road

Ann Arbor, Michigan 48105. USA

www.technopress3000.com

ISBN 0-9674939-0-0

Renuncia de Responsabilidad: El autor y la editorial han realizado los mayores esfuerzos en preparar este libro. Sin embargo, ellos no asumen garantías de cualquier tipo, expresa o implícita, con respecto al material contenido en este libro, y no serán responsables en ningún caso por las consecuencias de su uso.

Marca Registrada: Productos, corporaciones y/o nombre de asociaciones profesionales pueden ser marcas registradas y son usadas únicamente para identificación o explicación, sin ningún intento de violar la ley.

TABLA DE CONTENIDOS

PRÓLOGO

RECONOCIMIENTOS

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN AL FERROCEMENTO

1

- 1.1 FERROCEMENTO: DEFINICIÓN Y ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....1
 - 1.1.1 Introducción.....1
 - 1.1.2 Definición del Comité 549 del ACI.....9
 - 1.1.3 Definición Revisada Sugerida.....9
- 1.2 APLICACIONES DEL FERROCEMENTO.....9
 - 1.2.1 Aplicaciones Marinas.....10
 - 1.2.2 Aplicaciones Terrestres.....10
 - 1.2.3 Reparación y Rehabilitación.....14
- 1.3 MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL FERROCEMENTO.....14
 - 1.3.1 Matriz con Base en Cemento: Composición y Resistencia a la Compresión.....16
 - 1.3.2 Armazón de Acero.....16
 - 1.3.3 Mallas de Refuerzo.....16
- 1.4 CARACTERÍSTICAS DISTINTIVAS DEL FERROCEMENTO FRENTE AL CONCRETO REFORZADO.....21
 - 1.4.1 Físicas.....21
 - 1.4.2 Mecánicas.....22
 - 1.4.3 Procesamiento/Producción/Mantenimiento/Reparación.....23
- 1.5 SIMILITUDES ENTRE FERROCEMENTO Y CONCRETO REFORZADO.....23
- 1.6 FRACCIÓN DE VOLÚMEN DE REFUERZO.....24
 - 1.6.1 Mallas Cuadradas o Rectangulares.....24
 - 1.6.1.1 Ejemplo: Mallas Cuadradas.....25
 - 1.6.2 Cualquier Tipo de Malla.....26
 - 1.6.2.1 Ejemplo: Malla de Metal Expandido.....27
 - 1.6.3 Mallas FRP.....27
 - 1.6.3.1 Ejemplo: FRP.....28
- 1.7 SUPERFICIE ESPECÍFICA DE REFUERZO.....28
 - 1.7.1 Ejemplo: Concreto Reforzado Comparado con Ferrocemento29
- 1.8 COMPORTAMIENTO DISTINTIVO DEL FERROCEMENTO EN TRACCIÓN.....30
 - 1.8.1 Agrietamiento y Múltiple Agrietamiento.....30
 - 1.8.2 Máximo Alargamiento en la Falla.....32
 - 1.8.3 Esfuerzos en el Primer Agrietamiento.....32
 - 1.8.2 Influencia de la Superficie Específica del Refuerzo.....35
 - 1.8.3 Módulo Aparente del Sistema de Mallas.....36
- 1.9 FERROCEMENTO: UN COMPUESTO Y UN MIEMBRO DE LA FAMILIA DEL CONCRETO ESTRUCTURAL.....38
- 1.10 FERROCEMENTO Y COMPUESTOS POLIMÉRICOS FIBROREFORZADOS.....39
- 1.11 FERROCEMENTO COMO UN COMPUESTO LAMINADO.....41

1.12 VENTAJAS DEL FERROCEMENTO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.....41

Capítulo 2 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL FERROCEMENTO OBSERVADAS EN LOS ENSAYOS 45

