UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN

SEDE SANTIAGO

FACULTAD DE INGENIERIA Y TECNOLOGIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

RECUPERACIÓN DE LOSAS DE LADRILLO DE ARCILLA ARTESANAL HECHOS A MANO, REFORZADAS CON MORTERO ARMADO, APLICANDO LA TECNICA DE REPARACIÓN CON FERROCEMENTO

Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: Hernán Arnés Valencia
Ingeniero Civil PUC
Alumna: María Victoria Moya Vásquez

Santiago, Junio 2015

CALIFICACIÓN DE LA TESIS

En Santiago, el ….. de Junio 2015, los abajo firmantes dejan constancia que la alumna María Victoria Moya Vásquez de la carrera de Ingeniería Civil ha aprobado la tesis para optar al título de Ingeniero Civil, con una nota de ……

Profesor Ingeniero Civil Estructural Sr. Hernán Arnés Valencia

…….

Profesor Ingeniero Civil Estructural Sr.

……

Profesor……

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

El presente trabajo, propone el uso de la técnica de reparación con ferrocemento para restaurar elementos estructurales, en este caso particular, se busca recuperar la capacidad de resistencia de tres losas experimentales, las cuales presentan daños estructurales, tras haber sido sometidas a los ensayos de prueba de carga, carga cíclica y rotura.

Las losas experimentales están fabricadas con ladrillos de arcilla artesanales hechos a mano, y reforzadas con mortero armado. Estás losas fueron reparadas y sometidas a los tres ensayos recién mencionados; con el fin de analizar los resultados obtenidos, para verificar la efectividad del método de reparación propuesto.

La metodología empleada en el desarrollo de la técnica de reparación y los ensayos, fue la indicada en los *Requisitos del Reglamento para Concreto Estructural*, también conocido como *Norma ACI*[1]*318,* y algunas normas nacionales[2].

[1]ACI: American Concrete Institute.
[2] NCh. 170 Of. 1985 "Hormigón - Requisitos generales".
NCh. 1537 Of. 86 "Diseño estructural de edificios - Cargas permanentes y sobrecargas de uso".

ABSTRACT

This thesis proposes the use of the technique of repair with ferrocement to restore structural elements, in this particular case , it seeks to recover the resilience of three experimental slabs , which have structural damage , having been subjected to the following test: load, cyclic load and breakage.

The experimental slabs are made of handmade clay bricks handmade and reinforced reinforced mortar . These slabs were repaired and subjected to three tests just mentioned ; in order to analyze the results , to verify the effectiveness of the proposed method of repair.

The methodology used in the development of technical repair and testing was indicated in the Requirements for Structural Concrete , also known as Standard ACI 318 , and some national standards.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA iii
AGRADECIMIENTOS iv
RESUMEN v
ABSTRACT vi
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN 1
1.1 Antecedentes generales 1
1.2 Objetivo general 2
1.3 Objetivos específicos 2
1.4 Alcances 2
1.5 Metodología para el diseño, construcción y evaluación de la reparación 4
CAPÍTULO 2: LOSAS EXPERIMENTALES 6
2.1 Antecedentes generales 6
2.2 Tipos de losas 7
2.3 Diseño y confección de losas experimentales 8
CAPÍTULO 3: FERROCEMENTO 13
3.1 Antecedentes históricos 13
3.2 El ferrocemento en Chile 16
3.3 Materiales que componen el ferrocemento 19
3.3.1 Mortero 20
3.3.1.1 Cemento 20
3.3.1.2 Áridos 24
3.3.1.3 Agua 25
3.3.1.4 Aditivos 26
3.3.2 Armadura 27
3.3.2.1 Armadura difusa 28
3.3.2.2 Armadura discreta 31
3.4 Propiedades mecánicas del ferrocemento 32
3.4.1 Módulo de elasticidad 33

3.4.2 Resistencia a la tracción 35
3.4.3 Resistencia a la compresión 36
3.4.4 Resistencia al corte 38
3.4.5 Resistencia a la flexión 41
3.4.6 Comportamiento al agrietamiento 43
3.4.7 Resistencia bajo cargas de fatiga 44
3.4.8 Durabilidad 45
3.4.9 Retracción y Creep 46
3.4.10 Resistencia al impacto 47
3.4.11 Resistencia al fuego 48
CAPÍTULO 4: MÉTODOS DE REPARACIÓN DE LOSAS 49
4.1 Antecedentes generales 49
4.2 Técnicas de reparación 49
4.2.1 Inyección de grietas 50
4.2.2 Colocación de refuerzos de acero 50
4.2.2.1 Colocación de armaduras adicionales 50
4.2.2.2 Colocación de anclajes con epoxi 51
4.2.2.3 Insertos superficiales 52
4.2.2.4 Refuerzos externos (betón plaque) 52
4.2.3 Refuerzo con fibra de carbono 53
4.2.4 Mortero proyectado 55
CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA DE REPARACIÓN CON FERROCEMENTO 56
5.1 Introducción 56
5.2 Metodología propuesta 56
5.2.1 Diseño 58
5.2.1.1 Características de la losa 58
5.2.1.2 Cálculos de diseño 59
5.2.2 Proceso constructivo 60
5.2.2.1 Preparación del área a reparar de la losa 60
5.2.2.2 Reparación zona traccionada 60
5.2.2.3 Análisis del mortero de la reparación 61
5.3 Normativa 61

CAPÍTULO 6: REPARACIÓN DE LOSAS EXPERIMENTALES 63
6.1 Antecedentes de diseño y construcción 63
6.2 Diseño de la reparación de las losas experimentales 66
6.2.1 Procedimiento del diseño de la reparación 67
6.3 Procedimiento constructivo de la reparación 70
6.4 Ensayo mortero de refuerzo 76
CAPÍTULO 7: ENSAYOS DE LOSAS REPARADAS 79
7.1 Introducción 79
7.2 Prueba de carga 79
7.2.1 Procedimiento para la prueba de carga 79
7.2.1.1 Intensidad de carga 79
7.2.1.2 Criterio de carga 81
7.2.1.3 Criterio de aceptación 83
7.2.2 Resultados de la prueba de carga 85
7.2.3 Análisis de resultados 90
7.3 Ensayo de cargas cíclicas 90
7.3.1 Ensayo carga cíclica losa N°1 92
7.3.2 Ensayo carga cíclica losa N°2 93
7.3.3 Análisis de resultados 95
7.4 Ensayo a rotura 96
7.4.1 Ensayo a rotura losa N°1 97
7.4.2 Ensayo a rotura losa N°2 98
7.4.3 Ensayo a rotura losa N°3 100
7.4.4 Análisis de resultados 101
7.5 Características de las losas reparadas 102
7.5.1 Cálculo módulo de elasticidad 102
7.5.2 Cálculo tensión de rotura por flexión 104
CAPÍTULO 8: LOSAS EXPERIMENTALES ANTES Y DESPUÉS DE LA REPARACIÓN 106
8.1 Introducción 106
8.2 Prueba de carga 106
8.3 Ensayo de carga cíclica 109
8.4 Ensayo a rotura 110

8.5 Análisis de resultados 112
CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES 113
TABLAS E ILUSTRACIONES 116
BILIOGRAFÍA 118

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes generales

A partir del desarrollo de varias tesis de Ingeniería Civil[3], se han realizado un sin número de investigaciones sobre el método de reparación con ferrocemento, para elementos estructurales como vigas, losas y muros. Esta técnica es económica y de fácil procedimiento, utiliza materiales que comúnmente se encuentran en obra, y no requiere de mano de obra especializada.

El ferrocemento es un material flexible, con alta resistencia y compacidad, compuesto por una delgada capa de mortero (arena y cemento), fuertemente armado con una malla electrosoldada y/o una armadura discreta de pequeño diámetro, distribuidas uniformemente a través de la sección transversal, resultando con ello una reducción en el peso propio, y en el volumen de los materiales.

Este material es de fácil construcción, requiere mínimo mantenimiento y es muy económico. Tiene buena resistencia al fuego, buen comportamiento ante los terremotos y alta durabilidad en ambientes agresivos, ya que no se oxida.

Actualmente, el ferrocemento posee una amplia gama de aplicaciones que incluyen la construcción de viviendas, tanques para recolección de agua, la construcción de barcos y buques; la fabricación de elementos arquitectónicos y estructurales; la reparación de elementos estructurales debido a fallas funcionales, o como refuerzo para soportar mayores solicitaciones, entre otros usos.

---

[3]Tesis: "Muros de contención de ferrocemento", Iván Maldonado, Universidad Austral de Chile.
Tesis: "Construcción de vivienda social de altura en ferrocemento", Lisette Santibáñes, Universidad Austral.
Tesis: "Utilización del ferrocemento en elementos de aligeramiento de placa y muros de división", Fernando Briso y Luis Castillo, Universidad Austral de Santander.

1.2 Objetivo general

El objetivo general de la presente memoria, es verificar la efectividad del método de reparación con ferrocemento, para restaurar y recuperar la capacidad estructural de tres losas de ladrillos de arcilla artesanales hechos a mano, reforzadas con mortero armado[4]; las cuales presentan daños estructurales, tras haber sido sometidas a los ensayos de prueba de carga, carga cíclica y rotura.

1.3 Objetivos específicos

- Proponer una metodología de reparación con ferrocemento, que permita el diseño de la reparación de las losas experimentales.
- Analizar el comportamiento y las propiedades de las losas experimentales reparadas, a través del análisis de los resultados de los ensayos de prueba de carga, carga cíclica y rotura.
- Verificar a partir de los resultados obtenidos en el ensayo de rotura, si las losas experimentales recuperaron o superaron su capacidad estructural después de la restauración.
- Comparar y analizar los resultados de los ensayos de las losas experimentales antes y después de la reparación.
- Constatar que las losas experimentales reparadas, pueden resistir las cargas necesarias para ser utilizadas en edificaciones habitacionales.

1.4 Alcances

A partir del objetivo general y de los objetivos específicos del presente trabajo de titulación, se pueden desprender los siguientes alcances:

[4]En los siguientes capítulos, las tres losas de ladrillos de arcilla artesanales hechos a mano, reforzadas con mortero armado, se denominarán *losas experimentales*.

La presente memoria, se enfoca en el análisis de la técnica de reparación con ferrocemento, con el propósito de confirmar la eficacia y los beneficios de emplear este método en la recuperación estructural de losas dañadas. Además, se considera en detalle, el comportamiento y las propiedades de las losas experimentales, después de ser reparadas y ensayadas por prueba de carga, carga cíclica y por ensayo a rotura.

En cuanto al diseño de la reparación y el desarrollo de ésta, se realizaron una serie de consideraciones tales como realizar el diseño de la reparación de las losas experimentales, como si estas fueran losas de hormigón armado; efectuar la reparación de las losas experimentales en condiciones desfavorables, para verificar el éxito de la metodología con ferrocemento; obtener para la reparación, un mortero con capacidad de resistencia igual o superior a 200 kg/cm^2. Éstos y otros requerimientos, fueron descritos en detalle en los "Alcances de diseño y construcción" del Capítulo 6 de este trabajo.

Para el desarrollo de este estudio, se utilizaron tres losas de ladrillos de arcilla artesanales hechos a mano, reforzadas con mortero armado. Estas losas se construyeron en el laboratorio de Estructuras de la Universidad Central, y fueron sometidas a ensayos de prueba de carga, carga cíclica y rotura, en la máquina MAC V, ubicada en el mismo laboratorio.

Los detalles del diseño y la descripción del proceso constructivo de las losas experimentales, solo serán expuestos en este proyecto, con la intención de dar a conocer de manera general el estudio realizado. Sin embargo, es posible que este tema sea un buen punto de partida para posteriores investigaciones, y/o como base para futuros estudios comparativos que permitan caracterizar beneficios y perjuicios de sus implementaciones, con respecto a losas de otros materiales más comunes.

Por otro lado, este y otros estudios sobre los distintos usos del ferrocemento, buscan impulsar su empleo, no solo como material de reparación de elementos estructurales, sino que también como elemento principal de construcción en

distintos tipos de obras de nuestro país; lo cual abre variadas posibilidades de futuras investigaciones.

1.5 Metodología para el diseño, construcción y evaluación de la reparación

Para cumplir con los objetivos del presente trabajo de titulación:

El diseño de reparación de las losas experimentales, se basó en las recomendaciones del ACI-318S-08, y las indicaciones de la NCh. 1537 Of. para determinar las solicitaciones que deben resistir las losas antes y después de la reparación; además del refuerzo de acero que va a necesitar cada una de las losas.

Una vez obtenidos los resultados de los cálculos, se adquirieron los materiales necesarios para fabricar el ferrocemento (mortero, arena gruesa, malla ACMA C-139, barras de acero, epóxico adherente, etc.), e iniciar la reparación.

El proceso de reparación de las losas experimentales, desarrollado en el laboratorio se describe a continuación:

- Primero, las losas experimentales se dejaron completamente planas, y con la zona a tracción expuesta, para realizar la reparación.
- Luego, cada losa se ubicó en el lugar designado para su reparación.
- Se realizó la limpieza de la superficie de las losas.
- Se construyó y colocó el moldaje en cada losa.
- La superficie de cada losa se perforó, para distribuir una serie de anclajes, cuya función es reforzar la armadura que va a ser ubicada posteriormente.
- A continuación, se aplicó un puente de adherencia epóxico para unir mortero fresco con endurecido.
- Se instaló la malla electrosoldada, junto a las barras de refuerzo.
- Se preparó el mortero *in situ*, según la dosificación establecida (1:2:0,5).

