



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE FERROCEMENTO EXISTENTES EN
GUATEMALA, DESPUÉS DE 25 AÑOS DE CONDICIONES DE SERVICIO**

Perlita del Rosario Cotí Yxcaraguá

Asesorado por el Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz

Guatemala, mayo de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE FERROCEMENTO EXISTENTES EN
GUATEMALA, DESPUÉS DE 25 AÑOS DE CONDICIONES DE SERVICIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

PERLITA DEL ROSARIO COTÍ YXCARAGUÁ

ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, MAYO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

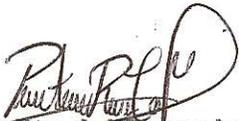
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Alejandro Castañón López
EXAMINADOR	Ing. Wuilliam Ricardo Yon Chavarría
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel López Juárez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE FERROCEMENTO EXISTENTES EN GUATEMALA, DESPUÉS DE 25 AÑOS DE CONDICIONES DE SERVICIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 04 de mayo de 2012.


Perla del Rosario Cotí Yxcaraguá



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala, 13 de marzo de 2014

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

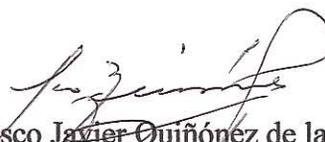
Señor Director:

Tengo el agrado de informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado **“Evaluación de estructuras de ferrocemento existentes en Guatemala después de 25 años de condiciones de servicio”**, realizado por la estudiante universitaria **Perlita del Rosario Cotí Yxcaraguá**, quien contó con la asesoría del suscrito.

Considero que el trabajo realizado por la estudiante **Cotí Yxcaraguá** cumple con los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Agradezco a usted la atención que se sirva prestar a la presente.

Atentamente,


Francisco Javier Quiñón de la Cruz
Ingeniero Civil Col. No. 1941
Asesor



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA

Cc archivo

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala, 19 de marzo de 2014

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

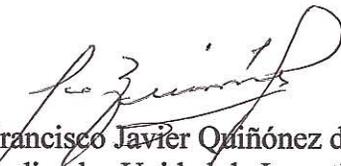
Señor Director:

Tengo el agrado de informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado “Evaluación de estructuras de ferrocemento existentes en Guatemala después de 25 años de condiciones de servicio”, realizado por la estudiante universitaria Perlita del Rosario Cotí Yxcaraguá, quien contó con la asesoría del suscrito.

Considero que el trabajo realizado por la estudiante Cotí Yxcaraguá cumple con los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Agradezco a usted la atención que se sirva prestar a la presente.

Atentamente,


Ing. Francisco Javier Quiñón de la Cruz
Coordinador Unidad de Investigación
Escuela de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA

Cc archivo

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San
Carlos de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Unidad de Lingüística

Guatemala, 2 de mayo de 2014
Ling.20/14

Ingeniero Hugo Leonel Montenegro
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería, USAC

Señor director:

Por este medio hago de su conocimiento que la Unidad de Lingüística hace una modificación al título del trabajo de graduación del estudiante **Perlita del Rosario Cotí Yxcaraguá**, con número de carné: **2006-30157** el cual fue aprobado de acuerdo al protocolo como: **EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE FERROCEMENTO EXISTENTES EN GUATEMALA DESPUÉS DE 25 AÑOS DE CONDICIONES DE SERVICIO.**

La Unidad modifica el título del trabajo en virtud de que el mismo no está bien redactado y propone la siguiente forma: : **EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE FERROCEMENTO EXISTENTES EN GUATEMALA, DESPUÉS DE 25 AÑOS DE CONDICIONES DE SERVICIO.**

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'R. González Domínguez'.

Licenciada Rosa Amelia González Domínguez
Coordinadora de la Unidad de Lingüística



Cc. Archivo



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor y Coordinador de la Unidad de Investigación, Ing. Francisco Javier Quiñón de la Cruz, al trabajo de graduación de la estudiante Perlita del Rosario Cotí Yxcaraguá, titulado EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE FERROCEMENTO EXISTENTES EN GUATEMALA, DESPUÉS DE 25 AÑOS DE CONDICIONES DE SERVICIO, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, mayo 2014.

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE FERROCEMENTO EXISTENTES EN GUATEMALA, DESPUÉS DE 25 AÑOS DE CONDICIONES DE SERVICIO**, presentado por la estudiante universitaria: **Perlita del Rosario Cotí Yxcaraguá** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, mayo de 2014



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser mi padre, creador, formador, la fuente de mi inspiración.
Mis padres	Lic. José Luis Cotí, por ser para mí ejemplo de perseverancia y humildad. Licda. Rosa Yxcaraguá de Cotí, ejemplo de mujer, nobleza, esfuerzo y valentía.
Mis hermanas	Rocío y Dulce María Cotí, por ser mis mejores amigas, por contar siempre con su apoyo e incentivo.
Mis tías	Por sus incentivos, especialmente a Marina Cotí (q.e.p.d.), por su apoyo durante el inicio de la carrera, y por sus consejos. A Miriam Yxcaraguá, por su apoyo.
Mis líderes	Por ser instrumentos de Dios en mi vida, por brindarme ese apoyo espiritual y emocional en mi carrera.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios para la formación académica profesional.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por brindarme entendimiento, su amor y fidelidad incondicional en todo tiempo.
Mis padres	Por su amor, apoyo, comprensión incondicional y por ser partícipes directos de este logro.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme los conocimientos y herramientas fundamentales para la formación profesional.
Ing. Francisco Javier Quiñónez	Por asesorarme, motivarme y apoyarme durante el proceso de la realización de mi trabajo de grado.
Señor Fabio Sánchez	Por su colaboración en la investigación del trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	1
1.1. Depósitos de ferrocemento.....	1
1.1.1. Propiedades mecánicas más importantes que gobiernan el diseño de ferrocemento en tensión	2
1.1.1.1. Resistencia a la primera grieta	2
1.1.1.2. Mecanismo de agrietamiento.....	5
1.1.1.3. Ancho de agrietamiento.....	5
1.1.1.4. Efecto del esqueleto como refuerzo	6
1.1.2. Especificaciones preliminares de los materiales.....	7
1.1.2.1. Acero de refuerzo	7
1.1.2.2. Cemento	8
1.1.2.3. Agregados	9
1.1.2.4. Agua	9
1.1.2.5. Mortero	9
1.1.3. Análisis del depósito	10
1.1.4. Método constructivo de un depósito de ferrocemento y algunas especificaciones.	14

	1.1.4.1.	Proporciones de la mezcla del mortero	14
	1.1.4.2.	Armado del refuerzo	15
	1.1.4.3.	Colocación del mortero	16
	1.1.4.4.	Revestimiento.....	17
	1.1.4.5.	Recubrimiento	17
	1.1.4.6.	Curado.....	17
	1.1.5.	Depósitos de ferrocemento evaluados	20
1.2.		Cubiertas de ferrocemento	25
	1.2.1.	Generalidades de las cubiertas	25
	1.2.2.	Análisis de cubiertas.	27
	1.2.3.	Proceso constructivo de cubiertas con formaleta	29
	1.2.3.1.	Preparación de formaleta	29
	1.2.3.2.	Protector de la formaleta	29
	1.2.3.3.	Colocado de la malla hexagonal	29
	1.2.3.4.	Colocación de varillas de refuerzo	30
	1.2.3.5.	Preparación del mortero a utilizar.....	30
	1.2.3.6.	Fundición de la cubierta	31
	1.2.3.7.	Curado y desencofrado	32
	1.2.4.	Ubicación y características de las cubiertas evaluadas	36
1.3.		Cerramientos de ferrocemento.....	39
	1.3.1.	Estudio de paneles de ferrocemento ante cargas sísmicas.	40
	1.3.2.	Especificaciones requeridas de los materiales.....	43
	1.3.2.1.	Arena.....	44
	1.3.2.2.	Cemento.....	44
	1.3.2.3.	Agua.....	44
	1.3.2.4.	Acero de refuerzo.....	44

1.3.2.5.	Mortero	45
1.3.3.	Proceso de fabricación de paneles de ferrocemento.....	45
1.3.4.	Ubicación y características de los cerramientos evaluados.	49
2.	EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE FERROCEMENTO.	53
2.1.	Aspectos considerados en la evaluación de estructuras de ferrocemento.	53
2.1.1.	Aspecto estructural	53
2.1.1.1.	Desarrollo de grietas y filtraciones.....	54
2.1.1.2.	Corrosión	55
2.1.1.3.	Durabilidad.....	55
2.1.1.4.	Deterioro	56
2.1.2.	Condiciones de servicio	57
2.1.3.	Aspecto económico	58
2.1.3.1.	Depósito de ferrocemento	58
2.1.3.2.	Cubiertas de ferrocemento	60
3.	RESULTADO DE LA EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS.	63
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	69
	CONCLUSIONES	73
	RECOMENDACIONES	75
	BIBLIOGRAFÍA.....	77
	APÉNDICES	81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Una sección de longitud L.....	11
2.	Fuerzas que actúan en la pared del plano diametral	12
3.	Fuerza P resultante de las fuerzas de cada sección que pasa a través del centroide del área considerada.....	12
4.	Armado del refuerzo, formando la jaula con varillas.....	18
5.	Colocación de malla hexagonal	18
6.	Colocación del mortero	19
7.	Curado del depósito	19
8.	Diagrama de momentos de un elemento bajo las mismas condiciones de carga	27
9.	Presencia de reacciones horizontales en el arco	28
10.	Formaleta completa de una cubierta.....	33
11.	Estructura de la formaleta constituida por las cerchas y los elementos que las enlazan.....	34
12.	Detalle del colocado del refuerzo, anclaje en solera superior (si se funde directamente en el muro)	34
13.	Detalle del colocado del refuerzo en la zona crítica	35
14.	Fundición de la cubierta, gancho usado para evitar agujeros	35
15.	Cubierta fundida.....	36
16.	Formaleta de paneles de ferrocemento.....	46
17.	Sección transversal de formaleta.	46
18.	Panel de ferrocemento.	47
19.	Sección transversal del refuerzo de nervio.	47

20.	Armado de paneles.....	48
21.	Porcentaje de número de depósitos de ferrocemento que presentan daño	63
22.	Porcentaje de número de cubiertas de ferrocemento que presentan daño	65
23.	Porcentaje de número de estructuras de paneles de ferrocemento presentan daño.....	67

TABLAS

I.	Descripción del depósito No.1	20
II.	Descripción del depósito No.2	21
III.	Descripción del depósito No.3	21
IV.	Descripción del depósito No.4	22
V.	Descripción del depósito No.5	22
VI.	Descripción del depósito No.6	23
VII.	Descripción del cilindro No.7	23
VIII.	Descripción del cilindro No.8	24
IX.	Descripción del depósito No.9	24
X.	Descripción de la cubierta No.1	37
XI.	Descripción de la cubierta No.2	37
XII.	Descripción de la cubierta No.3	38
XIII.	Descripción de cubierta No.4	38
XIV.	Descripción del techo a base de paneles	49
XV.	Características de muro de paneles	50
XVI.	Características técnicas de paneles en la construcción de muros de aulas	50
XVII.	Características técnicas de paneles en muros de verja.....	51
XVIII.	Costos de 1986.....	59

XIX.	Costos de 2013	59
XX.	Costos de 1982	60
XXI.	Costos de 2013	61

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
γ_r	Densidad de malla de refuerzo
dw	Diámetro del alambre de la malla
d	Diámetro del cilindro
Fc	Esfuerzo a la primera grieta
S	Esfuerzo en paredes de cilindro
h	Espesor del elemento de ferrocemento
Vr	Fracción de volumen
F	Fuerza resultante
kg	Kilogramo
kn	Kilo Newton
m^2	Metro cuadrado
m^3	Metro cúbico
m	Metro lineal
mm	Milímetro
L	Longitud
Wr	Peso unitario de la malla de refuerzo
%	Porcentaje
p	Presión interna del fluido
plg	Pulgada
Fmu	Resistencia última del mortero a tensión
Sr	Superficie específica
Sl	Superficie específica en dirección de la carga

GLOSARIO

Compresión	Resultado que existe al someter a un cuerpo a la acción de dos fuerzas opuestas para que disminuya su volumen.
Durabilidad	Mide la resistencia a la desintegración.
Esfuerzo	Cierta fuerza que se aplica en una determinada superficie.
Mortero	Mezcla de conglomerantes inorgánicos, áridos y agua, y posibles aditivos que sirven para pegar elementos de construcción.
Resistencia	Capacidad de oponerse a la rotura.
Tensión	Fuerza interna aplicada, que actúa por unidad de superficie o área sobre la que se aplica.

RESUMEN

Hace más de 25 años, el Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, desarrolló estudios, ensayos y aplicaciones de técnicas de ferrocemento, los cuales fueron empleados por ingenieros de la Facultad como trabajo de grado y por personal del Centro de Investigaciones; el desarrollo de este sistema constructivo de ferrocemento permitió la elaboración de depósitos de agua, cubiertas y paneles. Con el transcurrir del tiempo, se desconocía el estado y la utilidad de estas, por tal motivo se llevó a cabo una evaluación visual para poder dar un diagnóstico.

Primero fue necesario realizar una investigación bibliográfica, donde se dieron a conocer aspectos importantes, tales como: el diseño, método constructivo, requisitos de materiales y de la estructura, para saber la constitución de cada estructura de ferrocemento antes de ser evaluada visualmente.

Para la realización de la inspección visual se realizó un formato de daños y deterioros en estructuras; también se llevó a cabo una entrevista dirigida a usuarios y dueños de los diferentes elementos de ferrocemento, siendo un complemento para conocer las condiciones de servicio que han prestado y su funcionalidad a lo largo de su tiempo de vida.

OBJETIVOS

General

Evaluar visualmente el estado y las condiciones actuales de 18 estructuras de ferrocemento, después de 25 años de servicio, ubicadas en diferentes puntos del departamento de Guatemala.

Específicos

1. Investigar la ubicación de las estructuras y contactar a los usuarios de estas para llevar a cabo la entrevista como parte de la evaluación, al inicio de la investigación.
2. Realizar un formato como guía de la evaluación visual de daños y deterioros que puede presentar la estructura con años de antigüedad.
3. Evaluar las condiciones y el funcionamiento de 9 depósitos de agua.
4. Evaluar las condiciones y el funcionamiento de 5 cubiertas usadas en edificación.
5. Evaluar las condiciones y el funcionamiento de 4 estructuras hechas con paneles.

INTRODUCCIÓN

Es importante realizar evaluaciones a estructuras construidas hace varios años, para poder conocer el estado en que se encuentran, el porqué y el tipo de servicio que prestan. Regularmente se observan muchas estructuras de concreto reforzado, material de construcción tradicional en Guatemala y diversos países; el ferrocemento, aun siendo un material contemporáneo del concreto, muy estudiado y aplicado en varios países del mundo, no es muy conocido en Guatemala.