- 2.1 INTRODUCCIÓN.....45
- 2.2 PROPIEDADES EN TRACCIÓN.....46
- 2.3 PRIMER AGRIETAMIENTO.....50
- 2.4 MÓDULO DE ELASTICIDAD EN TRACCIÓN.....51
 - 2.4.1 Elementos no Agrietados.....51
 - 2.4.2 Elementos Agrietados.....52
- 2.5 FLEXIÓN.....52
 - 2.5.1 Comportamiento Típico.....53
 - 2.5.2 Observaciones y Conclusiones.....58
- 2.6 FATIGA POR FLEXIÓN.....60
- 2.7 CORTANTE.....61
 - 2.7.1 Diseño para Cortante.....62
- 2.8 COMPRESIÓN.....64
- 2.9 IMPACTO-IMPERMEABILIDAD.....65
- 2.10 FILTRACIÓN.....67
- 2.11 RESISTENCIA AL FUEGO.....69
- 2.12 DURABILIDAD.....69
- 2.13 CRITERIOS PARA SELECCIÓN Y USO DEL FERROCEMENTO.....70

Capítulo 3 MODELAMIENTO DE LA RESPUESTA A TENSIÓN DEL FERROCEMENTO Y OTROS COMPUESTOS DE MATRIZ FRÁGIL CON FIBRAS CONTINUAS 73

- 3.1 SUPOSICIONES GENERALES Y NOTACIÓN.....73
- 3.2 ELEMENTO A TENSIÓN NO AGRIETADO: MECANISMO BÁSICO Y MODELO.....76
 - 3.2.1 Esfuerzos en Fibras y Matriz dentro de la Longitud de Transición.....76
 - 3.2.2 Distancia donde Ocurren Iguales Deformaciones: Distancia de Transferencia.....78
 - 3.2.3 Esfuerzos en la Matriz y Refuerzo más Allá de la Distancia de Transferencia.....80
 - 3.2.4 Cargas y Esfuerzos en el Primer Agrietamiento de la Matriz.....80
 - 3.2.5 Fracción Mínima del Volúmen de Refuerzo.....81
- 3.3 EJEMPLO: ELEMENTO NO AGRIETADO A TENSIÓN.....82
 - 3.3.1 Sistema SI.....82
 - 3.3.2 Sistema US.....84
- 3.4 MIEMBRO A TENSIÓN AGRIETADO: MECANISMO BÁSICO Y MODELO.....86
 - 3.4.1 Esfuerzos en la Matriz y Refuerzo para una Sección Agrietada.....86
 - 3.4.2 Esfuerzos entre Dos Grietas.....88
 - 3.4.3 Esfuerzos de Fluencia y Último.....88
 - 3.4.4 Espaciamiento de Fisuras Mínimo, Máximo y Promedio.....88
 - 3.4.5 Esfuerzos Promedio en el Refuerzo y la Matriz.....91
 - 3.4.6 Ancho Promedio de las Fisuras.....93

3.5	EJEMPLO: MIEMBRO AGRIETADO DE FERROCEMENTO EN TENSIÓN.....95
3.5.1	Sistema SI.....95
3.5.2	Sistema US.....97
3.6	OBSERVACIONES EXPERIMENTALES QUE SOPORTAN LA TEORÍA DEL AGRIETAMIENTO.....100
3.7	MÁXIMO ANCHO DE FISURA EN ELEMENTOS DE FERROCEMENTO A TENSIÓN: PROPUESTA SEGÚN GUÍA DEL ACI.....106
3.7.1	Sistema US.....106
3.7.2	Sistema SI.....106
3.7.3	Ejemplo: Ancho de Grieta Usando el Método Recomendado del ACI.....107
3.8	MÓDULO ELÁSTICO. MIEMBROS AGRIETADOS Y NO AGRIETADOS.....108
3.8.1	Miembros no Agrietados: Solución por Límite Superior.....109
3.8.2	Miembro Agrietado: Solución por Límite Inferior Absoluto.....110
3.8.3	Miembro Agrietado: Propuesta para Solución General Aproximada.....110
3.9	EJEMPLO: PREDICCIÓN DE LA RESPUESTA ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE UN COMPUESTO.....111
3.9.1	Sistema SI.....111
3.9.2	Sistema US.....115
3.10	PROPIEDADES BÁSICAS COMO VARIABLES ALEATORIAS.....117
3.11	COMETARIOS PARTICULARES PARA EL FERROCEMENTO.....117