- El mortero se vació, compactó, enrasó y alisó manualmente.
- Simultáneamente, se elaboraron tres probetas del mortero a utilizar, las cuales se dejaron en las mismas condiciones que la reparación de las losas.

Luego de finalizar el proceso de reparación, se inició el proceso de curado. Este procedimiento, consistió en colocar sobre la reparación de cada losa experimental una capa de arena húmeda, la cual se cubrió con plástico con la finalidad de proporcionar humedad constante, y evitar el agrietamiento de la losa.

Concluido el tiempo de espera de este proceso, se inició el desmolde de las losas experimentales reparadas, y se retiró la capa de arena del curado; luego una a una, las losas se trasladaron y posicionaron para cada ensayo.

Las tres losas experimentales después de la reparación, fueron sometidas a tres diferentes ensayos:

- Ensayo de prueba de carga.
- Ensayo con carga cíclica.
- Ensayo a rotura.

Por otro lado, previo a los ensayos de las losas, se realizarán los ensayos de las probetas del mortero, con el fin de verificar su resistencia, siguiendo indicaciones de la NCh. 170 Of. 1985.

Culminados los ensayos de las losas experimentales reparadas, se procedió al análisis y evaluación de los resultados obtenidos, para establecer el comportamiento y las propiedades mecánicas de estas losas.

CAPÍTULO 2: LOSAS EXPERIMENTALES

2.1 Antecedentes generales

Mediante el desarrollo de varias tesis de Ingeniería Civil[5], se han explorado diferentes metodologías de diseño de losas, con materiales no convencionales como losas mixtas con perfilería de acero livianas y hormigón, losas de madera con vigas tipo T, y losas mixtas usado elementos de cubierta como planchas de acero cincada y hormigón, además del diseño de losas con ferrocemento.

Con el fin de innovar y experimentar, se desarrolló el trabajo de titulación "*Diseño de losas experimentales de ladrillos de arcilla hechos a mano, reforzados con mortero armado"*[6], donde se propuso una nueva forma de diseño y construcción de losas, utilizando *el ladrillo* como material principal en su composición, con el objetivo de verificar su capacidad de resistencia, y evaluar si era posible su uso en obras habitacionales.

Para el desarrollo de este experimento, fue necesario investigar si existían trabajos previos semejantes a este, de los cuales se pudieran obtener datos o alguna información útil. Debido a que no se encontró ningún proyecto similar, el diseño de estas losas de ladrillo, se basó en los antecedentes de diseño y construcción de las losas cerámicas, nervadas o aligeradas, cuyo método constructivo es semejante.

Una vez realizado el diseño y la confección de las tres losas experimentales, estas fueron sometidas a los ensayos de *Prueba de carga* (según ACI 318S-08), *Carga cíclica* y *Rotura*, los cuales fueron necesarios para su posterior

[5]Tesis: "Diseño, construcción y ensayo de una losa de madera unida con tarugos y su comparación con losa de madera post tensada, clavada y encolada", Vladimir Nuñez, Universidad Austral de Chile.
Tesis: "Diseño, fabricación y ensayo de una losa unidireccional de hormigón liviano con poliestireno expandido reciclado modificado para fines habitacionales", Juan León, Universidad Austral.
Tesis: "Innovación en la tecnología de losas tralizadas, reemplazando las bovedillas por losetas prefabricadas de ferrocemento", Alberto Teranishi, Universidad Austral de Chile (UACH).
[6] Autores: Díaz V., L. M. y Jiménez S., F. A. 2014. Universidad Central de Chile (UCEN).

análisis y evaluación. Todos estos ensayos se realizaron en la máquina MAC V, ubicada en el laboratorio de estructuras de la Universidad Central.

2.2 Tipos de losas

Las losas son elementos estructurales horizontales que se utilizan para proporcionar superficies planas y útiles, cuyas dimensiones en planta son relativamente grandes en comparación con su altura. Las cargas que actúan sobre las losas son perpendiculares al plano principal de las mismas, por lo tanto presentan un comportamiento dominado por la flexión. El esfuerzo cortante en las losas es tan pequeño que el hormigón es capaz de resistirlo por sí solo, es por eso que el refuerzo de acero distribuido en la losa es para resistir los esfuerzos de flexión.

Las losas son elementos estructurales de gran importancia, cuya función es transmitir las solicitaciones (peso propio y cargas de servicio), a elementos estructurales como vigas y muros; de igual forma, permite la unión de elementos como vigas, muros y columnas, para que toda la estructura trabaje en conjunto.

Según la dirección de carga, las losas se clasifican en *Losas Bidireccionales* o *Losas Unidireccionales*. Las primeras están apoyadas perimetralmente, es decir, están apoyadas sobre vigas o muros en sus cuatro lados, y trabajan en dos direcciones; en cambio, las otras losas solo se apoyan en dos lados, y por lo tanto trabajan en una sola dirección.

Si las losas están apoyadas sobre vigas de hormigón armado, se denominan *Losas sustentables sobre vigas*, si se ubican sobre muros de albañilería o de hormigón armado se llaman *Losas sustentables sobre muros*, si están directamente sobre columnas se conocen como *Losas Planas*, también pueden

sostenerse sobre elementos de acero estructural, o ubicarse en el terreno en forma continua[7].

De acuerdo a su composición las losas se clasifican en *Losas Macizas* constituidas de hormigón armado, y en *Losas Alivianadas*, *Aligeradas* o *Nervadas*, conformadas por viguetas y elementos aligerantes como bovedillas de cemento y arena, cerámica, madera o plástico, de manera de disminuir el peso de la losa y permitir que se cubran mayores luces de manera más económica.

La construcción de losas más común es in situ, como es el caso de las losas macizas, mientras que las losas nervadas son una opción de losas prefabricadas.

Cabe mencionar que la reciente clasificación de las losas, corresponde a sus características más comunes, sin embargo, también existen losas de madera, perfilería de acero con hormigón, materiales reciclados, e incluso losas constituidas por ladrillo, las cuales serán analizadas en este caso.

2.3 Diseño y confección de losas experimentales

Las características de las tres losas experimentales, junto a sus consideraciones de diseño y proceso de construcción, serán indicadas a continuación, de acuerdo a la información presentada en el trabajo de titulación "*Diseño de losas experimentales de ladrillos de arcilla hechos a mano, reforzadas con mortero armado*".

Las tres losas experimentales medían 260 cm largo por 100 cm de ancho, y tenían un espesor de 14 cm; sin embargo, los cálculos de diseño, solo consideraron las secciones que llevaban hormigón armado (32 cm), excluyendo

[7] Referencia: Diseño de losas de hormigón armado [En línea] <http://publiespe.espe.edu.ec/librosvirtuales/hormigon/temas-de-hormigon armado/hormigon08.pdf>

toda el área de ladrillos artesanales, ya que la carga aplicada se repartirá entre las viguetas (ver Figura 2.1 y Figura 2.2).

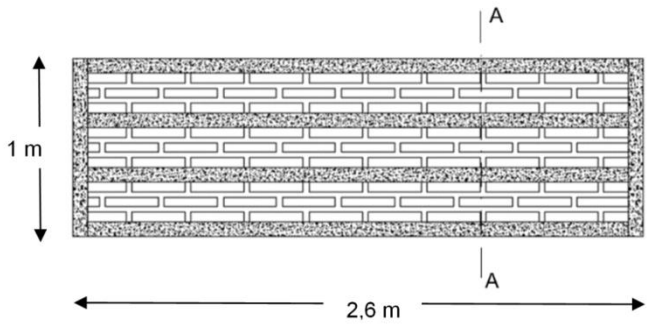

Figura 2.1: Vista planta superior losa experimental.
Fuente: Elaboración propia.

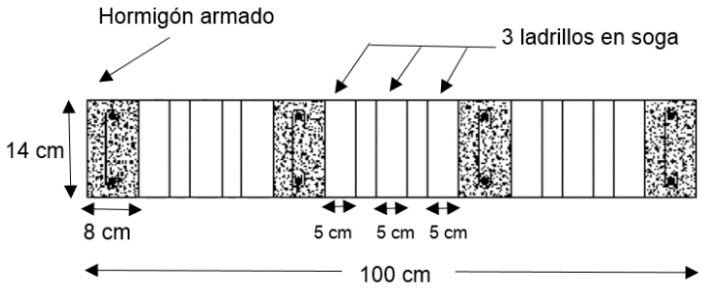

Figura 2.2: Corte A-A losa experimental.
Fuente: Elaboración propia.

Su diseño consideró una sobrecarga de 200 kg/m^2, según indicaciones de la NCh. 1537 Of. 86 “Cargas permanentes y sobrecargas de uso”, para utilizar estas losas en edificaciones habitacionales.

El momento último calculado fue 797 kg-m, con este dato se obtuvo una armadura de refuerzo de 4Ø10, pero con la finalidad de experimentar su capacidad de resistencia, se determinó que dos de las tres losas, utilizarán un área de acero menor al resultado obtenido en los cálculos: 4Ø8.

El proceso de construcción de las losas experimentales, se desarrolló según los pasos que se exponen a continuación, tal como se observa desde la Figura 2.3 a la Figura 2.8:

- Primero se elaboró el moldaje de cada losa.

Figura 2.3: Moldaje losa.
Fuente: Díaz y Jiménez, 2014.

- Luego, se confeccionó la armadura utilizando las barras de acero ∅8 y ∅10 en forma longitudinal, y las barras ∅6 para los estribos (ganchos).

Figura 2.4: Armadura losa.
Fuente: Díaz y Jiménez, 2014.

- Listo lo anterior se aplicó el desmoldante y se colocó la armadura, para luego comenzar a posicionar los ladrillos.

Figura 2.5: Colocación de ladrillos.
Fuente: Díaz y Jiménez, 2014.

- Ubicados todos los ladrillos se vació el mortero.

Figura 2.6: Aplicación del mortero.
Fuente: Díaz y Jiménez, 2014.

- Listas las losas, se inició el proceso de curado de las losas, para lo cual se aplicó sobre cada una ella de ellas, una capa de arena que debía estar constantemente húmeda y cubierta con plástico, para evitar el agrietamiento.

Figura 2.7: Losa terminada.
Fuente: Díaz y Jiménez, 2014.

Figura 2.8: Aplicación de arena mojada.
Fuente: Díaz y Jiménez, 2014.

Antes de ensayar cada losa, éstas fueron desmoldadas, y se les retiró la capa de arena húmeda del curado.

A continuación, las losas se posicionaron en la máquina MAC V para ejecutar los ensayos:

- Ensayo de prueba de carga (Según requisitos del ACI 318S-08).
- Ensayo con carga cíclica.
- Ensayo a rotura.

CAPÍTULO 3: FERROCEMENTO

3.1 Antecedentes históricos

Los primeros usos del ferrocemento se remontan a mediados del siglo XIX, fecha considerada como la del primer uso del hormigón armado.

En 1848 Joseph Luis Lambot inventó el Ferrocemento en Francia. Su primera aplicación fue en un bote a remos construido en 1849. En 1856, Lambot obtuvo patentes francesas y belgas con el nombre de “Ferciment”. Uno de sus botes aún se encontraba a flote en 1949, es decir, cien años después. Este se exhibe en un museo de Brignoles, Francia, y en muy buenas condiciones.

La primera descripción del ferrocemento, dice que este producto puede reemplazar la madera (en pisos, recipientes para agua, maceteros, etc.), la cual está sujeta a daños por el agua y la humedad. En cuanto a su composición, inicialmente se estableció que la base del ferrocemento era una malla metálica de alambre o de varillas interconectadas para formar un emparrillado flexible.

Hoy podríamos definirlo, como un material compuesto de mortero de cemento y de diversas mallas metálicas. De esta forma puede ser visto como un tipo particular de hormigón armado, en cuanto a su comportamiento mecánico.

En 1887, se construyó un bote similar al de Lambot en Holanda, el que con casi 100 años de antigüedad, aún flota en el lago de Los Pelícanos, en el zoológico de Amsterdam. A partir de esta fecha y a principios de 1900, el ferrocemento se utilizó para construir pequeños botes de motor y barcos de río, incluyendo la primera embarcación de hormigón que utilizó el Gobierno de Estados Unidos, a la que se le dio el nombre de “Concreta”.

Durante la primera Guerra Mundial se construyeron barcos con este material, lo que permitió desarrollar y mejorar la técnica. Este impulso se debió a la escasez de materiales tradicionales.

A principios de los años cuarenta, el notable Ingeniero Arquitecto italiano, Pier Luigi Nervi revivió la idea original de Lambot al observar que reforzando el mortero con diversas capas de malla de alambre, se obtenía un material que presentaba extraordinarias características mecánicas, gran resistencia al impacto y gran capacidad de reflejar grieta[8]. A través de una serie de pruebas, estableció las características preliminares del material. Diseñó y construyó diversas techumbres que se conservan hasta nuestros días como modelos racionales y estéticos del diseño estructural y arquitectónico.

En 1958 se construyó en la ex Unión Soviética la primera estructura de ferrocemento con techo de bóveda sobre un centro comercial en Leningrado. Desde entonces en la URSS se han construido alrededor de diez millones de metros cuadrados de techumbres.

En 1959, el Sr. Sulherland, fue el pionero en el desarrollo de la industria de construcción de barcos con ferrocemento en Nueva Zelanda. Utilizando dos sacos de cemento y una cierta cantidad de malla de alambre 6 hexagonal construye un barco de recreo. Posteriormente forma una compañía llamada Ferrocement Ltda., dedicada a la construcción de más de 50 barcos pequeños.