Hace más de 25 años, el Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la USAC, inició estudios, ensayos y aplicaciones de ferrocemento, posteriormente, ingenieros de la Facultad continúan investigaciones con respecto a materiales usados en ferrocemento. Llevando este sistema a la práctica se construyeron depósitos, cubiertas y paneles, algunas de ellas existen en algunos municipios del departamento de Guatemala. Ha transcurrido más de 25 años de la construcción de esas estructuras, no se les dio seguimiento y se desconocía el estado en que se encontraban, a partir de allí surge el interés del ingeniero Francisco Javier Quiñónez, uno de los pioneros del ferrocemento en Guatemala, en realizar una evaluación de las estructuras.

Para la evaluación no se llevaron a cabo ensayos destructivos, sino fue una inspección visual en campo, con la finalidad de conocer el comportamiento que han tenido las estructuras ante diferentes condiciones ambientales y de servicio en el transcurrir de los años, y poder optar por el ferrocemento como sistema constructivo tradicional en Guatemala.

La evaluación se desarrolló en dos partes, la primera fue una investigación bibliográfica, tomando en cuenta el diseño, método constructivo, materiales y requisitos del ferrocemento. La segunda parte fue una investigación de campo, tomando aspectos físicos como tipos de daños, deterioros visibles en las estructuras, también la funcionalidad y se recolectó información por medio de entrevistas, donde los usuarios detallaron si las estructuras reciben mantenimiento y de qué tipo, así también, conocer daños por agentes externos como la movilidad o traslado.

En la evaluación visual de los depósitos, cubiertas y paneles de ferrocemento se identificaron daños y deterioros causados por factores ambientales, tiempo transcurrido y condiciones de servicio, que afectaron directamente la pintura de la estructura y en pocas ocasiones la capa superficial del mortero, sin embargo, el ferrocemento a pesar de ser de espesor delgado, es un material duradero, resistente y funcional tanto como el concreto reforzado, lo cual se ratificó en este trabajo.

1. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

El ferrocemento es un material no convencional, muy parecido al concreto reforzado, con la diferencia que el acero usado es malla galvanizada, por lo regular hexagonal (malla de gallinero), el mortero está hecho solamente a base de arena, cemento y agua. Las estructuras de ferrocemento son generalmente de espesor delgado, por lo tanto tienden a ser livianas, lo que hace posible que sean trasladadas de un lugar a otro con relativa facilidad, aunque no es muy recomendable en estructuras de gran tamaño, ya que pueden tener alguna lesión. El ferrocemento tiene otras cualidades a su favor, como la economía en comparación con el concreto reforzado, resistencia, durabilidad y fácil construcción.

En Guatemala existen estructuras de ferrocemento como: depósitos, cubiertas y paneles. Para el presente trabajo se realizó una evaluación visual de algunas de estas estructuras, construidas hace aproximadamente 25 años, ubicadas en el departamento de Guatemala. Para dar a conocer el estado de estas fue necesario realizar la evaluación visual así como una investigación bibliográfica previa.

1.1. Depósitos de ferrocemento

Los depósitos de almacenamiento de agua se han convertido en una necesidad para la sociedad guatemalteca, por lo general son construidos con materiales convencionales: concreto reforzado y plástico; los de concreto suelen ser de un precio elevado. Los depósitos de ferrocemento son una buena opción por los beneficios que este material proporciona. La forma geométrica

de los depósitos de ferrocemento es cilíndrica, debido a que obtiene una mayor resistencia a la presión del agua.

1.1.1. Propiedades mecánicas más importantes que gobiernan el diseño de ferrocemento en tensión

El ferrocemento es un material que trabaja en tensión, es muy semejante al concreto reforzado, presenta casi los mismos puntos de análisis en la fluencia del acero, en este caso la fluencia de la malla; a continuación se mostrarán puntos importantes a tomar en cuenta para el análisis del diseño del ferrocemento.

1.1.1.1. Resistencia a la primera grieta

Uno de los puntos importantes a considerar en el diseño de un depósito de ferrocemento son las grietas, es normal que en él aparezcan fisuras al igual que en el concreto reforzado, siendo las del ferrocemento mucho más pequeñas. Cuando este es sometido a esfuerzos de tensión mayores a la resistencia del mortero ocurren grietas que se observan a simple vista, es cuando cobra importancia la primera grieta, esta se usa como parámetro de diseño, lo cual no significa que se evite este fenómeno, ya que es normal, solo se debe controlar.

“Se ha observado que los esfuerzos a la primera grieta están en función de la superficie específica del refuerzo y mediante estudios experimentales se ha planteado una fórmula para determinar los esfuerzos a la primera grieta:

$$F_c = 140 S_l + F_{mu}$$

Donde:

F_c = esfuerzo a la primera grieta

S_l = superficie específica en dirección de la carga

F_{mu} = resistencia última del mortero a tensión

Tanques cilíndricos de ferrocemento fueron ensayados a diferentes condiciones de carga, encontrándose que el agrietamiento ocurría en las paredes cuando el esfuerzo de tensión excedía al esfuerzo de tensión a la primera grieta, estableciendo 300 a 800 psi, lo que significa que F_c (esfuerzo a la primera grieta) debe limitarse en este intervalo".¹

Los cilindros de ferrocemento trabajan a esfuerzos de compresión que son soportados por el mortero, y esfuerzos de tensión que son soportados por el acero de refuerzo y la malla.

La superficie específica y la fracción de volumen de refuerzo juegan un papel muy importante en el comportamiento al agrietamiento del ferrocemento. El investigador Daniel Bedoya, en la Memoria de Investigación del Programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Medellín, Colombia, la define de la siguiente manera:

La fracción de volumen de refuerzo V_r es la relación del volumen de refuerzo y el volumen del compuesto de ferrocemento.

$$V_r = \frac{V_{refuerzo}}{V_{compuesto}}$$

¹ QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ, Francisco Javier. *Cuaderno de Investigación No. 7-89*. Dirección General de Investigación, Universidad de San Carlos de Guatemala, p.48.

Para determinar la fracción de volumen de cualquier tipo de malla, se debe utilizar la siguiente expresión:

$$V_r = \frac{NW_r}{h\gamma_r}$$

Donde:

N = número de capas de malla

W_r = peso unitario de la malla de refuerzo en kg/m^2 o kn/m^2

h = espesor del elemento de ferrocemento

γ_r = densidad de la malla de refuerzo en kg/m^3 o kn/m^3

La superficie específica del refuerzo es la relación que existe entre el área total lateral del refuerzo adherido al compuesto y el volumen del compuesto de ferrocemento.

$$S_r = \frac{S_{\text{area total adherida al refuerzo}}}{V_{\text{compuesto}}}$$

Para determinar la superficie específica de cualquier tipo de malla, se debe utilizar la siguiente expresión:

$$S_r = \frac{4 V_r}{d_w}$$

Donde:

S_r = superficie específica

d_w = diámetro del alambre de la malla

V_r = fracción de volumen total de refuerzo

1.1.1.2. Mecanismo de agrietamiento

“Los estados de agrietamiento de un material compuesto como el ferrocemento, puede ser ilustrado por el mecanismo clásico de agrietamiento del concreto reforzado, basado en la suposición que los esfuerzos de tensión en el mortero rodeando el refuerzo, están uniformemente distribuidos sobre una sección transversal efectiva y, además, existe una distribución de esfuerzos de adherencia a lo largo del refuerzo”.²

En el mecanismo clásico de agrietamiento del concreto reforzado, el esfuerzo de tensión en el acero es transmitido parcialmente al concreto por medio de adherencia, asimismo, ocurre en el ferrocemento, cuando el esfuerzo de tensión en el mortero es mayor a la resistencia a tensión del material es cuando suceden las primeras grietas, en las secciones más críticas de la estructura, en estas secciones el esfuerzo en el acero es mayor en comparación con las secciones donde no ocurren grietas, este mecanismo de agrietamiento está sujeto a una variabilidad. El ancho y la separación de grietas pueden variar en cuanto al método de fabricación y el curado que se le dé a las estructuras.

1.1.1.3. Ancho de agrietamiento

“Investigaciones han demostrado que el ancho de las grietas en estructuras de concreto reforzado pueden reducirse, incrementando la adherencia entre el refuerzo y el concreto, aumentando la distribución del refuerzo y reduciendo el recubrimiento; estas condiciones son favorables en el

² QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ, Francisco Javier. *Cuaderno de Investigación No. 7-89*. Dirección General de Investigación, Universidad de San Carlos de Guatemala, p.49.

ferrocemento, ya que el ancho de la grieta es casi cero adyacente al refuerzo y aumentan hacia la superficie, por lo que su distancia debe ser reducida.”³

Considerando que el ferrocemento es un material de espesor delgado, se debe recordar que al reducir el recubrimiento se debe tomar en cuenta los valores límite, para evitar que cause algún daño de corrosión en el refuerzo, por reducir el ancho de grietas que quizá esté en un rango permisible. “Se ha recomendado que el valor máximo del ancho de las grietas deba estar debajo de 0,1-0,2 milímetros para estructuras que sean usadas para el almacenamiento y 0,05 milímetros para medios corrosivos y estructuras retenedoras de líquidos”.⁴

1.1.1.4. Efecto del esqueleto como refuerzo

“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 centímetros, 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 centímetros, de centro a centro, actuando así como un elemento de refuerzo de la malla de alambre”.⁵

³ QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ, Francisco Javier. *Cuaderno de Investigación No. 7-89*. Dirección General de Investigación, Universidad de San Carlos de Guatemala, p.49-50.

⁴ Ibid.

⁵ Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. [En línea] *Fundamentos para la aplicación de ferrocemento*. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cosude/iv.pdf>. Consulta: abril 2013.

Las barras de acero tienen como función principal, ser un respaldo para la malla de alambre, colocándolas a más de 15 centímetros hasta 30 centímetros de espacio entre cada una; estas pueden ser de 3 a 10 milímetros de diámetro, si se requiere, estas también pueden usarse para resistir esfuerzos juntamente con la malla, colocándolas de 5 a 15 centímetros de espacio entre cada una, como lo menciona Fuentes Yenma en *Evaluación del sistema de edificaciones residenciales de ferrocemento (SERF), ante cargas de viento y sismo*, ciudad de la Habana Cuba, 2010.

1.1.2. Especificaciones preliminares de los materiales

Cada material usado en el ferrocemento debe ser de buena calidad y previamente seleccionado, cumpliendo con los requisitos respectivos, para que cada uno de estos pueda desempeñarse y puedan brindar en conjunto una buena trabajabilidad al ferrocemento.

1.1.2.1. Acero de refuerzo

El acero en el ferrocemento se presenta de dos formas: las barras de acero para formar el esqueleto, debe cumplir con la Norma ASTM A-615, estas deben ser libres de óxido suelto, escamas u otras sustancias perjudiciales. La malla en el ferrocemento funciona como una formaleta, da forma a la estructura, soporta el mortero en estado fresco, y absorbe los esfuerzos de tensión, que el mortero por sí solo no sería capaz de resistir en estado sólido por su baja resistencia a la tensión; debe cumplir con la Norma ASTM A-185.

Existen diferentes tipos de mallas usadas en ferrocemento, malla cuadrada electrosoldada, cuadrada tejida, cuadrada soldada, de metal

expandido y hexagonal (malla de gallinero), esta última es la más usada en la mayoría de los países, por ser la más económica y fácil de manejar.

1.1.2.2. Cemento

Actualmente, el cemento se puede pedir con ciertas características especiales, según se requiera para el tipo de construcción. El más usado para el ferrocemento es el cemento Portland, con el propósito de obtener estructuras con resistencia a la compresión, dureza, impermeabilidad, resistencia al ataque químico, consistencia uniforme, libre de materia extraña y terrones; debe cumplir con las especificaciones de la Norma ASTM C-150 para cemento Portland, mejor si se usa la actualizada. Existe una clasificación para este tipo de cemento, como se indica a continuación:

“Los tipos de cemento Portland adecuados para la construcción de ferrocemento son el cemento tipo I y II. El tipo I se usa para estructuras de ferrocemento generales, donde no se requieren de propiedades especiales; el 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 Portland tipo III es de endurecimiento rápido adquiere su resistencia más rápidamente y se elige cuando se requiere de una resistencia inicial muy alta. El cemento Portland tipo IV, posee bajo calor de hidratación por lo tanto puede ser utilizado para la construcción de estructuras de ferrocemento.

El cemento Portland 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”.⁶

1.1.2.3. Agregados

En el ferrocemento se usa el agregado fino, la arena debe ser de grano duro y libre de arcilla, limo, alcaliza, debe estar libre de cantidades perjudiciales de impurezas orgánicas, y debe cumplir con las características requeridas de la Norma ASTM C-33.

1.1.2.4. Agua

El agua utilizada para la mezcla de mortero y curado del ferrocemento, debe ser libre de impurezas, libre de basura, no usar agua de mar, ya que puede alterar la composición mecánica y química del mortero, tanto fresco como endurecido; por ello debe usarse agua potable.

1.1.2.5. Mortero

Es una mezcla de cemento, arena, agua y algunas veces aditivos para mejorar las propiedades de la mezcla; este debe ser trabajable, tener buena consistencia. Para que el ferrocemento ya terminado no pierda sus propiedades, se debe considerar la mayor resistencia a la compresión, una buena impermeabilidad, resistencia a agentes químicos y factores externos.

⁶Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. [En línea] *Conceptos generales sobre ferrocemento, de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira*. <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/palmira/materiales/pdf/cap9/amplia/cartilla%20ferrocemento.pdf>. Consulta: mayo 2013.

1.1.3. Análisis del depósito

“Para el análisis se utilizaron los parámetros usados en los cilindros de paredes delgadas.

Especificaciones:

- Se supone que las tensiones que se generan en la pared están uniformemente distribuidas en el espesor de la pared.
- La relación del espesor de la pared al radio de curvatura no debe exceder de 0,10 pulgadas, además, no debe haber discontinuidad en la estructura.
- Por ser el espesor pequeño comparado con su radio de curvatura, no se originan momentos flectores de mayor importancia en las paredes de escaso espesor, y son los esfuerzos de tensión los que gobiernan el diseño”.⁷

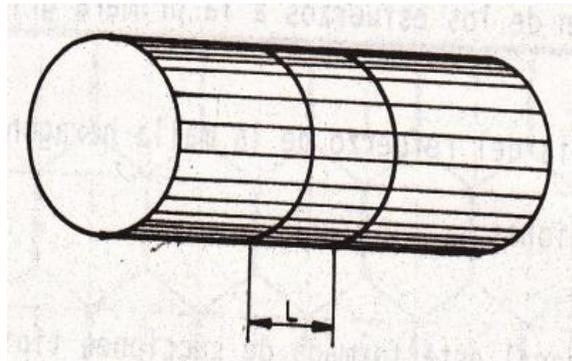
El espesor mínimo para un depósito de ferrocemento es de 1 pulgada y aumenta conforme el tamaño.

A continuación se ilustran las fuerzas que actúan en un cilindro de pared delgada que representan las fuerzas de tensión en las paredes de un depósito de ferrocemento debido a la presión del agua.

⁷ SIERRA JIMÉNEZ, Hugo Berty. *Análisis de construcción y evaluación de un tanque de ferrocemento de almacenamiento de agua*. Guatemala 1986, p.22-23.