Capítulo 4 ANÁLISIS Y DISEÑO DEL FERROCEMENTO EN FLEXIÓN 121

4.1	NOTACIÓN.....121
4.2	DIFERENCIAS EN EL ANÁLISIS Y DISEÑO DEL FERROCEMENTO CON CONCRETO REFORZADO CONVENCIONAL.....122
4.3	SOLUCIONES PROPUESTAS.....122
4.4	ÁREA EFECTIVA DE REFUERZO.....123
4.5	RESPUESTA TÍPICA DE MOMENTO CURVATURA125
4.6	MÉTODO DE ANÁLISIS PARA FLEXIÓN BAJO CARGAS DE SERVICIO.....125
4.6.1	Fórmula de Flexión: Sección no Agrietada.....126
4.6.2	Método del Área Transformada para la Sección Agrietada.....127
4.6.3	Equilibrio y Compatibilidad de Deformaciones para la Sección Agrietada.....129
4.6.4	Curva de Momento contra Deflexión.....130
4.7	EJEMPLO: SECCIÓN AGRIETADA POR EL MÉTODO DEL ÁREA TRANSFORMADA (<i>Sistema SI</i>).....130
4.7.1	Refuerzo con Mallas Soldadas.....130
4.7.2	Refuerzo con Mallas de Acero Expandido.....133
4.8	EJEMPLO: SECCIÓN AGRIETADA POR EL MÉTODO DEL ÁREA TRANSFORMADA (<i>Sistema US</i>).....134
4.8.1	Refuerzo con Mallas Soldadas.....134
4.8.2	Refuerzo con Mallas de Acero Expandido.....136
4.9	MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA RESISTENCIA NOMINAL A FLEXIÓN.....137
4.9.1	Método de Compatibilidad Similar a Columnas de Concreto Reforzado.....139
4.9.1.1	Ejemplo: M_n por el Método de Compatibilidad (<i>Sistema SI</i>).....139
4.9.2	Método Simplificado con todo el Refuerzo a Tensión Fluyendo.....141
4.9.2.1	Ejemplo: M_n Asumiendo todo el Refuerzo a Tensión Fluyendo (<i>Sistema SI</i>).....142

4.9.3	Método Simplificado Usando Análisis Plástico.....	142
4.9.3.1	Ejemplo: M_n Usando Momento Plástico (<i>Sistema SI</i>).....	144
4.9.4	Método Simplificado Usando Gráfica de Diseño o Ecuación de Regresión.....	144
4.9.4.1	Ejemplo: M_n Usando La Ecuación de Regresión (<i>Sistema SI</i>).....	146
4.9.5	Recomendaciones sobre el Uso de Métodos Simplificados.....	146
4.10	EJEMPLOS ADICIONALES DE RESISTENCIA NOMINAL A LA FLEXIÓN USANDO MÉTODOS SIMPLIFICADOS.....	146
4.10.1	Aproximación Mediante el Uso del Momento Plástico.....	148
4.10.2	Aproximación Usando la Gráfica Adimensional de Diseño o la Ecuación de Regresión.....	148
4.10.3	Aproximación Suponiendo la Fluencia en Todo el Refuerzo a Tensión.....	148
4.11	PREDICCIONES DEL ANCHO DE LA FISURA EN FLEXIÓN.....	149
4.11.1	Carga Estática o Monotónica.....	149
4.11.2	Carga Cíclica de Fatiga.....	150
4.11.3	Ejemplo: Ancho de Fisuras en Flexión.....	151
4.12	ESFUERZO ELÁSTICO EQUIVALENTE DE FLEXIÓN (M_R) Y CORRELACIÓN CON ESFUERZOS DE TENSIÓN.....	152
4.12.1	Módulo de Rotura (M_R).....	152
4.12.1.1	Ejemplo: M_R Usando la Ecuación de Predicción (<i>Sistema SI</i>).....	153
4.12.2	Módulo de Rotura Comparado con la Resistencia a la Tensión.....	154
4.12.2.1	Ejemplo: Relación entre Esfuerzos de Flexión y Tensión.....	155
4.12.3	Ejemplo: Ancho de Fisuras en Flexión.....	151
4.13	COMPUTO DE DEFLEXIONES.....	155
4.13.1	Deflexiones en Vigas Simplemente Apoyadas Agrietadas y no Agrietadas.....	155
4.13.2	Relación Momento-Deflexión.....	157
4.14	COMENTARIOS FINALES.....	157