En 1965, el “Awahree”, yate de ferrocemento de 16 m de largo, construido en Nueva Zelanda, da la vuelta al mundo sin sufrir daños serios. Desde entonces, el uso de las construcciones de ferrocemento ha ido en aumento en todo el mundo.

En 1971, la Ferrocement Marine Construction Ltda. construyó en Hong Kong un barco de ferrocemento llamado “Rosalyn I” con 26 m de largo y considerado como el más grande de los barcos pequeños de ferrocemento en el mundo.

En 1972, la Academia mundial de ciencias de Estados Unidos, se reunió y en 1973, emitió un informe que tuvo un gran impacto sobre la aplicación del ferrocemento. Lo identificó como un material de tecnología apropiada inadvertida, con amplio potencial de aplicaciones.

---

[8]Referencia: Ferrocemento, Una alternativa para la vivienda [En línea] <http://es.scribd.com/doc/39909007/Ferrocemento>.

En 1974, El Instituto Asiático de Tecnología (AIT) y la Academia de Ciencias de Estados Unidos reunidos en Bangkok, analizaron la utilidad del ferrocemento; participaron ingenieros, científicos, administradores y hombres de negocios. Este taller recomendó establecer un servicio internacional de información sobre el ferrocemento para recopilar, procesar y definir información. Y en 1975, el American Concrete Institute (ACI) forma su comité 549, para hacerlo posible.

En 1976, se funda el Centro Internacional de Información del Ferrocemento (IFIC), en el Instituto Asiático de Tecnología, en Bangkok, Tailandia. Actúa como un centro de recopilación de información sobre el ferrocemento y publica la revista “Journal of Ferrocement”, que originalmente fue publicada en Nueva Zelanda. Actualmente esta revista es el principal medio de publicación de dicho centro y la revista periodico más importante en lo que respecta a información sobre ferrocemento.

En 1979, la Unión Internacional de Laboratorios de Pruebas e Investigación de Materiales y Estructuras (RILEM) establece el comité 48-FC, para evaluar métodos de prueba para el ferrocemento.

En América Latina destacan estudios y aplicaciones hechas en Brasil, Cuba, Bolivia, Argentina y Chile.

En Brasil, se han hecho numerosos estudios que han usado el ferrocemento en el área de techumbres, servicios comunitarios, escuelas prefabricadas, una planta de agua, etc. También se han desarrollado industrias de prefabricados de ferrocemento en varias ciudades.

En Bolivia se han construido hoteles, cubiertas de estadios de grandes luces, viviendas individuales, etc.

3.2 El ferrocemento en Chile

En nuestro país, el desarrollo del ferrocemento está principalmente ubicado en la zona sur; en la parte marítima, y en el área habitacional donde se están desarrollando sistemas que están enfocados en la industria del prefabricado, como por ejemplo, la prefabricación de los distintos elementos que componen una vivienda. El sistema de prefabricado, conlleva un control de calidad muy eficiente, tanto en la industria con el proceso de fabricación, como también en la obra con la rapidez en el montaje; esto permite disminuir la cantidad de partidas en obra, lo que lleva a un costo relativamente menor en relación con los sistemas tradicionales.

El ferrocemento se aplica en la construcción de viviendas sociales y particulares, edificios de baja altura, escuelas, retenes de carabineros, gimnasios, postas, consultorios, sedes sociales, obras marítimas, entre muchas otras obras. Este desarrollo propio abarata los costos de construcción, ya que se basa en placas prefabricadas producidas en serie que aceleran los tiempos de construcción. Dada su eficiencia, muchas constructoras ya han incorporado esta innovación en sus procesos, diseños y faenas.

Los primeros usos del ferrocemento, fueron en embarcaciones de la zona de Valparaíso, donde se construyeron algunos barcos de pesca, no prosperando debido a dificultades económicas. En 1989, se reinicia en la ciudad de Puerto Montt, región de Los Lagos, la creación del primer astillero por la Empresa Ferrosur.

A partir de esa fecha, Ferrosur ha desarrollado esta tecnología construyendo todo tipo de embarcaciones de ferrocemento, ferrocemento-hormigón y hormigón, tales como: bodegas flotantes (para la industria salmonera), casas flotantes (ver Figura 3.1), muelles de hormigón, plantas de hielos flotantes, boyas, etc.

Figura 3.1:Bodega y vivienda construida por empresa Ferrosur en Puerto Montt.
Fuente: Ferrocemento. Una alternativa para la vivienda [En línea].

En vivienda, existen intentos aislados de aplicaciones en la zona central, y principalmente en la zona sur del país, como es el caso de Valdivia y Temuco, sin embargo, el centro del desarrollo se sitúa en la zona de Concepción. En el año 1994, se desarrolla el primer proyecto Fontec (Figura 3.2) que dio como resultado una vivienda prefabricada de 46 m^2, en un piso, con paneles doble cámara de aire en ferrocemento.

Figura 3.2: Vivienda prefabricada proyecto Fontec 1994 en Concepción.
Fuente: Ferrocemento. Una alternativa para la vivienda [En línea].

A partir de este proyecto se han construido viviendas en la zona de Coronel, Chillán, Talca y Concepción. Destaca la Empresa Pablo Torres de Chillán (ver Figura 3.3), que ha construido del orden de 200 viviendas en los últimos dos años y la Empresa Constructora Rivano.

Además, este sistema constructivo se usó como solución definitiva para la reconstrucción de viviendas en zonas afectadas por el terremoto del 2010, tales como Talca, Cobquecura, Chillán y Concepción (ver Figura 3.4).

Figura 3.3: Vivienda subsidio rural en Chillán-Empresa Pablo Torres.
Fuente: Ferrocemento. Una alternativa para la vivienda [En línea].

Figura 3.4: Proyecto reconstrucción fachada continua en Talca.
Fuente: Ferrocemento. Viviendas industrializadas definitivas en hormigón. PDF.

En general, el ferrocemento se considera como una tecnología sustentable con múltiples atributos y beneficios en el área habitacional, tales como:

- Presenta excelentes condiciones de habitabilidad y comodidad.
- Buen aislamiento térmico, acústico, resistencia al impacto, al fuego, a la abrasión e infiltración.
- Buena resistencia al agrietamiento, lo que aumenta su impermeabilidad y resistencia a la corrosión.
- Resistencia sísmica.
- Sirve para realizar refuerzos o reparaciones.
- Materiales básicos disponibles en obra.
- Puede fabricarse de variadas formas.
- Puede ser usado con otros materiales.
- Menor tiempo de montaje, que implica un menor plazo de entrega.
- Bajo costo de mantención.
- No requiere de mano de obra calificada.
- Montaje manual o mecanizado.

Actualmente, la industria de prefabricados en ferrocemento es una excelente alternativa para nuestro país, se le considera una solución integral y versátil, que cumple con la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), permitiendo la construcción de viviendas básicas y viviendas de alto estándar, en cualquier lugar del país.

3.3 Materiales que componen el ferrocemento

El Ferrocemento es una delgada capa de mortero fuertemente armada con malla electrosoldada de pequeño diámetro que sirve de armado y le da la forma, también puede llevar como refuerzo una malla difusa (malla hexagonal). Este material es una forma especial de mortero reforzado.

A continuación, serán descritos en detalle, los elementos que constituyen el ferrocemento.

3.3.1 Mortero

El mortero utilizado para la fabricación del ferrocemento, es una mezcla de cemento hidráulico y arena, al que eventualmente pueden añadirse aditivos plastificantes que mejoran sus propiedades.

Las propiedades del mortero dependen del tipo y la calidad de los materiales que lo constituyen, la proporción en que estos son mezclados, las condiciones de preparación y los factores ambientales.

Este material debe cumplir con ciertos requerimientos, como por ejemplo, tener la mayor resistencia posible a la compresión; impermeabilidad, dureza y resistencia a ataques químicos; otro requisito, es la consistencia de la mezcla, la cual debe permanecer uniforme, compacta y sin poros, independientemente de la concentración de la armadura de refuerzo, ya que los agentes agresivos del medio ambiente no son solo mecánicos que rompen y desgastan el mortero, sino que también existen los agentes físico-químicos que provocan la corrosión de las armaduras, ante lo cual el mortero tiene un papel fundamental.

3.3.1.1 Cemento

La NCh. 148 of. 68 "Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales", define el cemento como "Un material pulverizado que, por adición de una cantidad conveniente de agua, forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire”.

Existen varios tipos de cementos nacionales descritos en la NCh. 148 of. 68, y clasificados según su composición y resistencia (ver Tabla III.1 y Tabla III.2).

Cemento Portland

Este producto se obtiene de la molienda conjunta de clinker[9] y yeso, y que puede aceptar hasta un 3% de materias extrañas, excluido el sulfato de calcio hidratado.

Cemento Siderúrgico

Es un cemento elaborado sobre la base de clínker, escoria básica granulada de alto horno y yeso, y que puede aceptar hasta un 3% de materias extrañas, excluido el sulfato de calcio hidratado. Algunas de sus características son:

- Alta resistencia al ataque de agresivos químicos y al agua de mar.
- Desarrollo de resistencias normales.
- Altas resistencias finales.
- Bajo calor de hidratación.
- Buena protección a las armaduras.
- Estabilidad en presencia de áridos reactivos.
- Mayor tiempo de operación.
- Color de terminación de los hormigones más claros.
- Fraguado y endurecimiento más lento.
- Requiere de un curado más cuidadoso a tempranas edades, por pérdida prematura de humedad.

Existe el cemento siderúrgico portland, cuya composición entrará escoria básica granulada de alto horno en una porción no superior al 30% en peso del producto terminado. Y el cemento siderúrgico, cuya composición entrará escoria básica granulada de alto horno en una porción comprendida entre el 30% y el 75% del producto terminado.

[9]Clinker o clinquer: Este producto que está principalmente constituido por silicatos cálcicos. Se obtiene por calentamiento hasta una temperatura que no podrá ser inferiora la temperatura de fusión insipiente de una mezcla homogénea finamente molida en proporciones adecuadas, formadas principalmente por óxidos de calcio (CaO) y silício (SiO_2), y por óxidos de aluminio (Al_2O_3) y fierro (Fe_2O_3) en proporciones menores.

Cemento Puzolánico

Es el producto que se obtiene de la molienda conjunta de clinquer, puzolana[10]y yeso, y que puede aceptar hasta un 3% de materias extrañas, excluido el sulfato de calcio hidratado. Sus características principales son:

- Menor calor de hidratación.
- Mayor resistencia química a agentes agresivos.
- Menor retracción.
- Menor velocidad de fraguado.
- Menor velocidad de endurecimiento.
- Mayores resistencias finales.

Existe el cemento portland puzolánico, cuya composición entrará puzolana en una porción no superior al 30% en peso del producto terminado. Y el cemento puzolánico, cuya composición entrará puzolana en una porción comprendida entre el 30% y el 50% del producto terminado.

Cemento con agregado tipo A

Es el producto que se obtiene de la molienda conjunta de clinquer, agregado tipo A[11] y yeso, que puede aceptar hasta un 3% de materias extrañas, excluido el sulfato de calcio hidratado.

Existe el cemento con agregado tipo A portland, cuya composición entrará agregado tipo A, en una porción no superior al 30% en peso del producto terminado. Y el cemento con agregado tipo A, cuya composición entrará agregado tipo A, en una porción comprendida entre el 30% y el 50% del producto terminado.

[10]Puzolana: Fina ceniza volcánica.
[11]Agregado tipo A:Es una mezcla de sustancias compuestas de un material calcáreo-arcilloso.

Cemento con fines especiales

Es el cemento en cuya composición entras los productos que se emplean normalmente en la fabricación de cementos, cuyos requisitos y propiedades se establecen por acuerdo previo entre productor y consumidor para cumplir determinados fines.

Denominación	Clinker	Puzolana	Escoria
Pórtland	100%	-	-
Pórtland Puzolánico	= 70%	= 30%	-
Pórtland Siderúrgico	= 70%	-	= 30%
Puzolánico	50-70%	30-50%	-
Siderúrgico	25-70%	-	30-75%

Tabla III.1: Clasificación de los cementos según su composición.
Fuente: <http://www3.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/ClasifT2.htm>.

Grado	Tiempo Fraguado		Resistencias Mínimas			
			Compresión		Tracción	
	Inicial (min.)	Final (máx.)	7 días kg/cm^2	287 días kg/cm^2	7 días kg/cm^2	28 días kg/cm^2
Corriente	60 min.	12 hr.	180	250	35	45
Alta	45 min.	10 hr.	250	350	45	55

Tabla III.2: Características especificadas para los cementos nacionales.
Fuente: Tabla 2. NCh. 148 Of. 68.

En la construcción de elementos de ferrocemento, el cemento Pórtland es el más comúnmente utilizado, debido a que es el representante más genuino de los conglomerantes hidráulicos.

El compuesto principal de este cemento es el clinker, al cual se le adicionan productos naturales o artificiales, que permiten obtener cementos Portland especiales que, además de mantener las propiedades típicas del Pórtland puro

(fraguado y resistencia), poseen propiedades especialmente relacionadas con la durabilidad y la resistencia química. Entre los productos más conocidos y utilizados están las puzolanas, las cenizas volantes y las escorias básicas granuladas.

Estos tipos de cementos Portland fabricados en Chile, pueden ser utilizados si se necesitan propiedades especiales tales como una alta resistencia a tempranas edades, o una buena resistencia al ataque de los sulfatos al ser usados en zonas marinas.