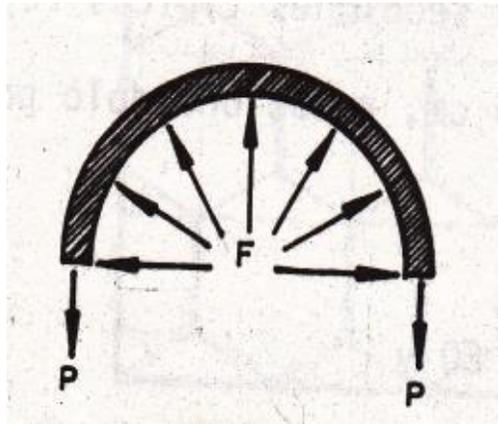
En la figura 1, una sección de longitud L del cilindro, se corta por la mitad en el eje longitudinal, mostrando un plano diametral en la figura 2, donde fuerzas que actúan van a la derecha y otras a la izquierda y las componentes horizontales se equilibran una con otra. Mientras las componentes verticales actúan hacia arriba, debe existir una fuerza P que actúa en las paredes del cilindro, en sentido contrario para mantener el equilibrio.

Figura 1. **Una sección de longitud L**



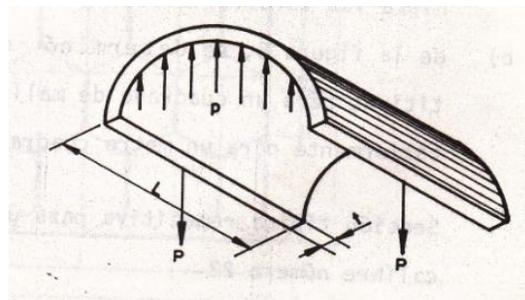
Fuente: SIERRA JIMÉNEZ, Hugo Berty. *Análisis de construcción y evaluación de un tanque de Ferrocemento de almacenamiento de agua*, p.25.

Figura 2. **Fuerzas que actúan en la pared del plano diametral**



Fuente: SIERRA JIMÉNEZ, Hugo Berty. *Análisis de construcción y evaluación de un tanque de Ferrocemento de almacenamiento de agua*, p.25.

Figura 3. **Fuerza P resultante de las fuerzas de cada sección que pasa a través del centroide del área considerada**



Fuente: SIERRA JIMÉNEZ, Hugo Berty, *Análisis de construcción y evaluación de un tanque de Ferrocemento de almacenamiento de agua*, p.25.

“La fuerza resultante se puede obtener multiplicando la presión por la proyección horizontal de la superficie sobre la que actúa.

$$F = p * d * L \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde:

F= Fuerza resultante de la presión

p= Presión interna del fluido

d= Diámetro del cilindro

L= Longitud de la sección considerada

Sumatoria de fuerzas verticales = 0

$$2P = F \quad [\text{Ec. 2}]$$

Sustituyendo en Ec. 1 se tiene:

$$P = p * d * L / 2 \quad [\text{Ec. 3}]$$

En la figura 3, la fuerza P es la resultante de las fuerzas de cada sección y pasa a través del centroide del área considerada. Por consiguiente, el esfuerzo en las paredes del cilindro puede determinarse por $S=P/A$. En este caso el área sobre la que actúa la fuerza, es la longitud L por el espesor de la pared del cilindro t, $A= t*L$

$$S = P / (t * L) \quad [\text{Ec. 4}]$$

Combinando las ecuaciones 3 y 4, se llega a determinar los esfuerzos tangenciales

$$S = p * d / (2t) \quad [\text{Ec. 5}]^8$$

1.1.4. Método constructivo de un depósito de ferrocemento y algunas especificaciones

El método de construcción del ferrocemento no es tan complicado, no requiere de mano de obra calificada, ya que con solo seguir las recomendaciones dadas, una orientación y supervisión de alguien con experiencia se puede construir. La siguiente información es una síntesis del método constructivo proporcionado por el ingeniero Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, en el cuaderno de investigación titulado: *Construcción de depósitos para almacenamiento de granos en comunidades rurales y publicación especial del Centro de Investigaciones de Ingeniería, depósitos de ferrocemento.*

1.1.4.1. Proporciones de la mezcla del mortero

- Las proporciones recomendadas para la mezcla son 1:2:0.45 (cemento, arena y agua), por peso. La relación puede ser incrementada a 1:2.5 cuando se use lanzado, para compensar las pérdidas de partículas en el rebote.

⁸ SIERRA JIMÉNEZ, Hugo Berty. *Análisis de construcción y evaluación de un tanque de ferrocemento de almacenamiento de agua*, Guatemala, p.25.

- La cantidad de los materiales se debe tener en peso y no por volumen, por la reducción que aparece debido a la humedad cuando se hace por volumen.
- El asentamiento del mortero debe ser lo más bajo posible, que permita una buena compactación, no exceder de 2 pulgadas.
- El control del módulo de finura de la arena y la relación agua-cemento debe ser mantenida cuidadosamente para proveer propiedades uniformes en toda la estructura.
- La arena y el cemento se mezclan juntos y después se añade la cantidad de agua necesaria para formar una pasta uniforme y el tiempo de mezclado deberá ser aproximadamente 3 minutos.

1.1.4.2. Armado del refuerzo

La fabricación de la jaula de refuerzo consiste en cortar las varillas de acero a los tamaños requeridos, dependiendo de la capacidad del depósito se hacen anillos para formar el refuerzo a lo largo del diámetro; estos anillos se unen con las varillas que son colocadas desde la parte superior del depósito hasta la parte inferior. Para la base del depósito se pueden hacer algunos cortes para adecuar la malla de gallinero cuando se coloque.

Las capas de malla de alambre deben ser cuidadosamente atadas a las varillas del armado, de manera que proporcione un espesor uniforme; evitar el movimiento durante la colocación del mortero y cualquier discontinuidad del refuerzo. Debe proporcionar un traslape adecuado, el cual debe seguir las siguientes recomendaciones:

- Por lo menos 75 milímetros de traslape.
- La localización de las aberturas en la estructura, debe hacerse preferiblemente en los lugares donde los esfuerzos y presiones sean mínimas.
- Debe colocarse un refuerzo adecuado alrededor de las aberturas tomando en cuenta la concentración de esfuerzos. Estas aberturas deben ser cortadas preferiblemente antes de la fundición.

1.1.4.3. Colocación del mortero

La colocación del mortero se considera la fase más crítica en la técnica de la construcción de ferrocemento. Antes de iniciar la colocación del mortero debe asegurarse que todas las barras de acero y la malla estén en la posición correcta. El mortero debe ser compactado durante su colocación para evitar vacíos alrededor del refuerzo; vibradores pueden ser usados para proporcionar una mejor penetración y distribución del mortero. También deberá ser colocado en un tiempo razonable después del contacto del cemento con el agua, evitando la segregación de la mezcla durante su manejo y colocación.

Se describe una técnica manual la cual es lenta pero efectiva, colocando una mano de cada lado de la malla y presionando la mezcla entre ellas, dejando la malla ahogada entre el mortero siendo esta la primera capa, 24 horas después se aplica una segunda capa de mortero con las mismas proporciones a la anterior, para sellar agujeros que hayan quedado en la primera capa y obtener una textura agradable, en esta segunda fase el mortero es lanzado con una cuchara y emparejado con una plancha de madera, teniendo el cuidado de

no dejar ningún refuerzo sin recubrimiento, especialmente en la parte interior que pudiera producir oxidación durante el almacenaje de agua.

1.1.4.4. Revestimiento

El depósito podrá ser pintado en ambas caras, cualquier revestimiento debe ser estable y durable. Cuando sea posible, es recomendable aplicar una pintura epóxica, sin embargo, cuando por economía no sea posible, la aplicación de una lechada de cemento proporciona buenos resultados.

1.1.4.5. Recubrimiento

“En mallas: el recubrimiento mínimo que debe tener es de 3 a 6 milímetros, dependiendo del medio ambiente:

- Ambiente protegido: 3 mm
- Ambiente Expuesto: 4 mm
- Ambiente agresivo: 5 mm
- Ambiente muy agresivo: 6 mm”.⁹

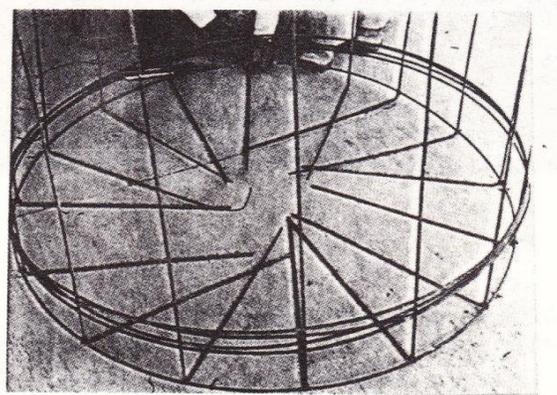
1.1.4.6. Curado

El depósito, así como otras estructuras de concreto deben ser curadas una vez que el mortero ha llegado a su fraguado inicial (lo cual ocurre unas 4 horas después de la aplicación del mortero). El método de curado es con agua rociada y debe mantenerse la humedad por lo menos 7 días; o bien colocar papel y mojarlo durante 7 días para después llenarlo de agua para completar el

⁹ CEPIS/OPS. *Guía de construcción para estructuras de ferrocemento*, 2003, p.23.

curado. A continuación, en las figuras 4 a 7, se muestra el método constructivo de un depósito de ferrocemento:

Figura 4. **Armado del refuerzo, formando la jaula con varillas**



Fuente: QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ, Francisco Javier. *Cuaderno de investigación No. 7. Construcción de depósitos para almacenamiento de granos en comunidades rurales*, p.51.

Figura 5. **Colocación de malla hexagonal**



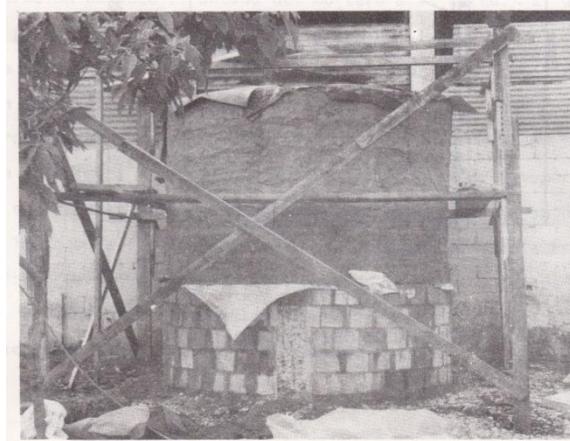
Fuente: SIERRA JIMÉNEZ, Hugo Berty. *Análisis de construcción y evaluación de un tanque de ferrocemento de almacenamiento de agua*, p.34.

Figura 6. Colocación del mortero



Fuente: QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ, Francisco Javier, *Cuaderno de investigación No. 7. Construcción de depósitos para almacenamiento de granos en comunidades rurales*, p.56.

Figura 7. Curado del depósito



Fuente: SIERRA JIMÉNEZ, Hugo Berty. *Análisis de construcción y evaluación de un tanque de ferrocemento de almacenamiento de agua*, p.34.

1.1.5. Depósitos de ferrocemento evaluados

Los depósitos se seleccionaron conociendo la ubicación actual de cada uno de estos, en el departamento de Guatemala. Algunos se construyeron como punto de estudio del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la USAC, otros son de trabajo de graduación y algunos realizados por trabajadores del Centro de Investigaciones de Ingeniería con el fin de poner en práctica el conocimiento y poder satisfacer necesidades propias.

A continuación, en las tablas I a la IX, se da a conocer la ubicación de los depósitos, sus dimensiones, edad y uso actual.

Tabla I. Descripción del depósito No.1

	Dimensiones de la estructura			Edad aproximada (años)
	Diámetro (m)	Altura (m)	Espesor (m)	
	1,20	1,30	0,025	20
	Funcionamiento actual: almacenamiento de agua para uso doméstico.			

Fuente: 13 avenida 5-37 zona 1, Villa Nueva, Guatemala.

Tabla II. Descripción del depósito No.2

	Dimensiones de la estructura			Edad aproximada (años)
	Diámetro (m)	Altura (m)	Espesor (m)	
	1,10	0,80	0,025	27
Funcionamiento actual: almacenamiento de agua para servicio sanitario.				

Fuente: 13 avenida 5-37 zona 1, Villa Nueva, Guatemala.

Tabla III. Descripción del depósito No.3

	Dimensiones de la estructura			Edad aproximada (años)
	Diámetro (m)	Altura (m)	Espesor (m)	
	0,90	0,90	0,025	27
Funcionamiento actual: almacenamiento de agua para servicio sanitario.				

Fuente: 13 avenida 5-37 zona 1, Villa Nueva, Guatemala.

Tabla IV. Descripción del depósito No.4

	<p>Funcionamiento actual: este depósito de agua fue destruido totalmente, ya que se tuvo nuevo diseño de introducción de agua potable, la tapadera es la única parte que está intacta, aún se aprecia la malla y algunos compuestos del mortero, en un pésimo estado por la exposición a factores ambientales en la que se encuentra.</p> <p>La vida útil de la estructura, fue aproximadamente de 23 años.</p>
---	--

Fuente: Escuela Pública Federal de Palencia, Guatemala.

Tabla V. Descripción del depósito No.5

	Dimensiones de la estructura			Edad aproximada (años)
	Diámetro (m)	Altura (m)	Espesor (m)	
	1	1,5	0,03	23
<p>Funcionamiento actual: almacenamiento de agua para servicio domiciliar.</p>				

Fuente: cantón Pueblo Nuevo Palencia, Guatemala.

Tabla VI. Descripción del depósito No.6

	Dimensiones de la estructura			Edad aproximada (años)
	Diámetro (m)	Altura (m)	Espesor (m)	
	0,80	1,20	0,03	La tapadera tiene 25 años, el depósito 10 años.
	Funcionamiento actual: almacenamiento de agua para servicio domiciliar.			

Fuente: cantón Pueblo Nuevo Palencia, Guatemala.

Tabla VII. Descripción del cilindro No.7

	Dimensiones de la estructura			Edad aproximada (años)
	Diámetro (m)	Altura (m)	Espesor (m)	
	0,25	0,35	0,03	25
	Funcionamiento actual: maceta.			

Fuente: cantón Pueblo Nuevo Palencia, Guatemala.

Tabla VIII. Descripción del cilindro No.8

	Dimensiones de la estructura			Edad aproximada (años)
	Diámetro (m)	Altura (m)	Espesor (m)	
	0,73	0,70	0,025	25
	Funcionamiento actual: maceta.			

Fuente: 5ta calle 18 avenida 4-98, colonia Vista Valle Oriente, San Cristóbal, Guatemala.

Tabla IX. Descripción del depósito No.9

	Dimensiones de la estructura			Edad aproximada (años)
	Diámetro (m)	Altura (m)	Espesor (m)	
	2,58	1,77	0,04	25
	Funcionamiento actual: almacenamiento de agua.			

Fuente: Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

1.2. Cubiertas de ferrocemento

Son sistemas prefabricados, usados generalmente en viviendas de un solo nivel y de luces no muy grandes debido a su espesor delgado. Este sistema es económico, ya que al comparar una losa tradicional de concreto reforzado y una cubierta de ferrocemento, se obtiene un ahorro con este último sistema.