Capítulo 5 GUÍAS PRÁCTICAS DE DISEÑO

159

5.1	FILOSOFIA DE DISEÑO.....	159
5.2	PROPUESTAS GENERALES DE DISEÑO.....	160
5.2.1	Procedimientos USD, LSD ó LRFD.....	161
5.2.2	Procedimientos WSD ó ASD.....	162
5.3	PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO APLICADOS AL FERROCEMENTO.....	164
5.4	GUÍAS PRÁCTICAS DE DISEÑO PARA ASEGURAR BUENA SERVICIABILIDAD.....	165
5.4.1	Esfuerzos Admisibles bajo Máximas Cargas de Servicio.....	165
5.4.2	Máximo Ancho de Fisuras.....	166
5.4.3	Vida Útil por Fatiga.....	166
5.4.4	Durabilidad y Corrosión.....	166
5.4.5	Limitaciones para Deflexión.....	166
5.5	PARÁMETROS PRÁCTICOS DE DISEÑO PARA FERROCEMENTO	166
5.6	GUÍAS PARA UNA BUENA CONSTRUCCIÓN.....	169
5.7	EJEMPLO DE DISEÑO: ELEMENTO A TENSIÓN - PARED DE UN TANQUE DE AGUA.....	170
5.8	EJEMPLO DE DISEÑO: ELEMENTO A FLEXIÓN – PANEL TIPO EMPAREDADO PARA UN PISO.....	172
5.9	COMENTARIOS FINALES.....	137

Capítulo 6 CONSTRUCCIÓN Y FABRICACIÓN DEL FERROCEMENTO 181

- 6.1 INTRODUCCIÓN.....181
- 6.2 COLOCACIÓN DEL MORTERO.....182
- 6.3 MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN.....183
 - 6.3.1 Método de la Armadura de Refuerzo o Esqueleto de Armado.....184
 - 6.3.2 Método del Molde Cerrado.....185
 - 6.3.3 Método del Molde Integral.....188
 - 6.3.4 Método del Molde Abierto.....190
- 6.4 TÉCNICAS ESPECIALES DE CONSTRUCCIÓN.....191
- 6.5 ELEMENTOS DE FERROCEMENTO COMPARADOS CON LA ESTRUCTURA.....198
- 6.6 TRATAMIENTOS PARA PROTECCIÓN DE SUPERFICIES.....170
- 6.7 AVANCES ACTUALES CON Y ESTRUCTURAS NOTABLES DE FERROCEMENTO....199

Capítulo 7 ENSAYOS PARA EL REFUERZO Y LAS PROPIEDADES DEL COMPUESTO 205

- 7.1 INTRODUCCIÓN.....205
- 7.2 ENSAYOS RECOMENDADOS.....205
 - 7.2.1 Resistencia a la Compresión y Módulo Estático de Elasticidad del Mortero.....207
 - 7.2.2 Ensayo a Tensión de la Malla de Refuerzo.....207
 - 7.2.3 Ensayo a Tensión del Ferrocemento.....210
 - 7.2.4 Ensayo a Flexión del Ferrocemento.....211
- 7.3 FACTOR DE EFICIENCIA DEL REFUERZO.....212
 - 7.3.1 Ensayos Directos de Tensión para Determinar η_o213
 - 7.3.2 Ensayos de Flexión con Una Capa de Malla para Determinar η_o 213
 - 7.3.3 Ensayos de Flexión con Varias Capas de Refuerzo para Determinar η_o 214
 - 7.3.4 Discusión Relacionada con σ_{ry} y E_r216
 - 7.3.5 Secuencia de los Ensayos.....217
- 7.4 VALORES RECOMENDADOS PARA η_o , σ_{ry} y E_r217
- 7.5 EJEMPLO DEL CÁLCULO DE E_r , η_L y σ_{ru} 217
- 7.6 EJEMPLO DEL CÁLCULO DE LA RESISTENCIA A LA FLUENCIA σ_{ry} DE UNA MALLA.....125
 - 7.6.1 Usando el Ensayo a Tensión del Compuesto.....219
 - 7.6.2 Usando el Ensayo a Flexión del Compuesto.....220
- 7.7 EJEMPLO DEL CÁLCULO DEL MÓDULO ELÁSTICO DE LA MALLA A PARTIR DE UN ENSAYO A FLEXIÓN.....221