3.3.1.2 Áridos

Todos los requerimientos granulométricos que debe cumplir la arena para ser utilizada en morteros y hormigones, están descritos en la NCh. 163 Of. 1979 "Áridos para morteros y hormigones. Requisitos generales".

Los áridos corresponden a partículas duras, de forma y tamaño estable, limpio y libre de terrones; partículas blandas, arcillas, sales e impurezas orgánicas; u otras sustancias que por su origen o cantidad afectan la resistencia y la durabilidad de morteros y hormigones[12].

En la construcción de elementos de ferrocemento, la graduación de la arena deberá ser tal, que un mortero producido en las proporciones especificadas (óptima relación agua/cemento) y con una distribución uniforme de los áridos, tendrá una alta densidad y muy buena trabajabilidad, de modo que el mortero pueda penetrar en el sistema de refuerzo, sin segregarse y sin utilizar un alto contenido de agua en la mezcla.

Normalmente se utilizan partículas de arena de tamaño máximo aproximado de 5 mm; dependiendo del espesor del elemento y la densidad de la armadura, puede ser necesario limitar el diámetro a valores inferiores a 4 mm.

[12]Definición de Árido, según la NCh. 163 Of. 1979 "Áridos para morteros y hormigones. Requisitos generales".

Es importante, tener cuidado con la elección del agregado, ya que el mortero puede ver afectada su durabilidad y comportamiento estructural, al utilizar arenas blandas que pueden verse seriamente afectadas por la abrasión y/o reacciones químicas, o al usar un material poroso que permitiría la entrada de humedad dentro de secciones muy delgadas.

Por otro lado, cabe mencionar que los áridos que constituyen el mortero cumplen dos funciones muy importantes, ya que conforman un esqueleto rígido, que aminora las deformaciones propias del conglomerante, además de disminuir el costo del mortero al ocupar un gran volumen dentro de la masa a un costo comparativamente bajo.

3.3.1.3 Agua

La calidad del agua es de vital importancia para la fabricación de morteros. Las impurezas del agua pueden interferir en el fraguado del cemento y afectar adversamente la resistencia o provocar manchado en la superficie, y así mismo provocar la corrosión del refuerzo. Por ende, el agua debe cumplir con la calidad determinada en la NCh. 1498 Of. 820 “Hormigón - Agua de Amasado - Requisitos”.

El agua puede contener impurezas tales como barro, lama, ácidos, sales solubles, materiales vegetales en descomposición y muchas otras sustancias orgánicas que probablemente se encuentren en el agua potable de buena calidad. Por lo tanto, deben tomarse las precauciones necesarias antes de usar agua que contenga estas impurezas. En ningún caso debe usarse agua de mar para mezclar el mortero, ya que aumentará el riesgo de corrosión de la malla y del refuerzo. El agua de los servicios públicos (agua potable) está considerada como satisfactoria y no requiere ningún tratamiento adicional

Generalmente en la fabricación de ferrocemento, se utiliza el agua de los servicios públicos (agua potable), ya que se considerada como apta, y no requiere ningún tratamiento adicional.

3.3.1.4 Aditivos

Existen muchos tipos de aditivos que pueden utilizarse en la construcción de ferrocemento, los cuales deben de cumplir con la NCh. 2281 Of. 1995; por otro lado, el uso de aditivos se basa en los datos obtenidos de ensayos previamente realizados.

La mayor parte de los aditivos usados en el ferrocemento, se utilizan para mejorar la trabajabilidad, reducir la exigencia de agua, y para prolongar el fraguado del mortero. Siendo los aditivos más utilizados los plastificantes y los retardadores.

- Plastificantes o reductores de agua:
  Son aquellos que actúan sobre el mortero fresco y le proporcionan mejor trabajabilidad, lo que posibilita reducir la cantidad de agua necesaria para el mezclado, con la consecuente mejoría en la resistencia mecánica, impermeabilidad y durabilidad del mortero. A su vez, los aditivos plastificantes pueden ser *Superplastificantes* y *Automoldeables*; los primeros contienen productos químicos de elevado poder dispersante, que permiten la obtención de morteros fluidos, y los segundos, son aditivos con una significativa reducción de la cantidad de agua (del 25 al 35%), que posibilitan el aumento de la resistencia desde las primeras edades.

- Retardadores:
  Son los que retardan la reacción de hidratación. Su uso depende de las condiciones particulares de la construcción y del medio ambiente.

También existen aditivos que esencialmente se utilizan para disminuir el gasto de cemento, mejorar las características físico-mecánicas y acelerar el endurecimiento de los morteros. Entre estos aditivos podemos encontrar:

- Aditivos Minerales:

  Disminuyen el gasto de cemento. Es posible utilizar polvo de ceniza, que proviene de la combustión del carbón de piedra, escorias granuladas desprendidas de un alto horno, arena cuarzosa molida y polvo de piedra.

- Aditivos Químicos:

  Estos pueden dividirse en función de las características que se introducen en el mortero.

  - Plastificantes o reductores de agua[13].
  - Aceleradores:

    Aceleran la reacción del fraguado del cemento.
  - Retardadores[14].
  - Incorporadores de aire:

    Promueven la formación de un número extremadamente elevado de minúsculas burbujas de aire en el mortero, y le confiere mejor trabajabilidad, impermeabilidad y resistencia al intemperismo.
  - Expansores:

    Son aquellos empleados para provocar una expansión controlada de la pasta de cemento con el objetivo de compensar en general el efecto de retracción, por ejemplo, en juntas fundidas en el lugar.
  - Impermeabilizantes:

    Son aditivos utilizados para disminuir la permeabilidad del mortero reduciendo los vacíos. Contiene agentes hidrófugos.

3.3.2 Armadura

Inicialmente, el refuerzo utilizado en el ferrocemento es para conformar la estructura y soportar el mortero sin fraguar (en el caso de no usar encofrado), posteriormente la armadura absorbe los esfuerzos de tracción que el mortero no es capaz de soportar por sí solo, favoreciendo el surgimiento de fisuras poco

[13] Aditivo plastificante, concepto definido al inicio del item 3.3.1.4.
[14] Aditivo plastificante, concepto definido al inicio del item 3.3.1.4.

espaciadas. El comportamiento del ferrocemento depende en gran medida del tipo, la cantidad, orientación y resistencia del refuerzo; además, su comportamiento al agrietamiento, dependerá del grado de concentración, y de las dimensiones de las mallas.

3.3.2.1 Armadura difusa

Está constituida por alambres de diámetros pequeños, formando mallas con espaciamiento pequeño, las cuales se distribuyen uniformemente dentro del mortero.

Este tipo de mallas es uno de los más usados y de mayor disponibilidad comercial en el mercado. Las más comunes son la malla de gallinero hexagonal con abertura de una pulgada o algunas mallas electrosoldadas. Entre los tipos de armadura difusa están:

<u>Malla de alambre de tejido hexagonal (malla de gallinero)</u>

Esta malla tiene un entretejido que posee una junta entrelazada entre cada alambre individual. Usualmente está confeccionada con alambres de baja resistencia (para facilitar su manufactura) y, en teoría, tiene una resistencia menos efectiva que la malla soldada. (ver Figura 3.5 y Tabla III.3)

Una de las virtudes más notables del entretejido hexagonal, es que puede doblarse fácilmente, y en algunos tipos de moldes se adecúa perfectamente. Otra cualidad es que puede ser unido o cocido a capas adyacentes de entretejido. El borde extremo de cada ancho de malla tiene dos alambres longitudinales que ayudan a eliminar terminaciones sueltas y facilitan la unión simple de los bordes.

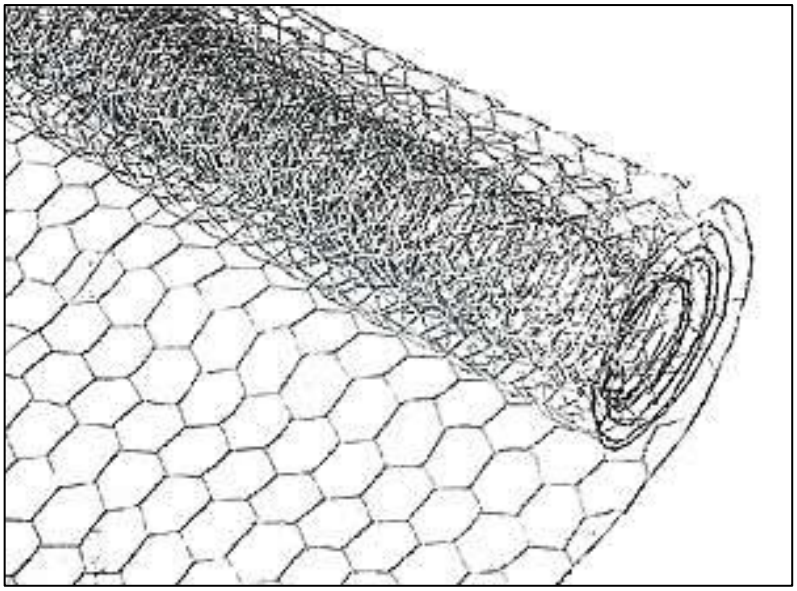

Figura 3.5: Malla hexagonal galvanizada.
Fuente: Elaboración propia.

Tipo	Apertura Nom. (pulg)	Peso (Kg x m^2) (aprox.)	Diámetro (mm)	Carga ruptura malla (kg)
¾” x 22	3/4	0,36	0,67	11
1” x 21	1	0,36	0,76	14
1 ½” x 20	1,5	0,30	0,84	17

Tabla III.3: Características malla hexagonal[15].
Fuente: Elaboración propia.

Malla de alambre de tejido cuadrado

La malla tejida o entrelazada consiste básicamente, en un ensamble o entrelazado de alambres perpendiculares, formando perímetros cuadrados entre ellos, y sus intersecciones no están rígidamente contactadas. La malla tejida simple y cuadrada se consideró, en un principio, inadecuada para la construcción de elementos en ferrocemento, ya que, sus alambres no estaban

[15]Detalle: http://inchalam.bekaert.com.

rectos. Sin embargo, las pruebas indican que esta malla es tan buena o mejor, que la malla soldada o la hexagonal. Una de las dificultades encontradas en su uso es que es muy elástica y es difícil de mantener en posición, a pesar de que toma la forma de curvas compuestas, cuando es estirada.

Malla de metal desplegado

Es una malla metálica en forma de rombos, la cual es fabricada mediante el proceso de corte y estiramiento a partir de una plancha de metal. Este producto es fabricado en una sola pieza. No presenta uniones ni soldaduras, pudiendo ser cortado o darle diferentes formas sin ningún inconveniente. Esta malla sirve para sostener estuco y enlucido, además, se usa en terminaciones para rejas, balcones, barandas y escaleras.

Malla electrosoldada de tejido cuadrado o rectangular

En la cual un contorno rectangular es formado por alambres perpendiculares que se intersectan, y cuya intersección se encuentra soldada (ver Figura 3.6 y Tabla III.4). Desafortunadamente, las mallas electrosoldadas tienen sus desventajas; éstas incluyen la posibilidad de puntos débiles en las intersecciones y también una moldeabilidad insuficiente. Los puntos débiles son producto de una soldadura inadecuada, durante la manufactura de la malla. Estas desventajas no pueden ser superadas, aun cuando se usa un alambre de acero de alta resistencia a la tensión.

La malla soldada carece de moldeabilidad, por lo tanto, es incapaz de tomar las curvaturas que pueda poseer una superficie (ejemplo: casco de un barco); sólo será útil para superficies planas, sin curvaturas.

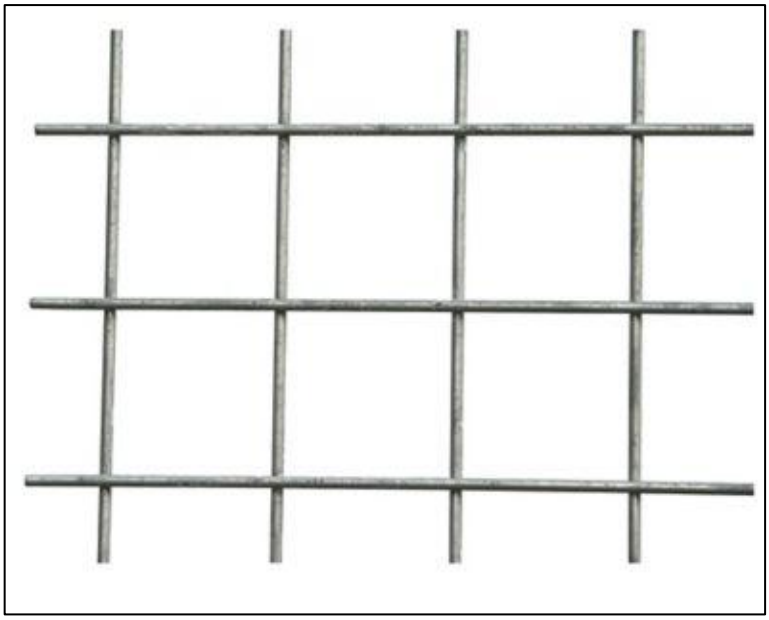

Figura 3.6: Esquema típico malla electrosoldada.
Fuente: Elaboración propia.