Las cubiertas que existen en Guatemala se han estudiado y construido a partir de los años setenta y ochenta. En 1978, el Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII) de la Universidad de San Carlos de Guatemala, puso en marcha un programa de investigación sobre ferrocemento, el cual abarcaba la construcción de techos parabólicos con contraflecha, según indicó el ingeniero Francisco Javier Quiñónez de la Cruz en una publicación del CII, llamada: *Prefabricación de ferrocemento liviano para cubiertas de vivienda*.

1.2.1. Generalidades de las cubiertas

El ferrocemento es un material que se adapta a muchas formas; para elementos estructurales se debe tener en cuenta la forma geométrica más conveniente, donde se aprovechen las propiedades físicas y mecánicas del material. Para el estudio de cubiertas se eligió la forma de una parábola, cuya geometría favorece los valores de resistencia del mortero a la compresión.

En los años de 1981 y 1983 se hicieron investigaciones como parte de trabajos de grado de la Facultad de Ingeniería de la USAC. El primero lo realizó el ingeniero Francisco Javier Quiñónez, en el que se hace una comparación entre dos tipos de agregados usados en cubiertas de ferrocemento para vivienda económica. Se llevó a cabo construyendo y ensayando cubiertas de

concreto liviano de pómez y otras de mortero de arena de río, donde estas últimas dieron mejores resultados en resistencia que las otras.

El segundo trabajo, realizado por el ingeniero Guillermo Iván Hernández Hill, muestra un estudio de la variación de la resistencia en flexión de las cubiertas provocado por la cantidad, tipo de malla, agregados de arena de pómez y arena de río, por medio de ensayos de probetas en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería.

Se comparó la resistencia en flexión al colocar una sola capa de refuerzo y colocar más de una, se comprobó que incrementa la resistencia en flexión cuando se coloca más de una capa de refuerzo usando malla hexagonal en ambos sentidos, al igual que la malla cuadrada soldada, mostrando considerablemente mejores resultados la malla cuadrada soldada en cuanto a resistencia, pero a la vez se observó que en la malla cuadrada puede existir una falla brusca, debido a la rigidez que proporcionan las soldaduras en las uniones, esto conlleva a tener un margen de seguridad en cuanto al esfuerzo último, usando entonces el esfuerzo de trabajo.

Por el contrario, se observó que la malla hexagonal usándola en ambos sentidos, dio como resultado esfuerzos menores a la anterior, pero permisibles, sin sufrir una falla brusca, además se mencionó que la malla hexagonal es mucho más económica que la otra.

También se ensayaron probetas para determinar la resistencia en flexión y compresión de los morteros con diferentes tipos de agregados, notando que la arena de río tiene mayor resistencia que la de arena pómez, en este trabajo de investigación, también se observó que el mortero con agregado más pequeño, tendrán una mayor resistencia a la compresión y flexión no muy significativa,

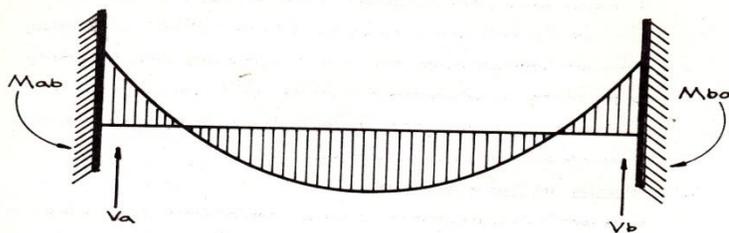
donde el ingeniero Hernández Hill concluye: “ya que el incremento de esfuerzo no compensa el aumento del costo del agregado, es por eso que el agregado conveniente es el que pasa por la malla de $\frac{1}{4}$ ”.¹⁰

1.2.2. Análisis de cubiertas.

Se tomó el análisis de bóvedas o cubiertas del trabajo de grado del ingeniero Francisco Javier Quiñónez, quien también indica como forma geométrica la parábola, ya que esta tiende a absorber cargas de compresión, flexión y cortante que actúan en menor magnitud, considerando también el economizarse el uso de los materiales.

A continuación se grafica el funcionamiento del arco, a partir de un diagrama de momentos bajo carga uniformemente distribuida.

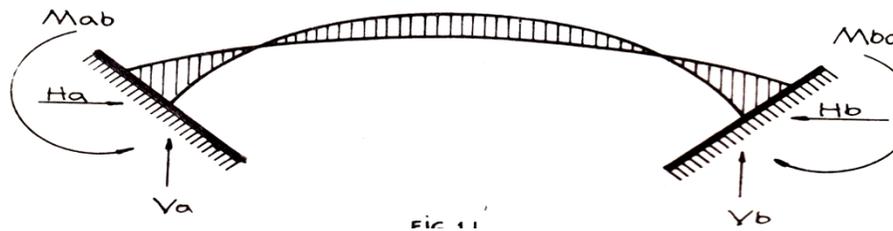
Figura 8. Diagrama de momentos de un elemento bajo las mismas condiciones de carga



Fuente: QUIÑÓNEZ, Francisco Javier. *Bóvedas de ferrocemento de concreto liviano de pómez y de mortero de arena de río para uso en vivienda económica*, p.16.

¹⁰ HERNÁNDEZ HILL, Guillermo Iván. *Variación de la resistencia en flexión de elementos de ferrocemento, debido a tipo y cantidad de refuerzo y agregados y su aplicación en bóvedas para cubiertas de vivienda económica*, p.20.

Figura 9. **Presencia de reacciones horizontales en el arco**



Fuente: QUIÑÓNEZ, Francisco Javier. *Bóvedas de ferrocemento de concreto liviano de pómez y de mortero de arena de río para uso en vivienda económica*, p.16.

“Es un hecho generalmente reconocido que cuando el arco tiene una relación entre la flecha y la cuerda, superior a 0,2, no se desarrolla flexión y entonces todos los esfuerzos que actúan son de compresión, en este caso la teoría indica que no existe valor de momento a lo largo de todo el elemento”.¹¹ Siguiendo esta teoría, el ingeniero Quiñónez coloca una luz en el sentido de la curvatura de 3 metros tomando como referencia lo común en una vivienda económica, dando como resultado una contra flecha de 0,60 metros para no generar flexión en el elemento; observando un rechazo por parte de los usuarios, elige una contra flecha de 0,15 metros, obteniendo resultados satisfactorios en cuanto a la resistencia a flexión y compresión.

La dimensión de la contra flecha de la cubierta debe tener un comportamiento bajo carga satisfactorio, también proporcionando en la estructura funcionalidad y una buena aceptación, para que la estructura satisfaga completamente las necesidades de los usuarios.

¹¹ QUIÑÓNEZ, Francisco Javier. *Bóvedas de ferrocemento de concreto liviano de pómez y de mortero de arena de río para uso en vivienda económica*, p.17.

1.2.3. Proceso constructivo de cubiertas con formaleta

Es importante tomar en cuenta desde el área de trabajo, verificar que el área de construcción esté bien nivelada, hasta el proceso de fundición, curado y desencofrado de las bóvedas, para que el proceso constructivo se pueda desarrollar de la mejor forma. A continuación se describe el proceso de una cubierta de 5 metros de largo por 3 metros de ancho (en el sentido de la curva), con base en el trabajo de grado del ingeniero Hernández Hill.

1.2.3.1. Preparación de formaleta

Por lo regular, la formaleta se puede hacer de madera contrachapeada u otro material con mayor duración, que cubra el área deseada que se pueda quitar de una forma fácil y rápida. También se debe tomar en cuenta la posición de parales y tendales a la hora de la colocación.

1.2.3.2. Protector de la formaleta

Si se desea se puede colocar polietileno como protector en la formaleta, pero este se debe tensar muy bien para evitar un mal acabado del elemento o bien echarle aceite quemado, esto facilita el desencofrado.

1.2.3.3. Colocado de la malla hexagonal

De la colocación de la malla depende en gran parte obtener resultados positivos. Por lo regular se usa malla hexagonal de $\frac{1}{2}$ pulgada, en donde el entorchado favorece la resistencia en flexión, cuando se corta la malla debe ser en sentido corto de la bóveda, dejando aproximadamente 0,15 metros de malla en cada lado, que sirve para anclarlo en la solera del muro al que se va adherir.

Se debe tensar correctamente la malla, para que el esfuerzo sea uniforme sobre toda la cubierta, evitando ondulaciones. Se pueden usar tensores hechos con pedazos de varillas de $\frac{1}{4}$ pulgadas.

1.2.3.4. Colocación de varillas de refuerzo

Generalmente se usan varillas de $\frac{1}{4}$ pulgadas, se deben colocar a cada 30 centímetros, en ambos sentidos de la bóveda (a lo largo y ancho), en el sentido largo las varillas deben tener una longitud mayor a 5 metros y en el otro sentido debe ser mayor a 3 metros, para un buen anclaje. Después de la colocación de las varillas es recomendable colocar encima otra capa de malla en las zonas más críticas, cerca de los muros, en donde se pueden producir fallas prematuras. Esta capa de malla también se debe tensar.

1.2.3.5. Preparación del mortero a utilizar

“Para la preparación del mortero, la cantidad de materiales debe preferiblemente estar determinada por peso, debe responder a los resultados obtenidos de los ensayos para una resistencia determinada de diseño, debiendo estar entre los siguientes rangos:

- Relación en peso de agregado/cemento: 1,5 a 2; es decir, debe emplearse una proporción en peso equivalente a una parte de cemento por 1,5 a dos partes de arena.
- Relación en peso de agua/cemento (a/c): 0,35 a 0,5; puede optarse por:
 - 0,4 si la arena es bien graduada y se vibra
 - 0,5 si se coloca a mano y la arena es angulosa

La relación agua-cemento debe mantenerse lo más baja posible, para darle al material calidad y trabajabilidad adecuada, por lo cual se recomienda que la relación a/c $\leq 0,45$ ".¹²

La mezcla de mortero se debe preparar con las proporciones correctas, logrando una mezcla consistente y trabajable, ya que así se evita que se disuelva la mezcla y se reduzca su resistencia. También es conveniente llevar un control de calidad de los materiales a usar y de la mezcla, se pueden llevar a cabo ensayos de laboratorio que verifiquen sus características. Las relaciones de mezcla anteriormente dadas son específicamente para morteros de ferrocemento.

Los valores de mezcla dados por el ingeniero Hernández Hill no cambian mucho con los anteriores, él menciona, que si se usa mortero de arena de pómez la proporción recomendada es 1:2 en peso de cemento/arena, y para mortero de arena de río es de 1:3 en peso de cemento/ arena.

1.2.3.6. Fundición de la cubierta

En la fundición de las cubiertas se debe tener especial cuidado al aplicar el mortero, este debe penetrar muy bien, para evitar que queden orificios o vacíos que puedan afectar el comportamiento estructural de la cubierta. Estos elementos estructurales para el estudio fueron fundidos de una vez sobre unos muros que fueron construidos para poder ensayar las cubiertas.

“Esta operación puede llevarse a cabo en dos etapas para mayor facilidad, la primera consiste en colocar el mortero o concreto de recubrimiento, es decir,

¹² OPS/CEPIS. *Guía de construcción para estructuras de ferrocemento*. 2003, p.17.

la mezcla que se coloca debajo del refuerzo, esta es la etapa que más tiempo requiere. La segunda bachada es la que sirve para dar el espesor final al elemento. Se considera también parte de la fundición, el acabado final que se da externamente para favorecer la impermeabilización por medio de un cernido de arena de río fina con cemento, cal y agua. Esta etapa debe realizarse tan inmediatamente como sea posible después de colocadas las bachadas anteriores".¹³

1.2.3.7. Curado y desencofrado

El curado es algo que no debe faltar en toda estructura de concreto reforzado y de ferrocemento, ya que es importante que el cemento se hidrate de una forma adecuada durante su proceso de endurecimiento, evitando fisuras por contracción del mortero, a la vez proporciona una mayor resistencia e impermeabilidad que a las estructuras que no se les aplica este proceso o se aplica de una forma incorrecta.

“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”.¹⁴ Para el caso de cubiertas, el ingeniero Hernández Hill realizó una especie de pileta sobre la cubierta con el objeto de llenarla de agua, permaneciendo así por siete días.

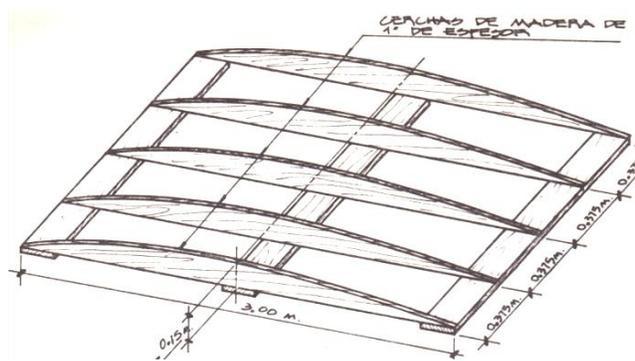
¹³ HERNÁNDEZ HILL, Guillermo Iván. *Variación de la resistencia en flexión de elementos de ferrocemento, debido a tipo y cantidad de refuerzo y agregados y su aplicación en bóvedas para cubiertas de vivienda económica*, p.29-31.

¹⁴ CEPIS/OPS. *Fundamentos para la aplicación de ferrocemento*, p.20.

Cuando se realiza la fundición del techo se debe prever el desencofrado, como la madera tiende a expandirse con el contacto del mortero, por ello se aconseja colocar cuñas entre módulos o bien usar formaleta metálica.

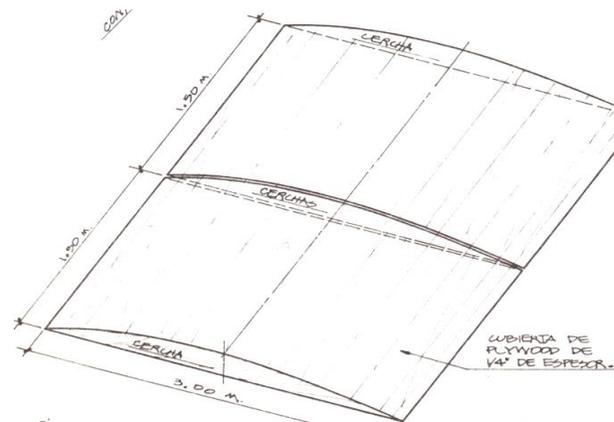
A continuación, en las figuras 10 a 15, se ilustra el proceso constructivo de una cubierta:

Figura 10. **Formaleta completa de una cubierta**



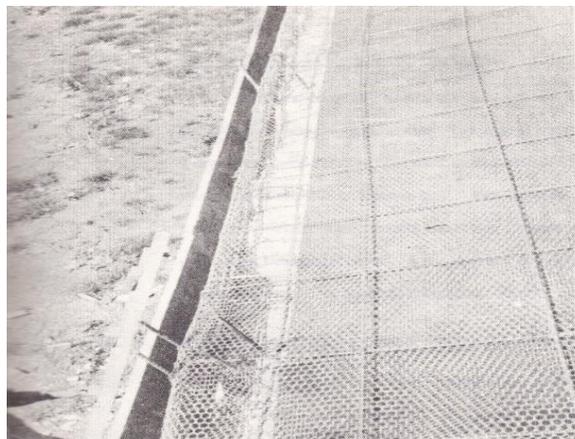
Fuente: QUIÑÓNEZ, Francisco Javier. *Bóvedas de ferrocemento de concreto liviano de pómez y de mortero de arena de río para uso en vivienda económica*, p.30.