Capítulo 8 COSTOS ESTIMADOS PARA COMPUESTOS TÍPICOS DE FERROCEMENTO 225

- 8.1 INTRODUCCIÓN.....225
- 8.2 DESCRIPCIÓN DE ESTUDIO DE COSTOS.....225
- 8.3 RESULTADOS DE COSTOS COMPARATIVOS.....230
- 8.4 ÍNDICES DE COSTO PARA EDIFICACIONES Y CONSTRUCCIÓN234

- 8.4.1 Definición234
- 8.4.2 Correlación de Costos al Presente236
- 8.4.3 Importancia Relativa de la Labor y los Costos de Materiales.....237
- 8.5 EJEMPLOS DE COSTOS BRUTOS BASADOS EN ESTIMATIVOS DE EXPERIENCIAS PASADAS238
- 8.6 COMENTARIOS SOBRE MEDIADAS DE REDUCCIÓN DE COSTOS.....242

Capítulo 9 GUÍAS PRÁCTICAS DE DISEÑO 245

- 9.1 INTRODUCCIÓN.....245
- 9.2 ANTECEDENTES: SISTEMAS DE VIVIENDA EN FERROCEMENTO.....246
- 9.3 EJEMPLO DE UN SISTEMAS DE VIVIENDA CON PANELES DE FERROCEMENTO....250
 - 9.3.1 Criterios para Desarrollar el Sistema.....250
 - 9.3.2 Bases del Estudio.....253
 - 9.3.3 Desarrollo de un Sistema de Paneles.....254
 - 9.3.4 Tipos de Juntas y Conexiones.....256
 - 9.3.5 Conexión Tipo Cortante.....256
 - 9.3.6 Conexión Tipo Momento.....263
- 9.4 PANELES DE FERROCEMENTO TIPO EMPAREDADO.....267
- 9.5 CASAS MANUFACTURADAS: VISIÓN DE LA INGENIERÍA Y SUEÑO DEL CONSUMIDOR.....272
- 9.6 UN AUDITORIO MONOLÍTICO EEN FERROCEMENTOI.....273
- 9.7 TANQUES DE AGUA EN FERROCEMENTO.....273
- 9.8 PROTECTORES SOLARES.....276
- 9.9 COMENTARIOS FINALES.....277

Capítulo 10 MATERIALES AVANZADOS Y CONCEPTOS 281

- 10.1 MATERIALES AVANZADOS O DE ALTO DESEMPEÑO.....281
- 10.2 MALLAS REFORZADAS CON FIBRAS POLIMÉRICAS.....282
 - 10.2.1 Introducción - Significancia.....282
 - 10.2.2 Ventajas e Inconvenientes.....282
 - 10.2.3 Tipos y Disponibilidad.....283
 - 10.2.4 Consideraciones de Costos.....283
 - 10.2.5 Ejemplos de Mallas FRP Ensayadas.....286
 - 10.2.6 Parámetros de Ensayo en Investigación Experimental.....288
 - 10.2.7 Resultados Típicos.....290
 - 10.2.7.1 Influencia de V_f ó Número de Malla.....290
 - 10.2.7.2 Respuesta de Carga y Descarga.....291
 - 10.2.7.3 Efecto del Proceso de Producción.....294
 - 10.2.7.4 Efecto del Uso de Mallas con Bajo Módulo de Elasticidad.....294
 - 10.2.7.5 Efecto del Uso de Tapices de Fibra.....294
 - 10.2.8 Conclusiones sobre el Uso de Mallas FRP con Matrices de Mortero de Cemento Convencional.....296
- 10.3 COMPUESTOS HÍBRIDOS CON MALLAS Y FIBRAS.....297
 - 10.3.1 Justificación.....297
 - 10.3.2 Resultados Experimentales.....299
 - 10.3.2.1 Efectos de la Adición de Fibras Discontinuas con Mallas PVA.....299