Tipo de Malla	Distancia barras		Diámetro barras		Sección de acero		Peso Malla (kg)
	Longit. (mm)	Transv. (mm)	Longit. (mm)	Transv. (mm)	Longit. (cm^2/m)	Transv. (cm^2/m)	
C 139	100	100	4,20	4,20	1,39	1,39	28,34
C 188	150	150	6,00	6,00	1,88	1,88	39,03
C 196	100	100	5,00	5,00	1,96	1,96	40,04
C 257	150	150	7,00	7,00	2,57	2,57	53,10

Tabla III.4: Características malla ACMA 139-C[16].
Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.2 Armadura discreta

Cuando su uso está limitado a aplicaciones artesanales, sin uso de moldaje, la armadura discreta sirve de esqueleto, y está formada por barras de acero de pequeño diámetro sobre las cuales se sujeta la armadura difusa. En el caso de que tenga una función estructura, la armadura discreta también sirve de

[16] Detalle: http://www.dsi-chile.com

armadura suplementaria que contribuye a la resistencia, y está constituida por barras de diámetro 4 mm, 6 mm, 8 mm y 12 mm.

3.4 Propiedades mecánicas del ferrocemento

El Ferrocemento, es una delgada capa de mortero fuertemente armada con malla electrosoldada de pequeño diámetro, que sirve de armado y le da la forma, y también puede llevar como refuerzo una malla difusa (malla hexagonal). Este material es una forma especial de mortero reforzado.

En los últimos años, se han desarrollado varias investigaciones[17], para determinar las características físico-mecánicas y el comportamiento del ferrocemento, bajo distintos tipos de cargas. Debido a la escasa existencia de normas internacionales para la realización de los ensayos, no se pueden establecer valores de diseño para los diversos métodos, equipos y dimensiones de probetas que han utilizado los investigadores. Además, hasta ahora hay algunas de sus propiedades que no han sido adecuadamente investigadas, y no se dispone de la información técnica suficiente para sugerir y elaborar fórmulas de diseño aceptables. Sin embargo, los datos obtenidos a partir de estas investigaciones, determinan un rango de valores que pueden emplearse como criterio a la hora de realizar aproximaciones tentativas de diseño.

Muchas de las propiedades del ferrocemento se derivan de contener una cantidad relativamente alta de refuerzo, constituido por mallas de alambre de pequeño diámetro, distribuidas en toda la sección. Entre estas propiedades destacan su gran elasticidad y su resistencia al agrietamiento, la cual es una de las más importantes, ya que permite que este sea considerado como un material homogéneo y casi elástico para determinados regímenes de carga [Wainshtok,1998]. Destacan también su alta capacidad de resistencia axial a tracción, alta resistencia a la compresión, alta flexibilidad y alta resistencia al

[17] La distintas investigaciones sobre las propiedades del ferrocemento, han sido citadas a lo largo de este capítulo, y mencionadas en la bibliografía de este trabajo.

impacto. A continuación, las propiedades asociadas al ferrocemento serán descritas con mayor detalle.

3.4.1 Módulo de elasticidad

Los estudios realizados sobre ferrocemento, indican que el módulo de elasticidad en tracción, se puede obtener según la ley de los materiales compuestos [Wainshtok,1998]:

$$E_{ft} = E_b V_b + E_a V_a + E_A V_A \text{ (MPa)} \tag{3.1}$$

Donde:

E_{ft} = Módulo del ferrocemento en tracción (MPa).

E_b= Módulo del ferrocemento del mortero (MPa).

V_b = Fracción del volumen del mortero (m^3).

E_a= Módulo del ferrocemento del acero en mallas (MPa).

V_a= Fracción del volumen del acero en mallas (m^3).

E_A= Módulo del ferrocemento del acero en barras (MPa).

V_A= Fracción del volumen del acero en barras (m^3).

Cuando el mortero se agrieta bajo la carga actuante, el módulo de elasticidad se reduce a:

$$E_{ft} = E_a V_a + E_A V_A \text{ (MPa)} \tag{3.2}$$

Walkus[18] determinó un módulo de 21.000 MPa para valores de superficie específica[19] S = 1,62 cm^{-1} y de 3.300 MPa después del agrietamiento. Bezukladov propone que cuando no se tengan otros datos se utilicen 5.000 MPa en tracción y 20.000 MPa en compresión para un desplazamiento menor a 2 cm. Rao[20] y Pama[21], dan valores del módulo a compresión del orden de 30.000 MPa [Wainshtok,1998].

Con respecto al módulo de elasticidad en flexión, para una sección rectangular y teniendo en cuenta la diferencia entre el módulo de elasticidad del ferrocemento en tracción y compresión, y considerando que se cumple la ley de Hook se tiene:

$$E_r = \frac{E_{ft}E_{fc}}{(\sqrt{E_{ft}} + \sqrt{E_{fc}})^2} \text{ (MPa)} \qquad (3.3)$$

Donde:

E_r = Módulo de elasticidad reducido a flexión (MPa).

E_{ft} = Módulo de elasticidad a la tracción (MPa).

E_{fc} = Módulo de elasticidad a la compresión (MPa).

Bezukladov, en general plantea valores para Er de 25.000 MPa, pero sugiere para cargas de corta duración: Er = 20.000 MPa, y para cargas de larga

[18] Walkus, B.R.; Behaviour of Ferrocement in Bending. Journal of Structural Engineering, Vol. 3, no. 3, October, 1975.
[19] Superficie específica: Es una medida aplicada a sólidos con granos o partículas. Es el área de superficie por unidad de masa. La medida es importante porque muchos procesos físicos y químicos tienen lugar en la superficie de los sólidos.
[20] Kumar, P.R.; Rao, C.B.K.; Interaction Curve for High Performance Ferrocement in Biaxial State of Tension. In: Journal of Asian Architecture and Building Engineering, November 2005, 475-481.
[21] Pama, B. K. 1991. Ferrocemento. 1° ed. México. Instituto mexicano del cemento y del concreto. 227p.

duración: Er = 1.000 MPa, coincidiendo con valores entregados por Wainshtok, donde la relación $\frac{E_{fc}}{E_{ft}}$ tiene un valor cercano a uno cuando es sometida a flexión y antes del agrietamiento, mientras que la misma relación tiene un valor de tres a cuatro después del agrietamiento [Wainshtok,1998].

3.4.2 Resistencia a la tracción

El ferrocemento tiene una mayor resistencia a la tracción debido a su alto contenido de acero y a la gran dispersión de éste. Cuando un elemento de ferrocemento es sometido a esfuerzos de tracción, se pueden observar tres niveles de esfuerzo.

A continuación, se describen estos tres niveles representados en la curva esfuerzo-deformación de la Figura 3.7 [Wainshtok,1998].

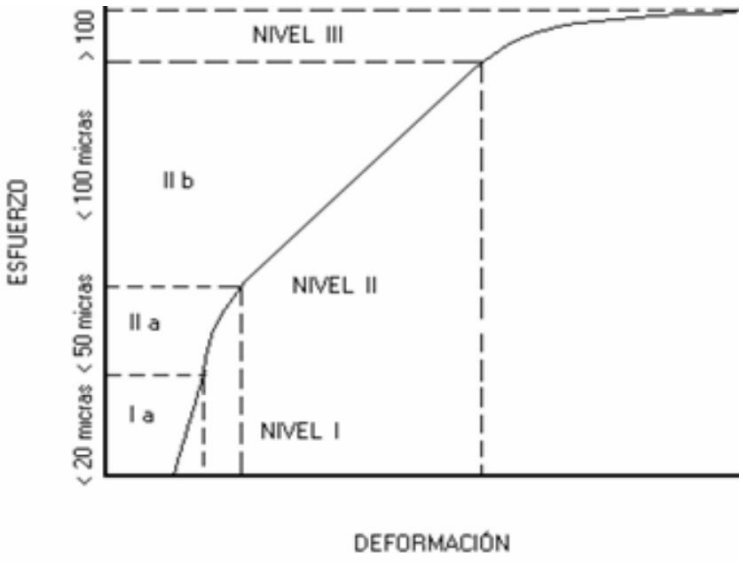

Figura 3.7: Curva esfuerzo-deformación del ferrocemento.
Fuente: Conceptos generales sobre Ferrocemento. Palmira 2008.

Rango elástico

En el Nivel I, la curva de esfuerzo-deformación es prácticamente lineal, no se observa la formación de grietas, y el material es totalmente impermeable. Walkus limita este estado hasta una deformación unitaria de 200 x 10^{-6}, y ancho de fisuras hasta 20 µ. Algunos autores localizan en esa transición la formación de la primera fisura microscópica convencional, no siempre visible a simple vista ni con dispositivos ópticos de poca resolución [Wainshtok,1998].

Rango de agrietamiento

En este estado la curva esfuerzo-deformación se desvía de la linealidad. A partir de la primera grieta, aparece un número creciente de éstas, las cuales crecen lentamente desde el principio de sus aberturas hasta que el número de grietas se estabiliza; luego, las grietas comienzan a aumentar rápidamente. Walkus limita este estado desde la ocurrencia de la primera grieta de 20 µ hasta una abertura de 100 µ, y una deformación unitaria de 645 x 10^{-5} [Wainshtok 1998].

Rango de fluencia

En el Nivel III, han aparecido el máximo número de grietas, y el aumento de las deformaciones se debe al crecimiento en la abertura de las mismas, hasta que el elemento falla por la ruptura del acero. La acción combinada del mortero y el refuerzo se mantiene hasta un ancho de grietas de aproximadamente 100 µ, posteriormente el refuerzo soporta todas las cargas de tracción, provocando el colapso del elemento [Wainshtok, 1998; Olvera, 2002; Paul y Pama, 1992].

3.4.3 Resistencia a la compresión

La resistencia del ferrocemento en compresión, está dada fundamentalmente por el mortero en proporción directa al área de su sección transversal. Las variaciones de la superficie específica y el factor de refuerzo no ejercen

influencia apreciable en la resistencia a compresión del ferrocemento. En la Figura 3.8 se observan las curvas esfuerzo-deformación unitarias a compresión del mortero y el ferrocemento, obtenida de ensayos experimentales [Wainshtok 1998].

Bezukladov, Paul y Pama, sugieren tomar como resistencia última a compresión del ferrocemento, el valor de la resistencia del mortero afectado por un coeficiente igual a 0,85. Si se aplica el criterio de las tensiones permisibles, Naaman[22] sugiere un coeficiente de 0,45 para las tensiones de compresión, y Petroni sugiere valores máximos entre 12 y 14 MPa, siendo las dos recomendaciones casi equivalentes en la práctica [Wainshtok 1998].

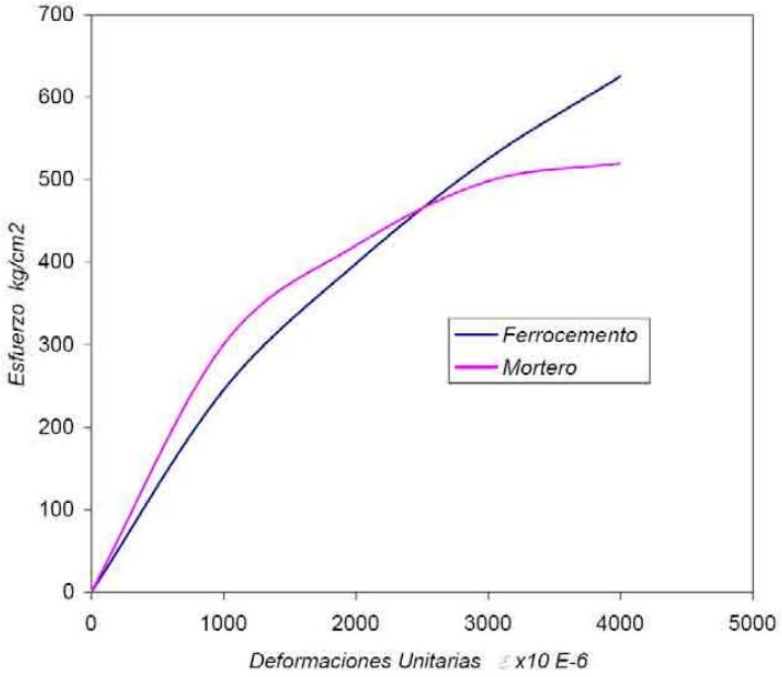

Figura 3.8: Curva esfuerzo-deformación unitaria de mortero y ferrocemento en compresión axial.
Fuente: Conceptos generales sobre Ferrocemento. Palmira 2008.

[22] Naaman, A.E.; Ferrocement and Laminated Cementitious Composites. Techno Press-3000, 1st edition, 2000.

3.4.4 Resistencia al corte

Existen pocos estudios de ferrocemento que han incluido la evaluación de la resistencia al cortante. Al-Sulaimini et al, 1991, estudiaron el comportamiento a cortante de vigas en cajón bajo cargas de flexión (ver Figura 3.9), usando como principales parámetros, la cantidad de refuerzo con mallas de alambre tanto en red como en estribo, y la relación separación de cortante–profundidad de la viga (a/h).

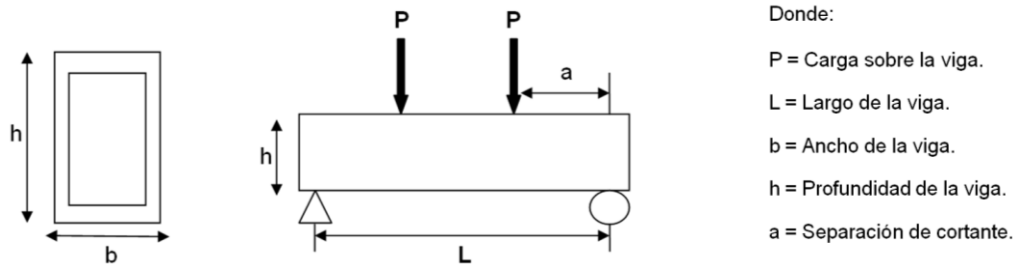

Figura 3.9: Configuración de la prueba para resistencia a corte.
Fuente: Al-Sulaimini et al, 1991.