Figura 11. **Estructura de la formaleta constituida por las cerchas y los elementos que las enlazan**



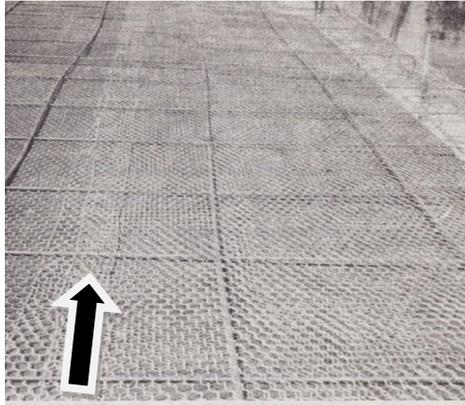
Fuente: QUIÑÓNEZ, Francisco Javier. *Bóvedas de ferrocemento de concreto liviano de pómez y de mortero de arena de río para uso en vivienda económica*, p.30.

Figura 12. **Detalle del colocado del refuerzo, anclaje en solera superior (si se funde directamente en el muro)**



Fuente: HERNÁNDEZ HILL, Guillermo Iván. *Variación de la resistencia en flexión de elementos de ferrocemento, debido a tipo, cantidad de refuerzo y agregados y su aplicación en bóvedas para cubiertas de vivienda económica*, p.27.

Figura 13. **Detalle del colocado del refuerzo en la zona crítica**



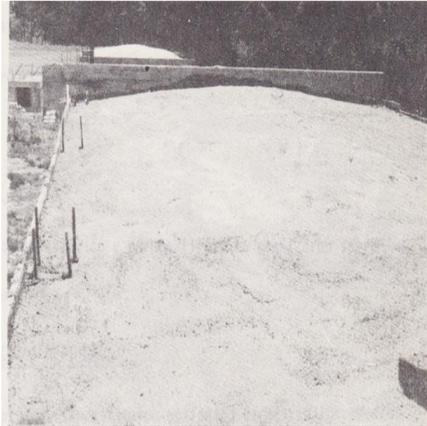
Fuente: HERNÁNDEZ HILL, Guillermo Iván. *Variación de la resistencia en flexión de elementos de ferrocemento, debido a tipo y cantidad de refuerzo y agregados y su aplicación en bóvedas para cubiertas de vivienda económica*, p.27.

Figura 14. **Fundición de la cubierta, gancho usado para evitar agujeros**



Fuente: HERNÁNDEZ HILL, Guillermo Iván. *Variación de la resistencia en flexión de elementos de ferrocemento, debido a tipo y cantidad de refuerzo y agregados y su aplicación en bóvedas para cubiertas de vivienda económica*, p.30.

Figura 15. **Cubierta fundida**



Fuente: HERNÁNDEZ HILL, Guillermo Iván. *Variación de la resistencia en flexión de elementos de ferrocemento, debido a tipo y cantidad de refuerzo y agregados y su aplicación en bóvedas para cubiertas de vivienda económica*, p.30.

1.2.4. Ubicación y características de las cubiertas evaluadas

Las cubiertas de ferrocemento evaluadas se eligieron porque se conocía la ubicación de cada una de ellas, localizadas en el departamento de Guatemala, algunas cubiertas fueron construidas como trabajo de tesis, otras por personas trabajadoras del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, para suplir una necesidad, poniendo en práctica este sistema. A continuación, en las tablas X a la XIII, se dan a conocer la ubicación de las cubiertas, sus dimensiones y las edades de cada una de ellas.

Tabla X. Descripción de la cubierta No.1

	Dimensiones de la estructura		
	Largo (m)	Ancho (m)	Edad (años)
	4	3,50	27
	Funcionamiento actual: techo de un cuarto. Se encuentra entre cielo falso y lámina.		

Fuente: 45 avenida, 3-12 zona 2, colonia el Tesoro Banvi, Mixco, Guatemala.

Tabla XI. Descripción de la cubierta No.2

	Dimensiones de la estructura		
	Largo (m)	Ancho (m)	Edad (años)
	3	3,50	27
	Funcionamiento actual: techo de un cuarto. Se encuentra entre cielo falso y lámina.		

Fuente: 45 avenida, 3-12 zona 2, colonia el Tesoro Banvi, Mixco, Guatemala.

Tabla XII. Descripción de la cubierta No.3

	Dimensiones de la estructura		
	Largo (m)	Ancho (m)	Edad (años)
	5	3	30
	Funcionamiento actual: techo de una bodega.		

Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Tabla XIII. Descripción de cubierta No.4

	Dimensiones de la estructura		
	Largo (m)	Ancho (m)	Edad (años)
	5	3	30
	Funcionamiento actual: techo de una bodega.		

Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Existe una cubierta de ferrocemento en uno de los ambientes de una casa ubicada en la colonia San Rafael zona 18 de la ciudad de Guatemala, cuando se construyó la casa era de un nivel, actualmente tiene tres niveles, la estructura forma parte del entrepiso de nivel 1 y 2. Se pudo observar el repello, pintura y el buen estado del techo. En esta ocasión no se pudo entrevistar al propietario, ya que la alquila para una tienda y no se contó con mayor detalle de información al respecto.

1.3. Cerramientos de ferrocemento

Los paneles son usados en sistemas prefabricados para levantar muros, siendo un medio económico en comparación con un sistema tradicional. En Guatemala, el estudio de los paneles de ferrocemento nació a partir de investigaciones realizadas por el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, determinándose características a partir de algunos ensayos realizados: esfuerzo máximo a la compresión, carga lateral de un muro formado por paneles, ensayo de paneles en flexión, ensayo de paneles a impacto.

Los resultados se publicaron en un documento titulado: *Ferrocemento, sistema prefabricado para vivienda*, publicado en 1 983, autor ingeniero Javier Quiñónez. Ese mismo año se llevó a cabo el diseño y construcción de la escuela rural Los Achiotés en el departamento de Santa Rosa, usando un sistema de paneles de ferrocemento como muros, desarrollado en el Centro de Investigaciones de Ingeniería. Este sistema de muros con paneles también lo evaluó el ingeniero Edgar Valenzuela en su trabajo *Consideraciones y evaluación de un sistema constructivo de edificios educativos con base a paneles de ferrocemento*, en 1 987.

En otros países como Cuba, República Dominicana, Nicaragua, Colombia, México se ha estudiado el sistema de paneles de ferrocemento, usándolos para construir muros, techos, entrepisos de casas.

1.3.1. Estudio de paneles de ferrocemento ante cargas sísmicas

“Países como México, India, Tailandia, Cuba, Estados Unidos, Brasil y Colombia, son pioneros en el uso del ferrocemento para construir viviendas de bajo costo. En 1 970 se construyeron casas de ferrocemento en México, en 1983, en la India, en 1 984, en Bangkok”.¹⁵

Dentro de los países mencionados anteriormente se da a conocer un sistema que surge en Cuba en 1 986, bajo la dirección del Dr. ingeniero Hugo Wainshtok, llamado SERF, Sistema de Edificios Residenciales de Ferrocemento, este es un sistema constructivo con paneles de ferrocemento. En 1 986 se construye la primera casa con este sistema en la ciudad de Santiago de Cuba, al mando del Ing. Roberto Valdez, la cual, actualmente se encuentra en buenas condiciones, esto según una publicación en un estudio de caso de las Naciones Unidas Going Green: Manual de Prácticas Sustentables de Vivienda.

“Este sistema se caracteriza por tener una pequeña cantidad de elementos prefabricados, que pueden ser combinados con buen grado de flexibilidad. Dichos elementos son muy ligeros, están diseñados para poder ser

¹⁵ MELÉNDEZ, Patricia. *Estudio de la factibilidad del uso del ferrocemento para la construcción de viviendas de bajo costo, sismo resistentes y de rápida ejecución en la República Dominicana*, 2005, p.16.

movidos y transportados manualmente, si fuera necesario y brindan considerables ventajas técnicas y económicas, como: bajo consumo de materiales, facilidad constructiva, bajo peso, rapidez en el montaje, simplicidad en sus características técnicas. Los elementos que conforman el sistema son: paneles de pared, paneles de entresijos, paneles de cubiertas, vigas zapata y de cerramiento”.¹⁶

La referencia anterior, también aparece en Memorias del X Simposio Internacional del Ferrocemento y Compuestos Delgados de Cemento Reforzado, 2 012.

El ahorro de tiempo de construcción, materiales y, por ende de dinero al construir con ferrocemento, hace del sistema SERF, una tecnología que va a la vanguardia, actualmente ha surgido como una solución ante los fenómenos de la naturaleza.

Considerando el comportamiento del ferrocemento ante cargas de sismo, “resultados de estudios realizados para determinar el comportamiento sísmico del ferrocemento muestran una buena resistencia de cargas laterales cíclicas reversibles, que decrece en la medida en que aparecen grietas en las paredes.”¹⁷

“Ensayos realizados a escala natural de paneles de ferrocemento han evidenciado una marcada tendencia a la degradación de la rigidez de los paneles desde el inicio de las pruebas. El comportamiento predominante de las

¹⁶ FUENTES, Yenma. *Evaluación del sistema de edificaciones residenciales de ferrocemento (SERF) ante cargas de viento y sismo*, p.42-44.

¹⁷ Ibid.

viviendas construidas con el SERF sometidas al estudio en flexión, demostró que las zonas más afectadas al final de las pruebas eran las conexiones paneles-cimientos, conexiones entre paneles y paneles-cubierta. Hay que señalar que las construcciones con elementos prefabricados de ferrocemento han demostrado un desempeño sísmico aceptable, cuando los mismos están debidamente conectados entre sí.”¹⁸

“La solución sismo resistente a nivel de entrepiso se alcanzó con una viga hormigonada *in situ*, lo que garantiza la unión panel de pared–viga de cerramiento-losa de entrepiso al darle continuidad al refuerzo entre ellos.

Este estudio proviene de observaciones cualitativas de campo y de programas experimentales restringidos a interpretaciones teóricas para describir el comportamiento real de las mismas”.¹⁹

Entonces, según lo escrito por Fuentes, los paneles de ferrocemento sí resisten cargas de sismo. Hay un detalle que se debe considerar en el sistema al aplicarlo en la construcción de una vivienda, los paneles deben unirse a las respectivas vigas para ser fundidas, como un sistema monolítico. Otro detalle a tener en cuenta en el comportamiento de una estructura, es una buena ejecución de la misma, para lo cual es importante la supervisión del proceso constructivo, desde el inicio hasta el curado final de la obra, sin olvidar la calidad y el tipo de materiales a usar de acuerdo a las características del proyecto.

¹⁸ FUENTES, Yenma. *Evaluación del sistema de edificaciones residenciales de ferrocemento (SERF) ante cargas de viento y sismo*, p.45.

¹⁹ Ibid.

Actualmente, los paneles de ferrocemento del sistema SERF han tenido una gran aceptación en varios países, según el reportaje de ONU-HABITAT, desde 1 990 el sistema SERF se ha estado usando en Nicaragua, República Dominicana, El Salvador, y en el 2 010 en Haití después del terremoto. Esto también fue publicado en la revista de abril de la página de EcoSur. Así también, existen investigaciones realizadas en estos últimos años acerca de sistemas de viviendas sociales que han desarrollando extranjeros, estas fueron presentadas en el X Simposio Internacional del Ferrocemento, que se llevó a cabo en 2 012, en la Habana Cuba y que, por lo regular se lleva a cabo cada cuatro años en diferentes países.

1.3.2. Especificaciones requeridas de los materiales

Un aspecto importante a tomar en cuenta en la construcción de una estructura y su funcionalidad, es trabajar con materiales adecuados, de calidad, con cantidades requeridas, pero de qué forma se sabe esto. Una de ellas es el conocimiento que se obtiene de las experiencias de trabajo de campo con estructuras similares, otra forma es por ensayos normados de los materiales, otro medio, son los ensayos de especímenes y/o elementos estructurales con lo cual se conoce sus características mecánicas. También es necesario tomar en cuenta las especificaciones dadas por las Normas ASTM, de cada material; cada panel debe estar debidamente construido, para que el sistema con paneles que se desee desarrollar sea funcional en conjunto.

A continuación se hace una breve descripción de los materiales usados en paneles de ferrocemento y sus características requeridas, tomando como referencia lo descrito por el ingeniero Edgar Fernando Valenzuela Villa Nueva, en la tesis *Consideraciones y evaluaciones de un sistema constructivo de edificios educativos con base a paneles de ferrocemento*, en 1 987.

1.3.2.1. Arena

Según la Norma ASTM C-33 del 2 003, dice que el agregado fino debe estar libre de cantidades perjudiciales de impurezas orgánicas, y debe cumplir con las características requeridas de dicha norma, entre estas, debe ser arena de grano duro y libre de arcilla, limo y alcaliza.

1.3.2.2. Cemento

El más usado para el ferrocemento es el cemento Portland, con el propósito de obtener estructuras con resistencia a la compresión, dureza, impermeabilidad, resistencia al ataque químico, consistencia uniforme, libre de materia extraña y terrones; debe cumplir con las especificaciones de la Norma ASTM C-150 del 2 003 para cemento Portland, mejor si se usa la última actualización con respecto a las normas.

1.3.2.3. Agua

El agua utilizada para la mezcla de mortero y curado del ferrocemento, debe ser libre de impurezas, libre de basura, no usar agua de mar, ya que puede alterar la composición mecánica y química del mortero, tanto fresco como endurecido; por ello debe usarse agua potable.

1.3.2.4. Acero de refuerzo

El acero usado en el ferrocemento se usa de dos formas, barras de acero para formar el esqueleto, que debe cumplir con la Norma ASTM A-615, puede ser la actualizada, esta debe ser libre de óxido suelto, escamas u otras sustancias perjudiciales y el otro refuerzo es la malla de alambre que es

principalmente la que resiste los esfuerzos a tensión, debe cumplir con la Norma ASTM A-185.

Las barras de acero tienen como función principal ser un respaldo para la malla de alambre, colocándolas a más de 15, hasta 30 centímetros, de espacio entre cada una; estas pueden ser de 3 a 10 milímetros de diámetro, si se requiere, estas también pueden usarse para resistir esfuerzos juntamente con la malla, colocándolas de 5 a 15 centímetros de espacio entre cada una, como lo menciona Fuentes Yenma en *Evaluación del sistema de edificaciones residenciales de ferrocemento (SERF) ante cargas de viento y sismo*, ciudad de la Habana Cuba, 2 010.

La malla de alambre da forma a la estructura y retiene el mortero en su estado fresco, para después absorber los esfuerzos aplicados a la estructura de ferrocemento.