10.3.2.2	Efecto de la Adición de Fibras Discontinuas con Mallas de Carbón.....	300
10.3.2.3	Efecto de la Adición de Fibras Discontinuas con Mallas Kevlar y Spectra.....	302
10.3.3	Conclusiones sobre el Uso de Compuestos Híbridos.....	304
10.4	MALLAS TRIDIMENSIONALES (3-D).....	305
10.5	MATRICES AVANZADAS.....	307
10.5.1	Matrices inorgánicas.....	282
10.5.2	Compuestos de Concreto Polimérico.....	308
10.6	COMPUESTOS AUTOESFORZABLES.....	309
10.6.1	Motivación.....	309
10.6.2	Métodos de Preesfuerzo y Autoesfuerzo.....	309
10.6.3	Definición de la Propiedad Controlada de la Deformación (<i>DCPR</i>).....	310
10.6.4	Porqué Compuestos Cementicios Autoesforzables y Que Se Puede Esperar.....	311
10.6.5	Ventajas del Autoesfuerzo.....	311
10.6.6	Formulación Analítica.....	312
10.6.7	Resultados Analíticos Típicos.....	315
10.6.8	Resultados Experimentales para Demostrar el Concepto.....	317
10.7	COMENTARIOS FINALES.....	305

Capítulo 11 PERSPECTIVAS PARA MATERIALES DE FERROCEMENTO, APLICACIÓN Y TECNOLOGÍA **323**

11.1	TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN EN MATERIA DE CONSTRUCCIÓN.....	323
11.2	PERSPECTIVAS, APLICACIONES Y TECNOLOGÍA.....	323

Apéndice A: NOTACIÓN	329
Apéndice B: UNIDADES DE CONVERSIÓN	335
Apéndice C: REFERENCIAS	337
Apéndice D: MALLAS, ALAMBRES Y BARRAS ESTÁNDARES	355
Apéndice E: FÓRMULAS COMÚNES PARA VIGAS	359
ÍNDICE	367

PRÓLOGO

“Ferciment” o ferrocemento, es verdaderamente la primera invención de concreto reforzado, el material de construcción más usado en el mundo. La principal diferencia entre ambos es básicamente la escala. El concreto reforzado usa barra de refuerzo de mayor tamaño en lugar de alambres y mallas, y unos ligantes del concreto, que a diferencia de la pasta de cemento y el mortero, son agregados de mayor tamaño. El termino ferrocemento usualmente es relacionado a compuestos delgados hechos con matrices de mortero basadas en materiales cementantes, y reforzados con capas mallas hechas de alambres de diámetro pequeño los cuales están estrechamente separados. La malla puede ser metálica o de otro material apropiado. Puesto que mallas hechas de fibras poliméricas avanzadas, tales como fibras de carbón, Kevlar, Spectra y otras parecidas, están tornándose cada vez más disponibles como refuerzo para la construcción de elementos de ferrocemento, éste también puede ser considerado como un compuesto cementicio laminado de alto desempeño. La finura de la matriz cementicia está diseñada para permitir que las mallas del sistema de refuerzo queden impregnadas por el material cementante, y para limitar el tamaño de los granos de arena que se van a utilizar. El espesor de una lámina de ferrocemento es generalmente menor a 25 mm pero en algunos casos puede alcanzar hasta los 50 mm.

El ferrocemento fue inventado por el Francés Joseph Louis Lambot, en 1848, pero con el rápido avance del concreto reforzado, el desarrollo del ferrocemento se apagó y casi desapareció hacia la segunda mitad del siglo veinte. Sin embargo, hoy día existe un reconocimiento del uso del ferrocemento en aplicaciones donde sus propiedades, facilidad de construcción y costos efectivos proporcionan una herramienta convincente de extensión dentro de la tecnología del concreto reforzado.

La manera de atribuirle al ferrocemento la característica de ser un producto liviano de concreto reforzado y de ser un compuesto laminado basado en materiales cementicios, contribuye a que pueda ser usado en numerosas aplicaciones donde una armadura fuerte y resistente sea necesaria, incluyendo nuevas estructuras marinas y terrestres, o en la reparación y rehabilitación de estructuras existentes. Las aplicaciones marinas incluyen botes, barcos de pesca, barcazas y plataformas, entre otras. Dentro de las aplicaciones terrestres se incluyen tanques de agua, silos, canales de irrigación, cáscaras y, principalmente, viviendas monolíticas, prefabricadas y auto-construidas. Residencias hechas de ferrocemento son conocidas por resistir significativamente mejor a los tornados y huracanes que casas convencionales elaboradas en madera.