Los resultados del estudio, mostraron que la fuerza cortante última y de rotura se incrementan con el aumento de las mallas de alambre en red, así como por la colocación de mallas de alambre como estribo; un incremento también es producido por la disminución de la relación a/h. A partir de estudios experimentales[23], se elaboró una ecuación empírica (ecuación 3.4), para predecir la resistencia a cortante en vigas de cajón de ferrocemento [Al-Sulaimini et al, 1991].

$$v_{cr} = \left(0{,}27+4V_f^{0{,}65}\right)\left(f_c^{'}\ \frac{h}{a}\right)^{0{,}65} \qquad (3.4)$$

[23] Al-Sulaimani, G.J.; Basunbul, J.A.; Mousselhy, E.A. 1991. Shear Behavior of Ferrocement Box Beams. In: Cement & Concrete Composites, 13, 29-36.

Donde:

V_{cr} = Esfuerzo cortante.

V_f = Total de refuerzo con malla de alambre en la sección del estribo.

$f_c^{\prime}$ = Resistencia el mortero.

h/a = Relación profundidad-separación de cortante.

Ahmad et al, 1995[24], estudiaron el comportamiento cortante de vigas canal bajo cargas transversales (Figura 3.10). Los resultados indicaron que el agrietamiento y la resistencia última a cortante se incrementan con el aumento del volumen de la malla de alambre y de la resistencia del mortero (ecuación 3.5), y decrece con la disminución de la relación separación de cortante – profundidad; ellos propusieron un modelo computacional basado en el criterio de agrietamiento relacionado con el esfuerzo combinado, y la resistencia a tensión del ferrocemento (ecuaciones 3.6 y 3.7), así como una expresión empírica para estimar la resistencia a corte (ecuación 3.8) [Ahmad et al. 1995].

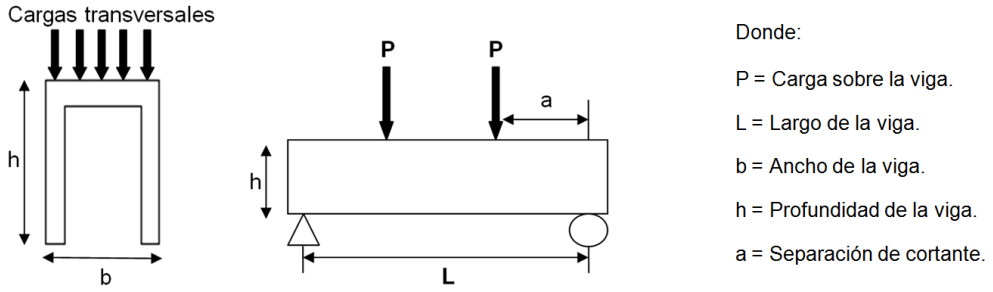

Figura 3.10: Dimensiones de los especímenes y configuración de la carga.
Fuente: Ahmad et al, 1995.

[24] Ahmad, S.F.; Lodi, S.H.; Qureshi, J. 1995. Shear Behavior of Ferrocement Thin Webbed Sections. In: Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 5, pp969-979.

$$V_f = \frac{\pi\, d_b^2\ (N_f\, b_f + N_w\, h)}{4D\left(b_f t_f + 2h\, t_w - 2 t_f t_w\right)} \tag{3.5}$$

Donde:

V_f = Efecto del volumen de refuerzo

D = Diámetro de la abertura de la grieta.

d_b = Diámetro del alambre de la malla.

N_f = Número de capas de mallas en estribo.

N_w = Número de capas de mallas en red.

b_f = Ancho del estribo.

t_f = Espesor del estribo.

t_w =Espesor de la red.

h = Altura de la viga.

$$f_t' = 24{,}52\ S_L + f_t \tag{3.6}$$

$$f_r' = 280{,}2\ S_L + f_r \tag{3.7}$$

Donde:

f_t' = Resistencia a tensión del ferrocemento.

f_r' = Resistencia a tensión del mortero.

f_t = Módulo de rotura del ferrocemento.

f_r = Módulo de rotura del mortero.

S_L = Superficie específica del refuerzo.

$$v_{cr} = 2{,}65 \left(f_c' \frac{h}{a} V_f\right)^{0{,}355} \qquad (3.8)$$

Donde:

V_{cr} = Esfuerzo cortante.

V_f = Fracción de volumen de refuerzo con malla de alambre.

f_c' = Resistencia el mortero.

h/a = Relación profundidad-separación de cortante.

3.4.5 Resistencia a la flexión

Una de las solicitaciones más comunes en los elementos estructurales es la flexión, por ello el interés de su estudio. El análisis del ferrocemento a flexión puede llevarse a cabo usando la propiedad del material compuesto, y alternativamente, la teoría tradicional del hormigón armado para las diferentes etapas de carga. El acero del armazón que ayuda a dar la figura y forma adecuada, se coloca en dirección longitudinal y transversal con separaciones más anchas; la parte longitudinal prácticamente no tiene contribución dentro del rango elástico debido a su proximidad al centro de gravedad de la sección. Sin embargo, en la condición última tiene una contribución significativa al resistir el momento último siempre que no ocurra pérdida de adherencia entre el mortero y la varilla de acero.

En el ferrocemento, se supone que una sección transversal que era plana antes de la carga, permanece plana después de la carga, y la deformación es proporcional al esfuerzo. Las deformaciones de las fibras de toda la sección transversal bajo esfuerzo, varían linealmente con respecto a su distancia con el eje neutro.

Al analizar el diagrama carga-deformación de un elemento sometido a flexión simple, se observa que es aproximadamente trilineal y se pueden apreciar tres

zonas de comportamiento bien definidas: elástica, elasto-plástica y plástica, como se muestra en la Figura 3.11 [Wainshtok 1998].

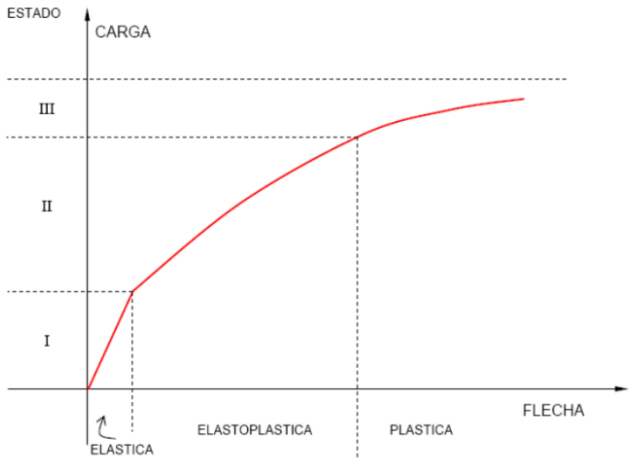

Figura 3.11: Diagrama carga-flecha típico de elemento a flexión.
Fuente: Conceptos generales sobre Ferrocemento. Palmira 2008.

Zona Elástica (Estado I)

En el caso de tracción simple, el ferrocemento se comporta como un material elástico hasta la formación de la primera fisura, cuando ocurre una sensible disminución de rigidez en el elemento flexionado, identificado por la deflexión del diagrama carga-flecha [Wainshtok 1998].

Zona Elasto-plástica (Estado II)

En la siguiente zona el comportamiento pasa a ser elasto-plástico, ocurriendo una multiplicación del número de fisuras acompañado de un aumento pequeño, pero progresivo de la abertura de las mismas. El diagrama carga-flecha se aproxima bastante a una línea recta [Wainshtok 1998].

Zona Plástica (Estado III)

En la fase final o de falla, el comportamiento del material es claramente no lineal, ocurriendo un rápido aumento de las flechas, y un acentuado aumento del ancho de las grietas hasta que ocurre la falla. En este estado se considera que toda la fuerza de tracción la toma el acero [Wainshtok 1998].

La resistencia del ferrocemento a la flexión depende no solamente de la superficie específica, sino también del tipo de malla, su orientación y su geometría intrínseca, así como la presencia o no del acero de esqueleto [Wainshtok 1998].

La resistencia del ferrocemento a la flexión depende no solamente de la superficie específica, sino también del tipo de malla, su orientación y su geometría intrínseca así como la presencia o no del acero de esqueleto [Wainshtok 1998].

3.4.6 Comportamiento al agrietamiento

La resistencia al agrietamiento es el indicador fundamental de la solidez y la seguridad de las estructuras de hormigón y hormigón armado.

El mecanismo básico de falla del mortero y el hormigón cuando son sometidos a cargas, sucede a través del inicio de propagación de pequeñas grietas que se extienden e interconectan, hasta que toda la estructura interna esté completamente quebrada. Los diferentes estados de la formación de una grieta en un material compuesto como el ferrocemento, puede ser aproximadamente ilustrado por el clásico mecanismo de agrietamiento del hormigón armado, suponiendo que los esfuerzos de tensión en el mortero alrededor del acero están uniformemente distribuidos en la sección transversal efectiva, y que existe una determinada distribución de los esfuerzos de adherencia a lo largo del mismo.

Nervi observó que láminas de sección muy delgadas, mostraban gran flexibilidad, y que no ocurrían grietas visibles casi hasta que el acero traccionado se acercaba a su límite de fluencia, cuando el acero utilizado era de pequeño diámetro (0.5 – 1.5 mm) y espaciado en el orden de 10 mm. Este comportamiento característico del ferrocemento, depende fundamentalmente de la propiedad del mortero de experimentar mayores deformaciones cerca del refuerzo sin fisurarse, y de la gran distribución del refuerzo en la masa del mortero [Chao 2005].

Romualdi y Batson, y Romualdi y Mandel llegaron a la conclusión de que había una relación entre el esfuerzo para la primera grieta, y el espaciamiento de los alambres de refuerzo, así como que para cualquier porcentaje de acero, mientras menor era el espaciamiento mayor la resistencia al agrietamiento; para espaciamientos del orden de 10 mm la tensión para el agrietamiento era de aproximadamente 5 MPa, y para espaciamientos de 5 mm la tensión aumentaba a 7.6 MPa [Wainshtok 1998].

De acuerdo a Naaman y Walkus, el ancho máximo de las grietas no debe ser mayor de 0.1 mm para el caso de elementos en ambiente no agresivo, y de 0.05 mm en ambiente agresivo o para estructuras destinadas a depósitos de líquidos [Wainshtok 1998].

3.4.7 Resistencia bajo cargas de fatiga

El estudio del comportamiento del ferrocemento bajo cargas de fatiga es muy significativo, especialmente donde los elementos están sometidos a cargas similares. A la fecha, esta propiedad y otras como la resistencia al impacto se han investigado poco en comparación con sus otras propiedades mecánicas [Paul y Pama, 1992].

Los dos componentes del ferrocemento, acero y mortero, tienen características de fatiga bastante diferentes. La mayor parte de los aceros tienen un límite de resistencia definido, cuando las tensiones se mantienen bajo este límite

establecido, los aceros tienen una vida de fatiga muy larga. Al contrario, un material frágil como el mortero no tiene un límite de resistencia definido; es decir, este tarde o temprano fallará bajo carga repetida, sin importar cuán baja sea la tensión aplicada. En conclusión, el comportamiento a la fatiga de uno u otro material, puede gobernar el funcionamiento del ferrocemento [ACI Committee 549, 1997].

3.4.8 Durabilidad

Aunque las medidas requeridas para asegurar la durabilidad de manera convencional del hormigón armado también se aplican al ferrocemento, sin embargo, existen tres factores exclusivos del ferrocemento que afectan su durabilidad. Primero, el recubrimiento es pequeño y por consiguiente es relativamente fácil para líquidos corrosivos alcanzar el refuerzo. Segundo, el área de la superficie del refuerzo es excepcionalmente alta; entonces el área de contacto sobre la cual las reacciones de corrosión pueden ocurrir, y el costo que resulta de la corrosión, es potencialmente alto. Tercero, aunque el refuerzo de acero usado en el ferrocemento sea generalmente galvanizado para suprimir la corrosión, la capa de zinc puede reaccionar con la humedad de la barra de acero, creando un vapor altamente inflamable de hidrógeno, que puede provocar una explosión, cuando la capa exterior del acero galvanizado es cortada.

Los tres factores asumen variaciones en los grados de importancia, según la naturaleza de la condición de exposición. Sin embargo, a pesar de estos efectos únicos, no hay reportes en la literatura de corrosiones serias del acero en el ferrocemento, excepto en aquellos que se relacionan directamente con una inadecuada colocación del mortero o una pobre compacidad de este, ya que el ferrocemento bien construido tiene relativamente baja permeabilidad. Para asegurar una adecuada durabilidad, es necesaria una matriz compactada totalmente, además de poder usar algún tipo de capa o cubierta protectora. El empleo de materiales puzolánicos (por ejemplo, ceniza volátil y tierra granulada

de escoria de alto horno) en el ferrocemento puede mejorar la resistencia a sulfatos y al ataque del agua marina de una manera similar a la del hormigón convencional [ACI Committee 549, 1997].

Por último, el escoger una arena fina, proporciona una mayor impermeabilidad al material, y evita la corrosión de las capas más extremas del refuerzo, dado los pequeños espesores de recubrimiento (2 – 5 mm.) utilizados en el ferrocemento [Guevara et al., 1990].

3.4.9 Retracción y Creep

Es posible aplicar al ferrocemento, los principios de retracción[25] y creep[26], que gobiernan el comportamiento de hormigón armado convencional, ya que se desconoce cualquier estudio formal que haga referencia a lo contrario.