1.3.2.5. Mortero

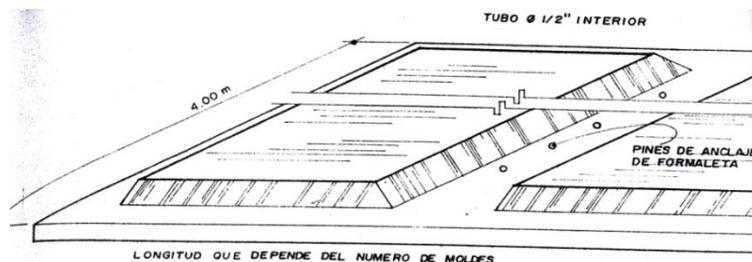
Es una mezcla de cemento, arena, agua y algunas veces aditivos para mejorar las propiedades de la mezcla; este debe ser trabajable, tener buena consistencia. Para que el ferrocemento ya terminado no pierda sus propiedades, se debe considerar la mayor resistencia a la compresión, una buena impermeabilidad, resistencia a agentes químicos y factores externos.

1.3.3. Proceso de fabricación de paneles de ferrocemento

Inicialmente se debe elegir el sitio donde se va a llevar a cabo la construcción de los paneles, el terreno debe ser plano, que cuente con espacio para fabricar y almacenar paneles, también debe tener accesibilidad al servicio

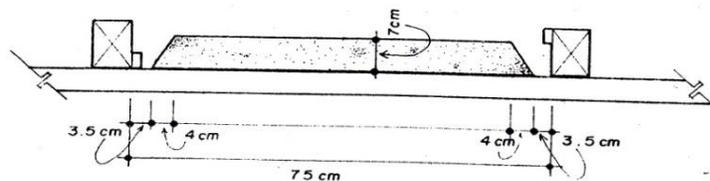
de agua. Mucho mejor si los paneles se construyen en el lugar donde van a funcionar. Los moldes para los paneles pueden hacerse de acero, madera, concreto simple o armado; cerciorarse que estén nivelados y tratados, para obtener superficies lisas; en las figuras 8 y 9 se puede observar la formaleta para paneles. Ya listos los moldes se aplica un desencofrante para evitar que el mortero se adhiera. "No se recomienda usar aceites minerales a fin de evitar el engrase de la armadura y de la superficie del concreto".²⁰

Figura 16. **Formaleta de paneles de ferrocemento**



Fuente: VALENZUELA VILLANUEVA, Edgar Fernando. *Consideraciones y evaluaciones de un sistema constructivo de edificios educativos con base a paneles de ferrocemento*, p.10.

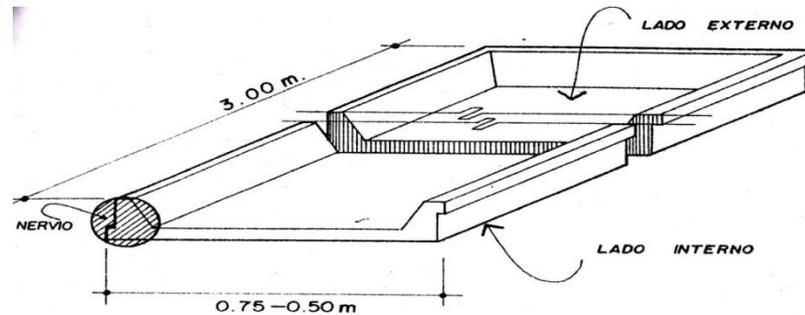
Figura 17. **Sección transversal de formaleta**



Fuente: VALENZUELA VILLANUEVA, Edgar Fernando. *Consideraciones y evaluaciones de un sistema constructivo de edificios educativos con base a paneles de ferrocemento*, p.10.

²⁰ OPS/CEPIS, *Guía de construcción para estructuras de ferrocemento*, p.19.

Figura 18. **Panel de ferrocemento**



Fuente: VALENZUELA VILLANUEVA, Edgar Fernando. *Consideraciones y evaluaciones de un sistema constructivo de edificios educativos con base a paneles de ferrocemento*, p.11.

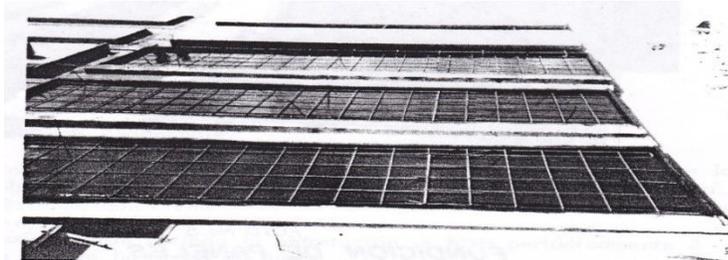
La armadura o barras de acero (sentido vertical y sentido horizontal) deben quedar sujetas con alambre de amarre #16, las capas de malla de alambre se deben sujetar al armazón bien estiradas, para cuando se aplique el mortero, el refuerzo quede firme, evitando malos recubrimientos. Una clase de refuerzo usado en paneles es la electromalla; el ingeniero Francisco Javier Quiñónez (del Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC) y el ingeniero Edgar Fernando Valenzuela, de la Facultad de Ingeniería de la USAC, realizaron sistemas constructivos a base de paneles de ferrocemento, usando electromalla como refuerzo y 4 varillas de acero de $\frac{1}{4}$ pulgadas, dos en cada nervio como se muestra en la figura 19.

Figura 19. **Sección transversal del refuerzo de nervio**



Fuente: VALENZUELA VILLANUEVA, Edgar Fernando. *Consideraciones y evaluaciones de un sistema constructivo de edificios educativos con base a paneles de ferrocemento*, p.11.

Figura 20. **Armado de paneles**



Fuente: VALENZUELA VILLANUEVA, Edgar Fernando. *Consideraciones y evaluaciones de un sistema constructivo de edificios educativos con base a paneles de ferrocemento*, p.12.

La mezcla de mortero para paneles de ferrocemento, debe elaborarse con las proporciones adecuadas con relación al peso, estas son algunas sugerencias que dan algunos autores: relación cemento: arena 1:1,5-2 una de cemento y 1,5 a 2 de arena, respecto a la relación agua-cemento debe estar entre 0,30 a 0,40, esta debe ser baja para que el mortero tenga una buena trabajabilidad y consistencia, esto según el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS, Lima 2 000). Otro criterio de proporción para la mezcla es una relación cemento: arena de 1:1,5-2,5 con una relación agua-cemento entre 0,35 a 0,45, esto según Bedoya (*Ferrocemento: optimización de mezclas y mecanismos de construcción y vaciado*, 1 996).

La aplicación de la mezcla es la fase más crítica en la fabricación de paneles de ferrocemento, se deben evitar que queden espacios vacíos dentro de este, comúnmente llamados ratoneras. La forma de aplicar el mortero puede ser manual y por medio de equipo (vibración).

Otra etapa muy importante en las aplicaciones del ferrocemento es el curado, que constituye una parte fundamental, ya que permite la hidratación del cemento en su fase de endurecimiento, contribuyendo a alcanzar su resistencia

máxima, también reduce la fisuración temprana, mejora la impermeabilidad. Algo que hay que tomar en cuenta es que la fase de curado se debe empezar desde el primer día al tercer día, con mayor intensidad, hasta llegar a los 28 días de una forma regular, no descuidando el proceso. Las formas de realizar este proceso son: por humedad, por membrana impermeable y curado con vapor.

1.3.4. Ubicación y características de los cerramientos evaluados

Los paneles de ferrocemento evaluados se eligieron, ya que se conocía la ubicación de cada una de ellos, algunos de estos fueron estudiados y construidos como trabajo de investigación del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos. A continuación, de la tabla XIV a la XVII, se da a conocer la ubicación de los paneles, sus dimensiones y las edades de cada una de ellos:

Tabla XIV. Descripción del techo a base de paneles

	Dimensiones de la estructura			Edad aprox. (años)
	Largo (techo) (m)	Ancho (panel) (m)	Alto (nervio) (m)	
	2,85	0,75	0,10	25
Funcionamiento actual: techo de lavandería, de una casa.				

Fuente: 2da calle 16-69, sector B1, Pinares de San Cristóbal, Ciudad San Cristóbal Mixco, Guatemala.

Tabla XV. **Características de muro de paneles**

	Nota	Edad aprox. (años)
	Este muro se hizo con paneles de ferrocemento contruidos con el mismo diseño y técnica recomendada por el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, este muro rodea un jardín en la parte de atrás de una casa.	25

Fuente: Ciudad San Cristóbal, Mixco, Guatemala.

Tabla XVI. **Características técnicas de paneles en la construcción de muros de aulas**

	Dimensiones de la estructura			Edad aprox. (años)
	Largo (panel) (m)	Ancho (panel) (m)	Alto (nervio) (m)	
	2,40 y 1,20	0,75	0,10	25
Funcionamiento actual: aulas, que funcionan como bodega de la escuela.				

Fuente: Escuela Urbana Oficial Mixta No.85, ubicada en 9 calle 13 avenida final colonia Lomas del Norte, zona 17, ciudad de Guatemala.

Tabla XVII. Características técnicas de paneles en muros de verja

	Dimensiones de la estructura			Edad aprox. (años)
	Largo (panel) (m)	Ancho (panel) (m)	Alto (nervio) (m)	
	0,70	0,75	0,10	25
Funcionamiento actual: verja de paneles de ferrocemento, entrada de casa particular.				

Fuete: 13 avenida 5-37 zona 1, Villa Nueva, Guatemala.

2. EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE FERROCEMENTO

Toda estructura debe ser evaluada después de un tiempo para poder saber el estado en que esta se encuentra, especialmente si aún está en funcionamiento. Las estructuras que se tomaron como objeto de estudio en la evaluación para el desarrollo de este trabajo de graduación, se eligieron por el conocimiento de su ubicación, contando aproximadamente con 25 años de existencia.

2.1. Aspectos considerados en la evaluación de estructuras de ferrocemento

Una forma de saber el estado en que se encuentra una estructura, es por medio de la observación y el análisis de daños que presenta; para este trabajo no se realizaron ensayos destructivos sino por inspección. A través de los aspectos evaluados en las estructuras se analizó la funcionalidad del ferrocemento como un sistema constructivo.

2.1.1. Aspecto estructural

Para la recopilación de información correspondiente, se utilizaron herramientas de diagnóstico como la observación y la entrevista, en las cuales participaron propietarios, usuarios y el ingeniero asesor; a través de esta se pudo conocer el uso, la eficacia, mantenimiento, funcionamiento y los posibles daños que se suscitaron durante los años de vida de la estructura.

Los aspectos evaluados fueron: desarrollo de grietas y filtraciones, corrosión, durabilidad, deterioro.

2.1.1.1. Desarrollo de grietas y filtraciones

Se denomina fisura a la separación incompleta entre dos o más partes con o sin espacio entre ellas. Este fenómeno no se puede evitar en el concreto reforzado ni en el ferrocemento, pero sí controlarlo, esto contribuye a minimizar el riesgo de corrosión del refuerzo y, a la vez, mejora la apariencia de la estructura.

Es importante conocer si las grietas son profundas o superficiales, esta es una forma, por ejemplo: en un depósito de agua que presenta filtraciones se considera que las grietas son profundas, en caso contrario estas son superficiales. Hay grietas que son causadas por alguna circunstancia ajena a la estructura y otras que se desarrollan debido al comportamiento mecánico del ferrocemento.

“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”.²¹

Considerando que el ferrocemento es un material de espesor delgado, se debe recordar que al reducir el recubrimiento se debe tomar en cuenta los valores límite ya mencionados en el capítulo 1, para evitar que cause algún

²¹ CEPIS/OPS. *Fundamentos para la aplicación de ferrocemento*, p.16.

daño de corrosión en el refuerzo, por reducir el ancho de grietas que quizá esté en un rango permisible.

2.1.1.2. Corrosión

Toda estructura es vulnerable a la corrosión cuando se encuentra expuesta a un ambiente propicio para que esta se desarrolle. El ferrocemento corre mayor riesgo a sufrir corrosión que el concreto reforzado, debido a su corto espesor, también al uso que se le dé, como depósitos de almacenamiento de agua, o estructuras marinas.

Al inspeccionar cada estructura, se identificó un punto clave para determinar si existe corrosión en el refuerzo, las grietas y filtraciones, dependiendo la magnitud de estas, se generó una probabilidad de corrosión interna.

2.1.1.3. 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”.²²

La durabilidad califica qué tanto la estructura ha soportado interna y externamente efectos físicos, químicos y mecánicos, sin tener cambios significativos en sus propiedades. Estos son algunos factores que se deben tomar en cuenta, para evitar afectar la durabilidad: el recubrimiento debe ser un

²² CEPIS/OPS. *Fundamentos para la aplicación de ferrocemento*, p.28.

valor permisible; el refuerzo debe ser de calidad, con el número de capas necesarias; calidad del mortero y tomar en cuenta el ambiente en que se expone el ferrocemento.

2.1.1.4. Deterioro

“Se denomina deterioro a cualquier cambio adverso de los mecanismos normales, de las propiedades físicas o químicas o ambas en la superficie o en el interior del elemento, generalmente a través de la separación de sus componentes”.²³

En el presente trabajo se tomaron indicativos de deterioro, que fueron incluidos en un formato de evaluación de daños (ver apéndice 1), como parte del diagnóstico del estado de la estructura; usados también para la evaluación de estructuras de concreto reforzado. Algunos daños se pueden observar en fotos tomadas en campo (ver apéndice 2).

- Desintegración: deterioro en pequeños fragmentos o partículas por causa de algún deterioro.
- Distorsión: cualquier deformación anormal de su forma original.
- Eflorescencia: depósito de sales, usualmente blancas que se forman en las superficies.

²³ MONZÓN SEVILLA, Manuel. *Situación actual del ferrocemento de acuerdo con el comité 549 de ACI y algunas aplicaciones estudiadas en Guatemala*, p.47.

- Exudación: líquido o material como gel viscoso que brota de los poros, fisuras o aberturas en la superficie.
- Incrustaciones: costra o película generalmente dura que se forma en la superficie de concreto o de la mampostería.
- Picaduras: desarrollo de cavidades relativamente pequeñas en la superficie debido a fenómenos tales como la corrosión o cavitación o desintegración localizada.
- Cráteres: salida explosiva de pequeñas porciones de la superficie de concreto debido a presiones internas en el concreto que permite en la superficie la formación típicamente cónica.
- Escamas: pueden ser cerca de la superficie del concreto o mortero.
- Polvo: desarrollo de material de polvo sobre la superficie dura.
- Corrosión: desintegración o deterioro del concreto o del refuerzo por el fenómeno electroquímico de la corrosión.
- Goteras: humedad causada por las aguas, lluvias bajo la cubierta.

2.1.2. Condiciones de servicio

Las condiciones de servicio de una estructura son fundamentales para evaluar el estado general en que se encuentran, sean condiciones buenas o deficientes, esto depende del mantenimiento que se le dé y daños internos de la estructura, sobre todo la calidad del servicio que presta; por ejemplo, un

depósito de agua de ferrocemento que posea fisuras y otros daños superficiales, al ver el agua de almacenamiento incolora, insabora, inolora, y sin basura, se puede decir que la estructura se encuentra en un buen estado, ya que satisface una necesidad a cabalidad, dando mayor realce a la calidad del servicio y no tanto a los daños superficiales que puede presentar por la edad.