La tecnología del ferrocemento es considerada como una opción ambientalmente sana. Aunque tiene de 150 años, y a pesar de que tiene numerosas aplicaciones alrededor del mundo, no hay suficientes libros que proporcionen información comprensible sobre los fundamentos del ferrocemento en análisis, diseño, construcción, ensayos, propiedades mecánicas, aplicaciones y potenciales. Más aún, las ventajosas propiedades del ferrocemento, tales como resistencia, dureza, impermeabilidad, peso liviano, durabilidad, resistencia al fuego y estabilidad ambiental, no pueden ser igualadas por ningún otro material laminar usado en la construcción.

A nivel de mecánica y construcción de modelos analíticos, el ferrocemento cae dentro de la familia de los compuestos cementicios laminados. Debido a la naturaleza frágil de las matrices cementicias y a la poca capacidad de deformación en tensión comparada con la del refuerzo, la mecánica del ferrocemento difiere de aquella de compuestos comunes reforzados con fibras poliméricas en los cuales la matriz es dúctil y tiene una deformación última a tensión mayor que la de la fibra. Mientras que numerosos textos cubren con profundidad los compuestos con fibras poliméricas, muy pocos relacionan la mecánica de matrices compuestas tales como el ferrocemento. En ferrocemento, la contribución del refuerzo viene a ser significativa únicamente después de la aparición de la primera fisura. El análisis elástico convencional de compuestos laminados, en el cual son usados módulos de elasticidad para diferentes cargas y direcciones de deformación, necesita un refinamiento más significativo para permanecer aplicable en estado de agrietamiento (con frecuencia, inelástico) en el cual el ferrocemento y los compuestos cementicios se catalogan. Simplificaciones racionales se necesitan para la mayoría de las situaciones relacionadas con este tipo de análisis.

Este libro es escrito para ingenieros, arquitectos, estudiantes y profesionales. Es propuesto como un libro enseñanza, una fuente de información comprensible y una referencia básica. El libro enfatiza los conceptos fundamentales para el análisis y diseño del ferrocemento y señala sus características en relación con el concreto reforzado, por un lado, y con los compuestos reforzados con fibras polimérica, por otro lado. Numerosos ejemplos son presentados para ilustrar los diferentes conceptos y las metodologías descritas. El material cubierto debe ser considerado un complemento esencial para expandir el conocimiento y la habilidad de cualquier profesional involucrado en el análisis, diseño y construcción de estructuras tradicionales de concreto reforzado y preesforzado. El texto es también una fuente única para guiar, a constructores aficionados y auto-constructores de estructuras marinas y terrestres, a seleccionar los materiales adecuados y el método de construcción que garantice una estructura sólida. Los sistemas de unidades SI (Sistema Internacional) y US (Estados Unidos) son generalmente usados en las figuras y los ejemplos, pero se da una preferencia al sistema internacional.

El libro comprende once capítulos abarcando información que va desde definiciones hasta el estudio de tópicos avanzados y conceptos de investigación.

- La definición, características, aplicaciones y principales propiedades mecánicas del ferrocemento son descritas en los capítulos 1 y 2, los cuales proporcionan una visión general y direccionan el lector a otras secciones del libro donde información adicional puede ser encontrada.
- Los capítulos 3 y 4 están enfocados al análisis racional del ferrocemento a tensión y flexión, al modelamiento de su comportamiento en los estados no agrietado y agrietado y a los métodos aproximados de análisis y diseño.
- El capítulo 5 describe las pautas para el diseño del ferrocemento y proporciona algunas recomendaciones relacionadas con las dimensiones y tolerancia para aplicarlas apropiadamente en construcción.
- En el capítulo 6 se describe los métodos comúnmente aceptados en el campo de la construcción con ferrocemento, al igual que los métodos más apropiados para la producción a gran escala y prefabricado de elementos en ferrocemento.
- El capítulo 7 trata de ensayos a muestras de ferrocemento y a los materiales constitutivos; en particular, el capítulo cubre ensayos a sistemas de mallas y a compuestos en tensión o flexión, e ilustra con ejemplos como extraer información importante acerca de las propiedades de los materiales a partir de los resultados experimentales.