El potencial de retracción de la matriz de mortero (no restringido por el refuerzo) es gobernado en gran parte por su contenido de agua, que a su vez es gobernado por la trabajabilidad requerida para la colocación, la graduación de arena, y la presencia de aditivos como puzolanas, limos, agentes reductores de agua e incorporadores de aire, etc. Así, la selección de técnicas de colocación de baja trabajabilidad como shotcrete, la opción de una arena sin finos excesivos, y el empleo de adiciones pueden reducir la retracción de la matriz como las circunstancias lo permitan. La retracción actual del ferrocemento también depende de la restricción ofrecida por el refuerzo, que es una función de la fracción de volumen en la dirección considerada y probablemente otros factores previamente asociados con desarrollo de grietas, es decir, superficie específica, el tipo de refuerzo, y espaciado de alambre en la malla.

Así como la retracción, el creep del ferrocemento es una función del potencial de creep (condición no restringida) de la matriz, y la restricción ofrecida por el

[25]Retracción: Fenómeno intrínseco del hormigón que está relacionado con la pérdida paulatina del agua en la mezcla.
[26]Creep: Incremento de deformación que sufre un material cuando le es aplicado un esfuerzo (fluencia lenta).

refuerzo. Otra vez, ciertos parámetros, como una fracción de volumen de pasta/agregados baja, y un bajo radio tensión/fuerza aplicado, minimizarán el creep de la matriz del mortero.

Por otro lado, el creep del ferrocemento puede ser influenciado más a fondo por factores como la fracción de volumen del refuerzo en la dirección de la carga [ACI Committee 549, 1997].

3.4.10 Resistencia al impacto

El ferrocemento es un material de construcción muy versátil, posee la característica de alto rendimiento, sobre todo en agrietamiento, resistencia a la tensión, ductilidad y resistencia al impacto, por lo cual podría llegar a ser un material alternativo para mucha clase de aplicaciones. Como su refuerzo está uniformemente distribuido tanto en direcciones longitudinales como en transversales, y estrechamente espaciado a través del espesor de la sección, el ferrocemento será muy eficaz en la resistencia a efectos de impacto, como por ejemplo, el caso de un choque de misil. También, la buena distribución de su refuerzo podría causar una zona de daño más pequeño, y limitar el tamaño de los fragmentos de concreto. Esto es muy importante porque esto reduce el daño secundario causado por la voladura de fragmentos de concreto [Abdullah et al., 2003].

Se considera que la resistencia al impacto del ferrocemento es ligeramente mayor que la del concreto reforzado tradicional, debido a su elevada capacidad de absorción de energía (Paul y Pama, 1992). Los atributos principales parecen ser la resistencia a la desintegración, localización de daño, y facilidad de la reparación. Sin embargo, en vista de la complejidad experimental asociada con la medida de la resistencia de impacto, existen pocos datos cuantitativos o comparativos [ACI Committee 549, 1997; Wainshtok, 1998].

3.4.11 Resistencia al fuego

Independientemente si la matriz está agrietada o no, el único problema para el ferrocemento es su escasa resistencia al fuego, debido a la delgadez inherente de sus formas estructurales y al bajo recubrimiento para el refuerzo. Existe limitada información en la literatura sobre pruebas de resistencia al fuego realizadas en el ferrocemento [ACI Committee 549, 1997].

CAPÍTULO 4: MÉTODOS DE REPARACIÓN DE LOSAS

4.1 Antecedentes generales

Las estructuras dañadas normalmente pueden recuperarse por medio de reparaciones. Estas serán exitosas en la medida que otorguen amplia seguridad a los usuarios, y preserven la vida útil de las construcciones por el período para el cual fueron diseñadas.

Actualmente, se utilizan procedimientos, equipos y productos de tecnología avanzada, con los cuales es posible abordar con éxito la reparación y recuperación de obras, que de otra forma estarían perdidas.

Los defectos de construcción pueden repararse, recuperando las condiciones del proyecto; en cambio, cuando hay defectos de diseño, la solución suele ser más complicada y la mayoría de las veces se llega a la necesidad de reforzar.

Para decidir el procedimiento más adecuado de reparación, debe analizarse cada caso, determinar la causa y su efecto, realizar un diagnóstico de las fallas y del proyecto de reparación, este último sólo debe ser desarrollado bajo la dirección y responsabilidad de un profesional especialista.

4.2 Técnicas de reparación

Existen diversas situaciones por las cuales se originan daños en los elementos estructurales. Las principales causas de una falla son por diseño, ejecución o uso, de ahí la importancia de saber reconocer el tipo de daño, clasificarlo y describirlo.

En el caso de las losas, los deterioros pueden ocurrir por:

- Sobrecargas eventuales no previstas.
- Sobrecargas superiores a las de diseño.
- Armadura insuficiente o mal colocada.

- Reducido espesor.
- Descimbre prematuro.
- Concentración de tensiones.
- Baja calidad del hormigón.
- Mal diseño.

Estos factores, pueden provocar grietas, separación de juntas, desniveles o punzonamiento; para solucionar estos inconvenientes, debe recurrirse a los métodos de recuperación estructurales existes. A continuación, se describen algunos de ellos:

4.2.1 Inyección de grietas

La inyección de fisuras y grietas con resinas epóxicas tiene por objeto recuperar el monolitismo de las estructuras, gracias a las propiedades de adherencia y resistencia de estos materiales; las inyecciones son aplicables a grietas sin movimiento. Siempre es necesario verificar con extracción de testigos la penetración real de la resina.

4.2.2 Colocación de refuerzos de acero

4.2.2.1 Colocación de armaduras adicionales

En caso de requerir una reparación y/o refuerzo, se necesita aumentar la cuantía de acero. Para efectuar el diseño hay que considerar el estado de cargas sobre la estructura, ya que si éstas no se reducen (gateo y alzaprimados) quedará actuando la armadura primitiva, con lo que la nueva armadura sólo entrará en funciones frente a sobrecargas, y probablemente cuando la primera haya fallado. Por esta razón, la nueva armadura se calcula para tomar el total de las solicitaciones.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Se demuele parcial o totalmente el elemento en la zona a reforzar, aumentada en las longitudes de empalmes requeridas por las armaduras.
- Colocación de refuerzos según cálculo; recolocación de estribos.
- Hormigonar con un mortero de resistencia mínima de 28 días; se recomienda usar un hormigón H30 como mínimo.
- Eventualmente se pueden colocar anclajes en el hormigón sano, con lo que se reduce la zona a demoler.

4.2.2.2 Colocación de anclajes con epoxi

Esta técnica[27], permite la colocación de refuerzos sin necesidad de demoler, o anclar nuevas armaduras al hormigón existente.

El procedimiento, se describe a continuación:

- Perforar según longitud de refuerzo requerida; para efectuar un anclaje seguro su longitud debe ser:
  - $L \geq 10\ \emptyset$ si $R_{28} \geq 225\ \frac{kg}{cm^2}$.
  - $L \geq 15\ \emptyset$ si $R_{28} < 225\ \frac{kg}{cm^2}$.
  - Diámetro de perforación: d = 12 mm $\pm$ 2 mm.
- Limpiar la perforación.
- Rellenar con sistema epoxi para anclajes.
  - Perforaciones hacia abajo: sistema epoxi líquido.
  - Perforaciones horizontales y sobrecabeza: masilla tixotrópica.
- Insertar el fierro girando para eliminar huecos y bolsas de aire, fijar en posición hasta endurecimiento de la resina.

[27] Técnicas de reparación y refuerzo de estructuras de hormigón armado y albañilería. Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón (I. Ch. C. H.)

4.2.2.3 Insertos superficiales

Consiste en la reposición o aumento de armadura de superficie para:

- Corregir falta de estribos.
- Mejoramiento de anclajes.
- Armaduras parcialmente corroídas.

Esta técnica se ejecuta de la siguiente forma:

- Fijar posición de las armaduras según indicación del calculista.
- Marcar los bordes de la ranura, cortar con disco (cortador angular), picar hasta el borde exterior de la armadura existente.
- Colocar la nueva armadura amarrada a la existente y comprobar las longitudes de empalmes.
- Rellenar con mortero epóxico.

4.2.2.4 Refuerzos externos (betón plaque)

Los refuerzos externos consisten en fijar pletinas o platabandas de acero a estructuras existentes de hormigón, mediante resinas epóxicas, sin necesidad de demoliciones o aumentos importantes de sección.

Estos trabajos deben ser cuidadosamente vigilados para comprobar que se cumplen las especificaciones del proyectista. Son aplicables a todos aquellos casos en que se necesite aumentar la cuantía de acero, pero en que la calidad del hormigón es satisfactoria.

Al igual que en caso de la colocación de armaduras adicionales, el diseño debe considerar el estado de cargas sobre la estructura, para asegurar que la nueva armadura tome el total de las solicitaciones.

Esta técnica, se aplica según este procedimiento[28]:

- Trabajos preliminares: Eliminar estucos y desbastar la capa superficial de hormigón para eliminar lechada y emparejar para que la superficie quede plana; tratar pletinas con chorro de arena hasta metal blanco.
- Si la superficie de hormigón es irregular, se hará un tratamiento previo con mortero epóxico.
- Sistema epoxi: Emplear una masilla epóxica tixotrópica, de características y propiedades conocidas, y en lo posible probada en empleos similares. Su adherencia al acero debe ser superior a 200 kg/cm^2.
- Aplicar el adhesivo sobre ambas caras en un espesor de aproximadamente 3 mm.
- Aplicar una presión uniforme y suficiente para dejar un espesor final de adhesivo inferior a 1 mm.
- Mantener presionado (y alzaprimado) por 24 horas. En lo posible se utilizarán planchas de acero de espesor inferior a 5 mm, preferentemente de 3 mm.
- Se debe procurar que el espesor resultante del adhesivo sea lo más uniforme posible.

4.2.3 Refuerzo con fibra de carbono

La fibra de carbono es un material compuesto, constituido principalmente por carbono. Tiene propiedades mecánicas similares al acero. Al tratarse de un material compuesto, aproximadamente en el 75% de los casos se utilizan polímeros termoestables.

[28] Técnicas de reparación y refuerzo de estructuras de hormigón armado y albañilería. Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón (I. Ch. C. H.)

El diseño de refuerzos estructurales con fibra de carbono permite reparar, rehabilitar y reforzar estructura, principalmente las compuestas por hormigón armado, albañilería y madera.

Los refuerzos de fibra de carbono pueden ser instalados rápida y fácilmente sobre superficies planas o curvas, alrededor de pilares y vigas, y en áreas de limitado acceso, interrumpiendo mínimamente otras labores de una obra.

Las soluciones se diseñan a la medida que se requieren, tomando en consideración los códigos de diseños aplicables, con el objetivo de optimizar la solución final.

Los beneficios de usar el refuerzo estructural con fibra de carbono son:

- Menor peso: Las láminas de fibra de carbono pesan 10 veces menos que el acero.
- Mayor resistencia: Las láminas de fibra de carbono resisten 10 veces más tensión que el acero. Ello permite disminuir el tamaño del refuerzo.
- Mayor flexibilidad.
- Facilidad de instalación.
- Facilidad de transporte.
- Longitud no restringida.
- Versatilidad en el diseño por su elasticidad.
- Uniones mediante adhesivos químicos.
- Resistencia frente a químicos externos.

Particularmente, en el caso de las losas las principales ventajas son:

- Aumento de resistencia a flexión.
- Reducción de la sección fisurada para una mayor durabilidad.
- Aplicación de una fracción del refuerzo estructural en la superficie de la losa puede ser suficiente para el fortalecimiento de toda losa.
- Una vez reforzada la losa mantiene las dimensiones originales.
- Solución limpia y poco invasiva.

4.2.4 Mortero proyectado

El reforzamiento de losas de concreto puede hacerse con hormigón proyectado o con una capa adicional de hormigón.

Se aplica a fallas superficiales extensas o repetitivas, o para la recuperación del recubrimiento en el caso de corrosión de armaduras.

Procedimiento para desarrollar esta técnica:

- Usualmente es utilizado en la parte inferior de la losa.
- La superficie debe ser escarificada.
- Limpiar armaduras, eventualmente con chorro de arena.
- Colocar la malla de refuerzo cuando corresponda.
- Aplicar el mortero a alta presión.
- Cuando se requiere una terminación lisa, será necesario aplicar una capa final de mortero ligeramente plástico, y luego afinar con platacho.
- Curado húmedo por 7 días.

La ventaja de este método es que el hormigón existente es usado como encofrado.

La transferencia de esfuerzos cortantes entre la losa existente y el nuevo hormigón, es asegurada utilizando conectores de corte.

CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA DE REPARACIÓN CON FERROCEMENTO

5.1 Introducción

Las losas son elementos estructurales de gran importancia en cualquier edificación u obra donde se utilicen, ya que transmiten solicitaciones a otros elementos estructurales, y une estos mismos elementos, para que toda la estructura trabaje en conjunto, como si fuera una sola unidad.

Inconvenientes en el diseño, construcción y uso continuo de las losas, pueden originar daños estructurales, que afectan el adecuado funcionamiento y la seguridad de la obra. Sobrecargas aplicadas, eventuales o superiores a las de diseño, pueden producir fallas importantes en la losa, sin embargo, es posible recuperar la capacidad de resistencia para la cual fueron diseñadas, a través de diversos métodos de reparación.