2.1.3. Aspecto económico

El ferrocemento, aparte de tener un método constructivo mucho más fácil y rápido que otros, representa economía de los materiales, reducción del propio peso, no requiere personal calificado, cualidades que lo hacen ser ventajosamente competitivo en relación a los materiales tradicionales. Se realizó una comparación entre los costos del ferrocemento y el concreto reforzado, tomando como ejemplos, el depósito realizado por el ingeniero Hugo Berty en 1986, y una cubierta realizada por el ingeniero Guillermo Hernández en 1982, comparando los precios del 2013.

2.1.3.1. Depósito de ferrocemento

Se toma como referencia el costo del depósito de ferrocemento realizado por el ingeniero Hugo Berty, en su tesis: *Análisis de construcción y evaluación de un tanque de ferrocemento de almacenamiento de agua*, en el año de 1986, tomando en cuenta solamente los materiales de construcción que se muestran en la tabla XVIII.

Tabla XVIII. **Costos de 1986**

Partida	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Materiales			
Cemento	13 sacos	Q. 4,80	Q. 62,40
Arena	0,9 m ³	Q. 8,00	Q. 7,20
Cal	2,6 sacos	Q. 2,20	Q. 5,72
Hierro ¼	1,12 qq	Q. 64,80	Q. 72,58
Malla hexagonal	69,84 yds	Q. 4,50	Q. 314,28
Alambre de amarre	3,0 lbs	Q. 0,90	Q. 2,70
Madera	116,0 pies	Q. 0,35	Q. 40,60
Costo de materiales			Q. 505,48

Fuente: BERTY, Hugo. *Análisis de construcción y evaluación de un tanque de ferrocemento de almacenamiento de agua*, p.36.

Tabla XIX. **Costos de 2013**

Partida	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Materiales			
Cemento	13 sacos	Q. 68,50	Q. 890,50
Arena	0,9 m ³	Q. 78,75	Q. 70,88
Cal	2,6 sacos	Q. 31,50	Q. 81,90
Hierro 1/4	1,12 qq	Q. 282,00	Q. 315,84
Malla hexagonal	69,84 yds	Q. 23,87	Q. 1 667,08
Alambre de amarre	3,0 lbs	Q. 5,50	Q. 16,50
Madera	116,0 pies	Q. 6,90	Q. 800,40
Costo de materiales			Q. 3 843,10

Fuente: elaboración propia.

2.1.3.2. Cubiertas de ferrocemento

Se toman como referencia las cubiertas realizadas por el ingeniero Guillermo Iván Hernández, como trabajo de graduación de 1982, es una cubierta de 15 metros cuadrados de área, en la tabla XX se muestran los costos de la formaleta y los materiales.

Tabla XX. Costos de 1982

Partida	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Formaleta			
Pino Rústico (cerchas)	180 pies	Q. 0,36	Q. 64,80
Madera contrachapeada (pliegos)	6 unidades	Q. 12,00	Q. 72,00
Tachuelón	3 libras	Q. 0,30	Q. 0,90
Clavo de 3"	2 libras	Q. 0,40	Q. 0,80
Clavo de 4"	2 libras	Q. 0,40	Q. 0,80
Hechura de formaleta		Q. 18,00	Q. 18,00
Total			Q. 157,30
Parales de pino rústico	120 pies	Q. 0,36	Q. 43,20
Teniendo en cuenta que si se realiza una formaleta de este tipo, puede ser utilizada en la construcción de siete bóvedas y los parales para utilizar hasta 12 techos, es por ello que los precios se reducen.			
Total Formaleta (Total/7)			Q. 22,47
Total Parales de pino rústico (parales/12)			Q. 3,60
COSTO TOTAL FORMALETA			Q. 26,07
Materiales			
Varillas de acero de 1/4"	0,73 qq	Q. 24,00	Q. 17,52

Continuación de la tabla XX.

Malla hexagonal de 1/2"	35,43 yardas	Q. 1,37	Q. 48,54
Cemento	11 sacos	Q. 4,40	Q. 48,40
Aditivo	0,22 litro	Q. 2,12	Q. 0,47
Subtotal			Q. 114,93
Arena pómez	1 m ³	Q. 7,00	Q. 7,00
Arena de río	1 m ³	Q. 8,00	Q. 8,00
COSTO TOTAL MATERIALES CON ARENA PÓMEZ + FORMALETA			Q. 148,00
COSTO TOTAL MATERIALES CON ARENA DE RÍO + FORMALETA			Q. 149,00
COSTO TOTAL POR M²			Q. 9,93

Fuente: HERNÁNDEZ HILL, Guillermo Iván. *Variación de la resistencia en flexión de elementos de ferrocemento, debido a tipo y cantidad de refuerzo y agregados y su aplicación en bóvedas para cubiertas de vivienda económica*, p.39-40.

Tabla XXI. **Costos de 2013**

Partida	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Formaleta			
Pino Rústico (cerchas)	180 pies	Q. 45,00	Q. 8 100,00
Madera contrachapeada (pliegos)	6 unidades	Q. -	Q. -
Tachuelón	3 libras	Q. 6,00	Q. 18,00
Clavo de 3"	2 libras	Q. 5,30	Q. 10,60
Clavo de 4"	2 libras	Q. 5,30	Q. 10,60
Total			Q. 8 139,20
Parales de pino rústico	120 pies	Q. 6,25	Q. 750,00

Continuación de la tabla XXI.

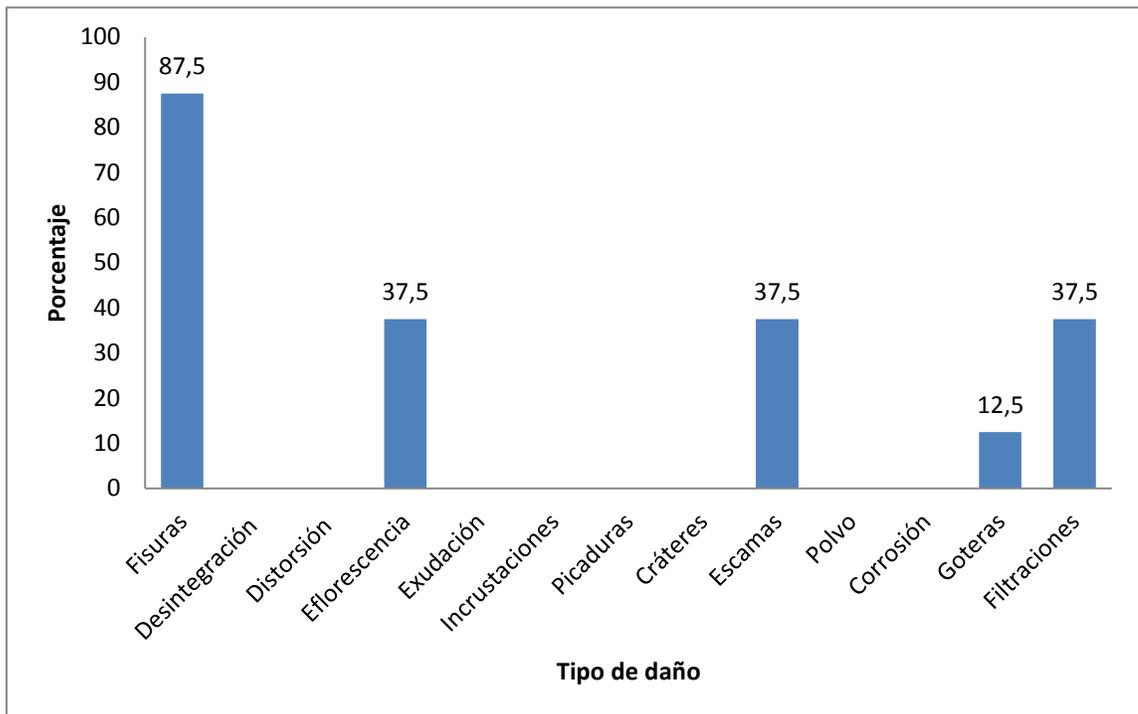
Teniendo en cuenta que si se realiza una formaleta de este tipo, puede ser utilizada en la construcción de siete bóvedas y los parales para utilizar hasta 12 techos, es por ello que los precios se reducen.			
Total Formaleta (Total/7)			Q. 1 162,74
Total Parales de pino rústico (parales/12)			Q. 62,50
COSTO TOTAL FORMALETA			Q. 1 225,24
Materiales			
Varillas de acero de 1/4"	0,73 qq	Q. 282,00	Q. 205,86
Malla hexagonal de 1/2"	35,43 yardas	Q. 13,50	Q. 478,31
Cemento	11 sacos	Q. 68,50	Q. 753,50
Aditivo	0,22 litro	Q. 45,67	Q. 10,05
Subtotal			Q. 1 447,71
Arena pómez	1 m ³	Q. 80,00	Q. 80,00
Arena de río	1 m ³	Q. 78,75	Q. 78,75
COSTO TOTAL MATERIALES CON ARENA PÓMEZ + FORMALETA			Q. 2 752,96
COSTO TOTAL MATERIALES CON ARENA DE RÍO + FORMALETA			Q. 2 751,71
COSTO TOTAL POR M²			Q. 183,45

Fuente: elaboración propia.

3. RESULTADO DE LA EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS

Tomando como base los diferentes daños y el deterioro que se observó en las estructuras de ferrocemento, se realizó una gráfica para cada tipo: depósitos, cubiertas y paneles, mostrando en porcentaje el número de estructuras que presentan el deterioro.

Figura 21. **Porcentaje de número de depósitos de ferrocemento que presentan daño**



Fuente: elaboración propia.

De los 9 depósitos que fueron evaluados visualmente, uno ya no existe, por lo tanto 8 de ellos representan el 100 por ciento en la figura 21, del cual el 87,5 por ciento (7) mostraron fisuras superficiales, de ancho fino y longitud pequeña. Hubo un depósito con fisuras profundas y anchas, también se encontraron grietas que provocaban constantes goteras, este se representa en la grafica con el 12,5 por ciento.

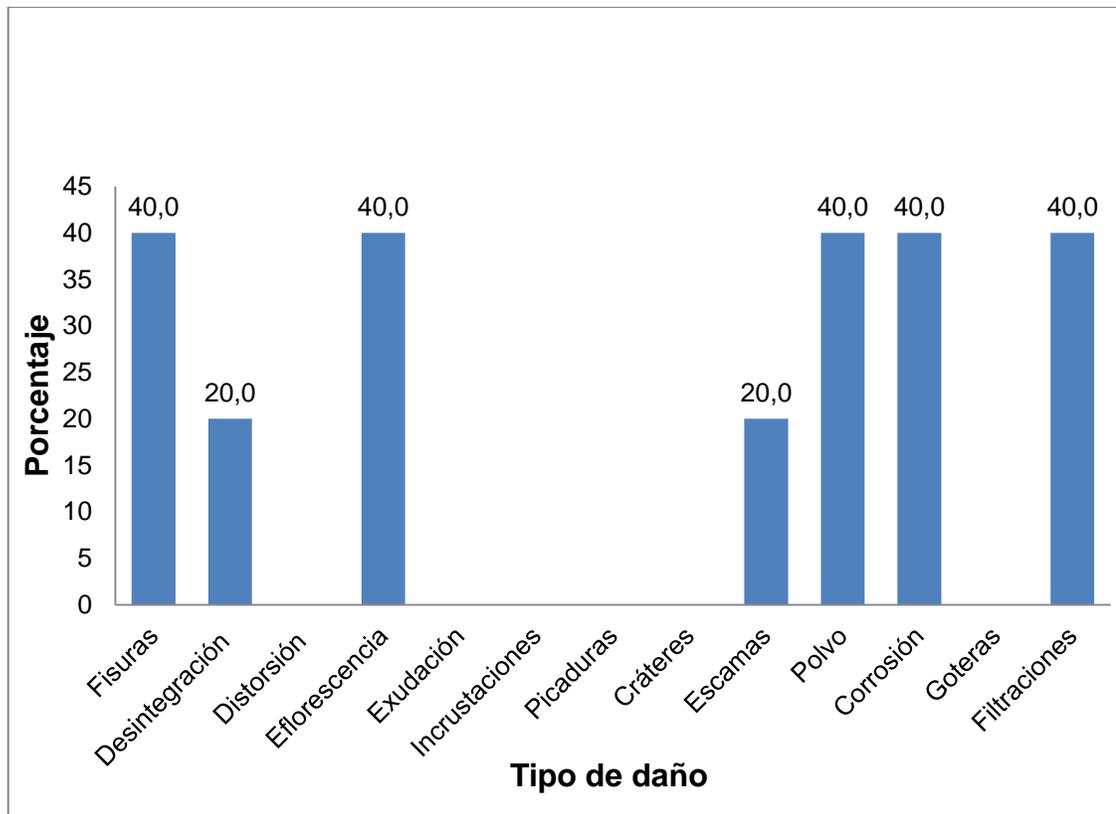
El 37,5 por ciento (3) de los depósitos muestran eflorescencia moderada, escamas superficiales de pintura y filtraciones moderadas, ya que no habían goteras en estos.

Anteriormente, en el numeral 2.1.1., se mencionó la realización de una entrevista a usuarios y personas que conocen las estructuras; para complementar la investigación e identificar las causas de las condiciones de los depósitos, a continuación se presenta la síntesis de la información proporcionada en la entrevista.

- De los nueve depósitos, dos son usados como macetas, los otros para almacenamiento de agua, y uno de estos ya no existe, fue totalmente destruido, debido a que se optó por otro sistema. En general, siete depósitos no han recibido mantenimiento externo (pintura) ni interno (limpieza por dentro), cinco de estos fueron pintados una vez desde que se construyeron, el único que recibe mantenimiento periódicamente, a base de pintura es una de las macetas, sin embargo, las estructuras que no recibieron ningún mantenimiento periódicamente, no mostraron indicios de que el agua almacenada estuviera contaminada por basura u hongos, y se pudo observar internamente que permanecen sin daño alguno; solo presentan daños superficiales de pintura antigua, o causados por factores ambientales.

- Dos depósitos de almacenamiento de agua, por su tamaño sufrieron caídas e inconvenientes en el traslado de un lugar a otro, uno de estos fue el más afectado, causándole daños, específicamente en el mortero, en las paredes y en su base; sin embargo, presta el servicio aún.

Figura 22. **Porcentaje de número de cubiertas de ferrocemento que presentan daño**



Fuente: elaboración propia.

Las 5 cubiertas evaluadas visualmente representan un 100 por ciento en la gráfica de la figura 22; en tres de ellas no se observó ningún daño (ya que dos fueron protegidas por lámina y cielo falso y la otra tenía una capa de

repello). El 40 por ciento en la gráfica lo representan las dos cubiertas que fueron sometidas a ensayos de carga después de su construcción, por tal motivo los daños encontrados en la evaluación fueron, fisuras, eflorescencia, filtraciones, corrosión y polvo.