- En el capítulo 8 se discuten varias consideraciones de los costos que aplican a la construcción en ferrocemento, incluyendo costos con base en ciertos desempeños especificados, relación de costos por mano de obra y materiales, y a los índices de costo en general.
- En el capítulo 9 se describe el uso del ferrocemento en vivienda, con especial énfasis en sistemas residenciales que usan paneles prefabricados y conexiones pernadas.
- El capítulo 10 presenta materiales avanzados y conceptos para ferrocemento tales como mallas de refuerzo con fibras poliméricas, matrices cementicias de alto desempeño, compuestos híbridos con adición de mallas y fibras discontinuas, mallas tridimensionales y compuestos autoesforzables.
- En el capítulo 11 se discuten prospectos de materiales a usar en ferrocemento, aplicaciones y tecnología, tendencias generales de investigación en materiales de construcción y las funciones del ferrocemento y los compuestos cementicios laminados.

Después de una investigación extensiva de numerosas indagaciones, estoy convencido de los excepcionales beneficios del ferrocemento como un sólido material de construcción. Es mi interés escribir el más comprensible texto sobre el tema y sintetizar la información clave sin profundizar demasiado en datos de investigación. Es mi deseo ayudar a estudiantes, profesionales, arquitectos e ingenieros a descubrir los beneficios del ferrocemento, especialmente para aplicaciones terrestres. Espero, igualmente, que este libro no solo ayude a mejorar la calidad de las viviendas construidas profesionalmente sino también unidades residenciales en áreas en vía de desarrollo alrededor del mundo, especialmente aquellas propensas a tornados, huracanes y sismos.

He resumido en éste libro todo lo aprendido en el estudio y uso práctico del ferrocemento hasta la fecha. Es mi más sincera promesa que aquellos que buscan conocimiento no estarán defraudados.

RECONOCIMIENTOS

Estoy muy agradecido con la Universidad de Michigan que me proporcionó un ambiente acogedor de gran excelencia; igualmente, a mis alumnos quienes me brindaron la oportunidad de enseñar así como la oportunidad de aprender.

Mis más sinceros agradecimientos son merecidamente para varios amigos y colegas, particularmente a los miembros de la Sociedad Internacional del Ferrocemento, por sus palabras de aliento para escribir éste libro.

Al profesor P. Balaguru (Universidad de Rutgers) quien revisó los capítulos 2 y 4. Al profesor Gordon Bastón (Universidad Clarkson) que revisó los capítulos 2 y 9. Al Dr. Jamil Alwan (Compañía Ford Motors) quien revisó los capítulos 3 y 4. Al profesor Surendra Shah (Universidad de Northwestern) que revisó el esquema general y los propósitos del libro. Para señor Martín Iorns (Sacramento, California) quien realizó valiosas sugerencias para mejorar y complementar los capítulos 6 y 8 sobre construcción y costos. Al Dr. Lilia Robles-Austriaco (Centro Internacional de Información sobre Ferrocemento, AIT, Bangkok) quien los capítulos 1 y 3 y proporcionó numerosas fotografías de aplicaciones del ferrocemento. A la profesora Patricia Guerrero (Universidad del Valle, Cali, Colombia), quien revisó los capítulos 4 y 7. A los estudiantes Chuchai Sujivorakul y Kulsiri Chandrangsue (Universidad de Michigan) quienes revisaron los capítulos 3, 7 y 10. Al profesor Paramasivam (Universidad Nacional de Singapur) quien con entusiasmo apoyó la idea de un libro sobre ferrocemento. A los comentarios constructivos de revisores anónimos de parte de varias casas editoriales. Para todos ellos, estoy muy agradecido por sus comentarios, sugerencias y valiosas críticas.

Estoy en deuda con muchos de mis estudiantes quienes tomaron el curso sobre Compuestos Cementicios con Fibras Reforzadas en la Universidad de Michigan y quienes han influenciado, de una manera directa o indirecta, para el enfoque seguido en éste libro.

Agradecimientos a Kathie Helm quien ayudó a elaborar la mayor parte de las tablas de éste libro y el Apéndice C: Referencias. A Helayne Beavers quien proporcionó una corrección profesional del primer borrador. A Ingrid Naaman, quien corrigió el último borrador con ojos de águila, merece mis continuos afectos. Igualmente, a Stephanie Terroir quien diseñó la cubierta del libro.

Especialmente importantes son Patrick, Charles e Ingrid Naaman, y Stephanie Terroir quienes proporcionaron, de una forma muy propia y especial, el soporte y estímulo para escribir éste libro. Les deseo que recuerden que nada de lo que creemos es válido si no forjamos todo lo que se puede y debe ser hecho.