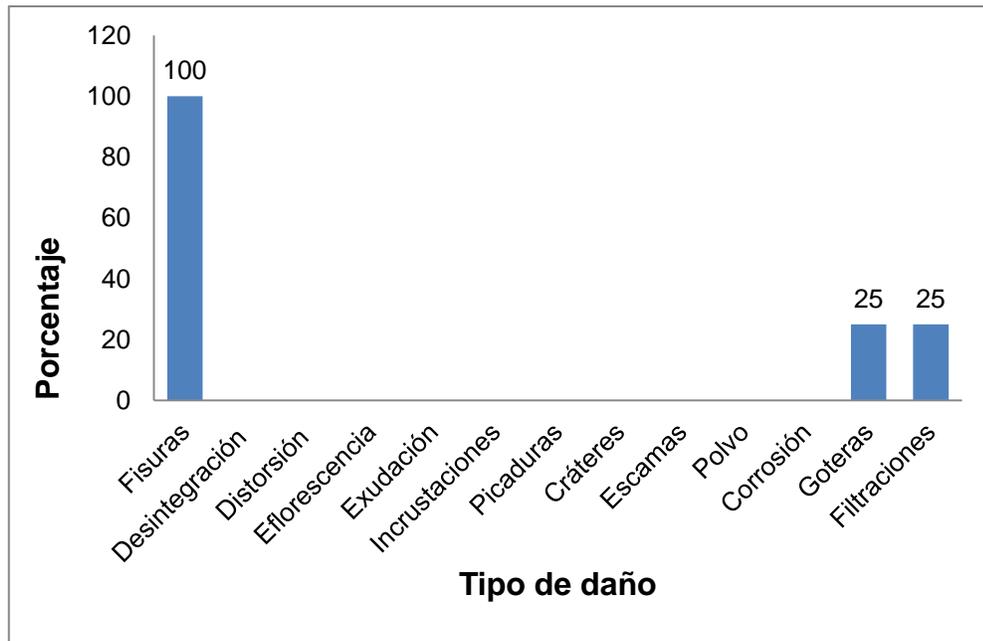
Las fisuras se identificaron en las dos caras de las cubiertas (interna y externa), fueron de tamaño medio y pequeño, algunas profundas, con mayor visibilidad en las esquinas. En dos cubiertas que no presentaron daños se pudieron observar líneas marcadas por la fundición, pero ninguna fisura, estas se encuentran continuamente separadas por una viga de concreto.

La eflorescencia y la corrosión fueron visibles únicamente en las partes internas de las cubiertas, en poca cantidad. Las filtraciones son evidentes únicamente en época de lluvia, en fisuras profundas. Solamente una cubierta presentó mínima desintegración y escamas de mortero en la parte interna.

A continuación se presenta la información más importante, proporcionada por usuarios y personas que conocen las estructuras, a través de la entrevista.

- Las cinco cubiertas no recibieron ningún mantenimiento periódicamente, solamente dos de ellas conservan la pintura aplicada al inicio.
- En la cubierta ubicada en la casa de la zona 18, colonia San Rafael, se pudo observar el repello y ningún daño; la cubierta tiene la función de entepiso, sobre esta habían dos niveles más. En esta ocasión no se contó con mayor detalle de información, no se pudo entrevistar al propietario, ya que la da en alquiler.

Figura 23. **Porcentaje de número de estructuras de paneles de ferrocemento que presentan daño**



Fuente: elaboración propia.

Las cuatro estructuras de paneles evaluadas representan un 100 por ciento en la gráfica de la figura 23, cada panel muestra fisuras finas, superficiales y pequeñas; específicamente ubicadas en el lado interno, externo y uniones.

El 25 por ciento en la gráfica representado por una estructura que funciona como techo unido a una losa de concreto, muestra goteras y filtraciones en época de lluvia específicamente en la unión.

A continuación se presenta la información más relevante proporcionada por la entrevista a usuarios y personas que conocen las estructuras.

- La mayoría de los paneles fueron contruidos con el mismo diseño y técnicas usadas en el Centro de Investigaciones de Ingeniería (USAC). Normalmente los paneles son usados para construir muros; en esta ocasión de las cuatro estructuras evaluadas, dos tuvieron una aplicación diferente, primero, techo del área de lavandería de una casa, este no tuvo ningún tipo de mantenimiento periódico. Segundo, se realizó una verja en la entrada de una vivienda con paneles que fueron cortados, a esta tampoco le fue proporcionado ningún mantenimiento.
- Solamente las dos aulas de la Escuela Urbana Oficial Mixta No.85 recibieron mantenimiento cada 5 años. Actualmente, la escuela está remodelada, cuenta con segundo nivel, para lo cual se reforzó con columnas, también hubo una ampliación en el primer nivel, todo de concreto reforzado. Ahora las aulas funcionan como bodegas de la escuela, donde almacenan escritorios, pizarrones etc.
- Las cuatro estructuras se encontraron en funcionamiento.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Según los resultados obtenidos y tabulados del formato de evaluación de daños, y la entrevista realizada a las personas, la mayoría de las estructuras de ferrocemento están en buen estado, por lo que este sistema constructivo es funcional a través del tiempo. Por medio de la evaluación visual se conoció el estado general de las estructuras de ferrocemento existentes en Guatemala, con más de 25 años de edad, considerando aspectos importantes, como la magnitud de daños y deterioros que poseen y la funcionalidad que ha venido prestando.

En las estructuras se observaron daños y deterioro causados por factores ambientales, tiempo transcurrido y condiciones de servicio, que afectaron directamente la pintura de la estructura y en pocas ocasiones la capa superficial del mortero.

Las fisuras fueron el tipo de daño más visto en la mayoría de los depósitos de una forma superficial, catalogándolas así por su escasa profundidad al no generar filtraciones cuando están en contacto con el agua. Este fenómeno es inevitable en el ferrocemento, probablemente la mayor parte de estas aparecieron inmediatamente cuando el material endureció en la etapa de fraguado o pudo haber tenido un mal proceso de curado.

El espesor de los depósitos cumplió con el mínimo requerimiento de una pulgada, lo cual evita corrosión en el acero. Únicamente el depósito que sufrió daños severos a causa de una caída, puede ser que contenga corrosión interna, debido a las grandes grietas observadas mayormente en la base.

Los depósitos que registraron mayores daños fueron los que sufrieron caídas y golpes en traslados de lugar, por lo que se debe tener un especial cuidado en la movilización de los depósitos de ferrocemento cuando son de mayor tamaño, preferiblemente se deben construir en el mismo lugar donde van a ser instalados. Y los depósitos que no presentaron mayores daños, proporcionaron condiciones de servicio muy buenas, a pesar de no haber recibido mantenimiento, pero esto no exime realizarlo cada cierto tiempo, por estética, para la conservación externa e interna de la estructura, y evitar que se formen algas u hongos.

Las 2 cubiertas que fueron protegidas por lámina y cielo falso, que no presentaron deterioros y daños, se encontraron en un perfecto estado, ya que no fueron expuestas a la intemperie, pero estas no podrán ser protegidas siempre de esta manera, muy probablemente soportarán los fenómenos atmosféricos, ya que el ferrocemento ha mostrado ser un material resistente a estos, lo que sí se podría brindar es un mantenimiento de pintura la cual evitará deterioros superficiales.

La cubierta que está como entrepiso, aparentemente se encuentra muy bien, esta fue diseñada y construida con métodos propuestos por ingenieros de la Facultad de Ingeniería de la USAC. Se desconoce si se realizó algún estudio antes de construir el segundo nivel, probablemente los elementos que reciben las cargas son las vigas que se encuentran alrededor de esta cubierta. Actualmente se conocen techos de ferrocemento que funcionan como entrepiso en el sistema SERF, en donde se implementan elementos paneles-cubierta, mencionado en sección 1.3.1. de este trabajo de graduación.

Las dos cubiertas que ya estaban ensayadas, son las que en peores condiciones se hallaron, las cuales presentaron daños en la estructura del

mortero, ya que perdieron algunas propiedades iniciales (resistencia inicial, elasticidad) mostrando fisuras, grietas, y pequeñas desintegraciones. Actualmente se encuentran en funcionamiento como techo de bodegas de almacenamiento de materiales inusuales, podría existir un riesgo si se encontraran en un lugar concurrente.

Todas las estructuras a base de paneles de ferrocemento se encontraron en buen funcionamiento y todos sus paneles en buenas condiciones, Observando daños mínimos, a pesar que la mayoría no recibió mantenimiento.

Los daños visibles en todos los paneles fueron las fisuras superficiales, ubicadas en la capa externa del mortero, probablemente debido a reacciones del mortero de estado líquido a sólido, proceso de curado o manipulación de los paneles.

Las aulas de una escuela que fueron construidas con paneles de ferrocemento, es una de las estructuras que se encuentra en excelentes condiciones de servicio, a pesar que tuvo un cambio estructural al construirse el segundo nivel, ya que los paneles junto con las columnas de refuerzo y vigas soportan las cargas. Considerando este caso y los estudios realizados en otros países en cuanto a la construcción de edificios con paneles de ferrocemento, podrían realizarse investigaciones y aplicaciones de este tema en Guatemala y darlo a conocer como una buena opción de construcción y poder convertir el ferrocemento en un sistema tradicional en el país.

CONCLUSIONES

1. Se contactaron a los usuarios y dueños de las estructuras y se entrevistó a la mayoría.
2. A través del formato de evaluación realizado, se tabularon los datos para poder conocer el número de estructuras que presentaron daño en porcentaje.
3. En la evaluación visual de los depósitos, cubiertas y paneles de ferrocemento se identificaron daños y deterioros causados por factores ambientales, tiempo transcurrido y condiciones de servicio, que afectaron directamente la pintura de la estructura y, en pocas ocasiones, la capa superficial del mortero.
4. El ferrocemento, a pesar de ser de espesor delgado, es un material duradero, resistente y funcional tanto como el concreto reforzado.
5. El ferrocemento es un material mucho más económico que el concreto reforzado.

RECOMENDACIONES

1. Dar a conocer el ferrocemento a los guatemaltecos, como un sistema de construcción duradero y funcional, haciendo mención de las estructuras existentes en Guatemala y de su condición.
2. Es importante implementar un estudio y la realización del Sistema SERF a base de paneles en la construcción de viviendas y edificios en Guatemala, ya que este tiene un corto tiempo de ejecución y es más económico que el concreto reforzado.
3. A pesar del buen estado de la mayor parte de las estructuras, es necesario que reciban mantenimiento cada cierto tiempo, y las que están dañadas puedan ser reparadas, para proporcionar una mejor calidad de servicio.
4. Tener mucho cuidado con el traslado y movilización de las estructuras de ferrocemento, sobre todo cuando son de un gran tamaño, ya que una caída podría afectar su constitución y, por ende su condición de servicio.

BIBLIOGRAFÍA

1. CEPIS. UNATSABAR. OPS. *Fundamentos para la aplicación de ferrocemento*. Lima: OPS. [En línea] <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cosude/iv.pdf>> [Consulta: abril de 2013].
2. FUENTES, Yenma. *Evaluación del sistema de edificaciones residenciales de ferrocemento (SERF) ante cargas de viento y sismo*. Ciudad de la Habana Cuba. 2010. [En línea] <<http://www.ecosur.org/index.php/publicaciones/file/86-evaluacion-del-sistema-de-edificaciones-residenciales-de-ferrocemento-ante-cargas-de-viento-y-sismo>> [Consulta: junio de 2013].
3. GUERRERO, Patricia; GONZÁLEZ, Luis Octavio. *Conceptos generales sobre ferrocemento*. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. 2008. [En línea] <<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/palmira/materiales/pdf/cap9/amplia/cartilla%20ferrocemento.pdf>> [Consulta: mayo de 2013].
4. HERNÁNDEZ, Guillermo Iván. *Variación de la resistencia en flexión de elementos de ferrocemento, debido a tipo y cantidad de refuerzo y agregados y su aplicación en bóvedas para cubiertas de vivienda económica*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1982. 77 p.

5. MELÉNDEZ, Patricia. *Estudio de la factibilidad del uso del ferrocemento para la construcción de viviendas de bajo costo, sismo resistentes y de rápida ejecución en la República Dominicana 2010*. República Dominicana. 2010. [en línea] <<http://www.ecosur.org/index.php/publicaciones/file/87-estudio-de-la-factibilidad-del-uso-del-ferrocemento-para-la-construccion-de-viviendas-de-bajo-costosismo-resistentes-y-de-rapida-ejecucion-en-la-republica-dominicana-2010>> [Consulta: junio de 2013].
6. MONZÓN, Manuel Francisco. *Situación Actual del ferrocemento de acuerdo con el comité 549 de ACI y algunas aplicaciones estudiadas en Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1986. 136 p.
7. OPS. *Guía de construcción para estructuras de ferrocemento*. Lima: 2003. [En línea] <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cosude/ii.pdf>> [Consulta: abril de 2013].
8. QUIÑÓNEZ, Francisco Javier. *Bóvedas de ferrocemento de concreto liviano de pómez y de mortero de arena de río para uso en vivienda económica*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1981. 128 p.
9. _____. *Cuaderno No.7 de investigación, dirección general de investigación*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1989. 170 p.

10. SIERRA, Hugo Berty. *Análisis de construcción y evaluación de un tanque de ferrocemento de almacenamiento de agua*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1986. 61 p.

11. VALENZUELA VILLANUEVA, Edgar Fernando. *Consideraciones y evaluaciones de un sistema constructivo de edificios educativos con base a paneles de ferrocemento*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1987. 77 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Formato de evaluación visual de estructuras.

Diseño del formato de evaluación visual de estructuras de ferrocemento

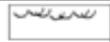


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE CIVIL
FORMATO DE EVALUACION VISUAL DE ESTRUCTURAS



ESTRUCTURA A EVALUAR:

(Estructura #)

	TIPO DE DAÑO	OBSERVACIONES
	Fisuras	
	Desintegración	
	Distorsión ó deformación	
	Eflorescencia	
	Exudación	
	Incrustaciones	
	Picaduras	
	Cráteres	
	Escamas	
	Polvo	
	Corrosión	
	Goteras	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Daño en estructuras de ferrocemento.**

Escamas de pintura y eflorescencia



Pequeña filtración



Lugar: 13 avenida 5-37 zona 1, Villa Nueva, Guatemala.

Fisura típica en capa superficial de mortero



Interior del depósito



Lugar: 13 avenida 5-37 zona 1, Villa Nueva, Guatemala.

Continuación del apéndice 2.

Humedad y grietas



Goteras en la parte inferior del depósito



Lugar: cantón Pueblo Nuevo Palencia, Guatemala.

**Exposición de la malla de refuerzo
(Defecto de construcción en cubierta)**



Eflorescencia en cubierta



Lugar: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Continuación del apéndice 2.

**Techo a base de paneles de ferrocemento
(fisura en unión de paneles)**



Fuente: 2da calle 16-69, sector B1, Pinares de San Cristóbal, Ciudad San Cristóbal Mixco, Guatemala.

**Fisura superficial en unión de paneles
de muro en aulas de escuela**



Lugar: Escuela Urbana Mixta No.85, colonia Lomas del Norte, zona 17, Guatemala.

Fisura superficial en panel de verja



Lugar: 13 avenida 5-37 zona 1, Villa Nueva. Guatemala.