En este proyecto, se propone una metodología de reparación con ferrocemento, para la recuperación estructural de las losas. Esta metodología, esta ideada para ser aplicada en el diseño y construcción de losas, constituidas por materiales similares al hormigón armado.

5.2 Metodología propuesta

La metodología de reparación propuesta, está compuesta por las etapas de *diseño* y el *proceso constructivo* de las losas, las cuales se presentan en detalle en la Figura 5.1. Ambas etapas deben ser desarrolladas correctamente, ya que ambas influyen directamente en la recuperación final de la losa.

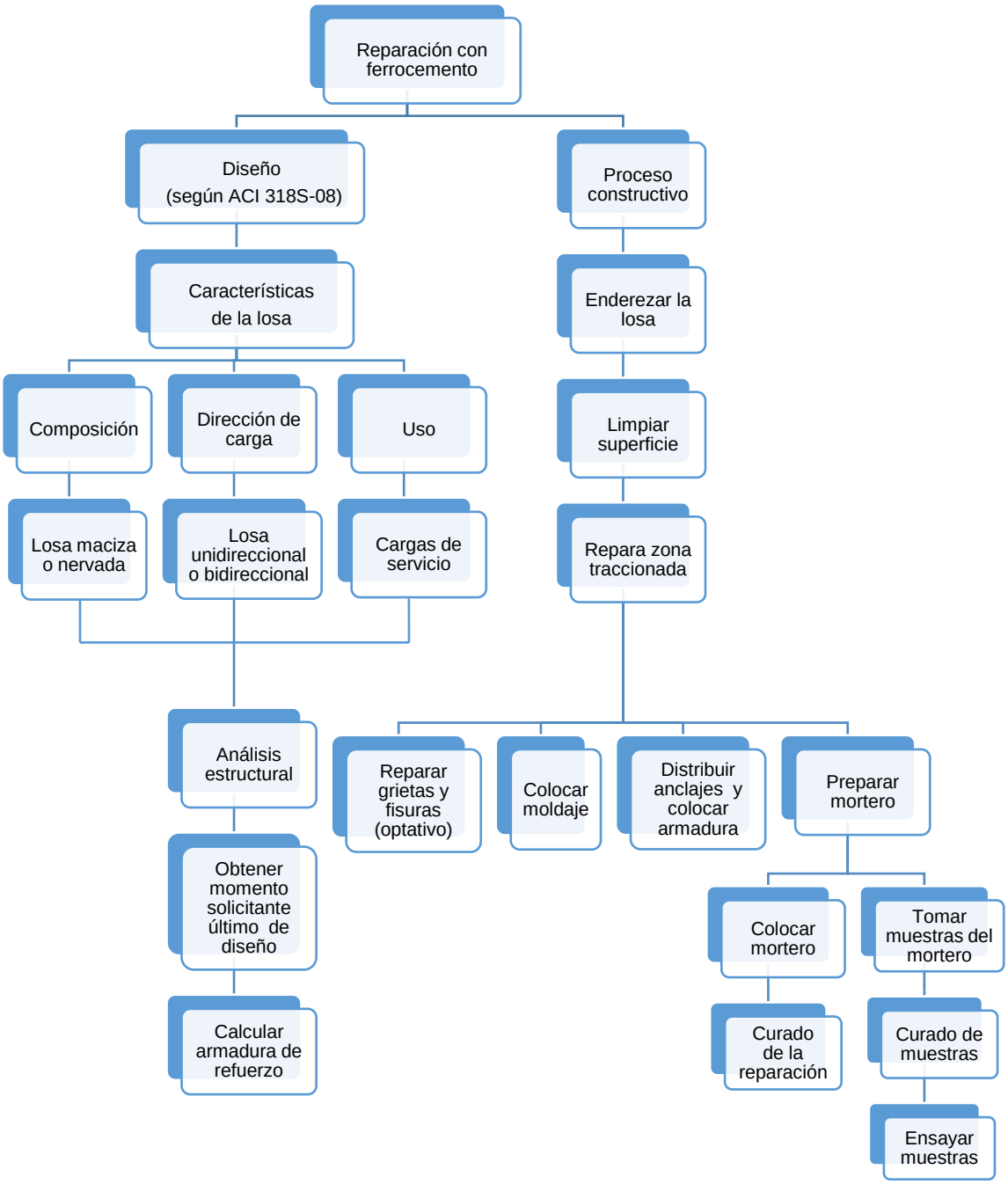

Figura 5.1: Diagrama de "Metodología de reparación con ferrocemento".
Fuente: Elaboración propia.

5.2.1 Diseño

La etapa de diseño, consiste en obtener la armadura de refuerzo que va a requerir la reparación de la losa. Y se realiza a partir de los requisitos de cálculo, establecidos en los diversos capítulos que constituyen la ACI 318S-08.

Para iniciar el diseño de la reparación, primero se deben determinar las características de la losa que se espera recuperar estructuralmente. Es fundamental conocer de que material está constituida la losa, su dirección de carga, y el uso para el cual la losa está destinada, ya que estas consideraciones son determinantes en el diseño de la estructura.

5.2.1.1 Características de la losa

Para llevar a cabo el diseño de la reparación de las losas, la normativa internacional del ACI 318S-08, considera en el procedimiento de diseño las siguientes características de las losas:

1. Material de la losa:

Las losas pueden ser de hormigón armado: losas macizas o, pueden estar constituidas por viguetas y elementos aligerantes: losas nervadas.

2. Dirección de carga de la losa:

Se debe tener en cuenta la dirección de carga de las losas, es decir si la losa es unidireccional o bidireccional.

Las losas unidireccionales se comportan básicamente como vigas anchas, que se suelen diseñar tomando como referencia una franja de ancho unitario (un metro de ancho).

Cuando las losas rectangulares se apoyan en dos extremos opuestos, y carecen de apoyo en los otros dos bordes restantes, trabajan y se diseñan como losas unidireccionales.

Cuando la losa rectangular se apoya en sus cuatro lados (sobre vigas o sobre muros), y la relación largo/ancho es mayor o igual a dos, la losa trabaja fundamentalmente en la dirección más corta, y se la suele diseñar unidireccionalmente, aunque se debe proveer un mínimo de armado en la dirección ortogonal (dirección larga), particularmente en la zona cercana a los apoyos, donde siempre se desarrollan momentos flectores negativos importantes (tracción en las fibras superiores). Los momentos positivos en la dirección larga son generalmente pequeños, pero también deben ser tomados en consideración.

En cambio, cuando las losas se sustentan en dos direcciones ortogonales, se desarrollan esfuerzos en ambas direcciones, recibiendo el nombre de "losas bidireccionales".

3. Uso de la losa:

Hay que determinar el uso estructural que tendrá la losa, ya que ésta debe ser capaz de resistir las cargas de servicio (sobrecarga de uso y peso propio) establecidas en la NCh. 1537 Of. 86 "Diseño estructural de edificios - Cargas permanentes y sobrecargas de uso".

5.2.1.2 Cálculos de diseño

El diseño de las losas, está definido por la dirección de carga de las losas a reparar. Si las losas son unidireccionales, éstas se diseñan como vigas anchas, por lo tanto, utilizan los siguientes capítulos del ACI 318S-08:

- Capítulo 8 "Análisis y diseño - Consideraciones generales".
- Capítulo 9 "Requisitos de resistencia y funcionamiento".
- Capítulo 10 "Flexión y cargas axiales".

Mientras que el diseño de losas bidireccionales, se efectúa de acuerdo a los requisitos del Capítulo 13 "Sistema de losa en dos direcciones".

5.2.2 Proceso constructivo

Finalizada la etapa de diseño, la metodología propuesta, continúa con el procedimiento constructivo de la reparación con ferrocemento, la cual consiste en aplicar una capa de mortero fresco junto a la armadura de refuerzo.

5.2.2.1 Preparación del área a reparar de la losa

Previo a comenzar la reparación, la superficie de la losa experimental, debe estar en las condiciones adecuadas para asegurar el éxito de este proceso. Por ende debe cumplir con los siguientes requisitos:

1. La reparación será efectuada en la zona a tracción de la losa.
2. La losa debe ser enderezada para que esté completamente plana y sin deformaciones.
3. Luego, se realiza la limpieza del área a reparar de la losa. La finalidad de esta etapa, es asegurar el funcionamiento y rendimiento de cada puente adherente que se colocara, para adherir los anclajes del refuerzo y el mortero fresco.

5.2.2.2 Reparación zona traccionada

Una vez que la superficie de la losa esta lista para continuar con la reparación, se prosigue con el siguiente procedimiento:

1. Reparar grietas y fisuras presentes en la losa.
2. Fabricar y colocar el moldaje para la reparación con ferrocemento.
3. Perforar la superficie de la losa, para distribuir anclajes (ϕ6 @ 15) que se adhieren a la losa con una resina epóxica especializada en la unión acero/mortero.
4. Ubicar las barras de refuerzo y la malla electrosoldada; además se doblan los anclajes para reforzar la armadura existente, y asegurar la adherencia del refuerzo.

5. Colocar el puente de adherencia para unir el mortero fresco con el mortero endurecido.
6. Fabricar el mortero con la resistencia requerida, según las consideraciones de diseño establecidas en la primera etapa de esta metodología.
7. Colocar el mortero en forma manual o proyectada.
8. Fin de la reparación. Se inicia el proceso de curado de las losas.

5.2.2.3 Análisis del mortero de la reparación

Simultánea a la etapa de fabricación y colocación del mortero, se requiere realizar una toma de muestras del mortero a utilizar en la reparación. El objetivo, es corroborar la resistencia del mortero para validar la técnica de reparación propuesta.

Según los requerimientos establecidos en la NCh. 1017 Of. 75 "Hormigón - Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción", se realiza la toma de muestras del mortero utilizado.

Concluida la etapa de curado de las probetas, éstas serán posteriormente ensayadas para evaluar la resistencia del mortero, de acuerdo a las indicaciones de la NCh. 1037 Of. 77 "Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas" y/o NCh. 1038 Of. 77 "Hormigón - Ensayo de tracción por flexión".

5.3 Normativa

La siguiente normativa, será utilizada en el diseño y la construcción de la reparación, establecidas en esta metodología:

- American Concrete Institute: ACI 318S-08.
- NCh. 170 Of. 1985: “Hormigón – Requisitos Generales”.
- NCh. 1017 Of.75: “Hormigón-Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción”.

- NCh. 1037 Of. 77: “Hormigón-Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas”.
- NCh. 1537 Of. 86: “Diseño estructural de edificios – Cargas permanentes y sobrecargas de uso”.

CAPÍTULO 6: REPARACIÓN DE LOSAS EXPERIMENTALES

6.1 Antecedentes de diseño y construcción

Las losas experimentales corresponden a tres losas de ladrillo de arcilla artesanales hechos a mano, reforzadas con mortero armado, cuyas dimensiones son 260 cm x 100 cm x 14 cm.

Con la finalidad de investigar la capacidad de resistencia de las losas experimentales, dos de ellas se diseñaron con armadura ϕ8 y se denominaron *losa N°1* y la *losa N°2*, mientras que la otra losa experimental se reforzó con armadura ϕ10, y se llamó *losa N°3*.

Debido a que objetivo de este trabajo, es que las tres losas experimentales, recuperen la capacidad de resistencia para la que fueron diseñadas, tras haber sido sometidas a los ensayos *Prueba de carga*, *Carga cíclica* y *Rotura*, estas losas serán restauradas mediante la técnica de reparación con ferrocemento.

Para demostrar la efectividad de este método de reparación, las grietas y fisuras provocadas por los ensayos, y que están presentes en la superficie de las losas experimentales, no serán reparadas antes comenzar con su recuperación. Esto quiere decir, que este estudio será desarrollado en las condiciones más desfavorables.

La reparación de las losas, tendrá un espesor de 3 cm, donde se ubicará la armadura de refuerzo y el mortero fresco. Por ende, las losas experimentales reparadas[29] tendrán una nueva geometría igual a 260 cm x 100 cm x 17 cm.

Al igual que las losas experimentales, las losas reparadas también serán diseñadas para ser utilizadas en edificaciones habitacionales, por lo tanto, según la NCh. 1537 Of. 89 deben resistir una sobrecarga de 200 kg/m^2.

[29] En adelante, la losa experimental reparada solo se denominará *losa reparada*.

Los ladrillos que componen la losa experimental no aportan a la tracción, por lo tanto, el ancho útil que va a utilizarse en los cálculos es de 32 cm, que corresponde a la zona donde hay mortero (ver Figura 2.1 y 2.2, Capítulo 2).

La confección del ferrocemento para la reparación, va a estar compuesta por una malla electrosoldada, la armadura de refuerzo y el mortero fresco. En este trabajo, la malla hexagonal no será considerada debido a su escaso aporte estructural en la reparación[30].

La preparación del mortero será con la proporción de volumen 1:2:0,5 (cemento:arena:agua), y la mezcla no contendrá cal ni aditivos; a partir de estas consideraciones, se espera obtener un mortero de resistencia similar a los 200 kg/cm^2, debido a su importante función estructural.

Para verificar la capacidad de resistencia del mortero utilizado en la reparación, se elaboraran tres probetas cúbicas de 15x15x15 según indicaciones de la NCh. 1017 Of. 77. Estas probetas serán ubicadas junto a cada losa reparada, para estar en las mismas condiciones, y así obtener una muestra real del mortero usado. Finalizado el proceso de curado, las probetas serán ensayadas a compresión según indicaciones de la NCh. 1037 Of. 77, en la máquina *Prensa de Compresión,* ubicaba en el Laboratorio LEMUC[31].

Por otro lado, cabe mencionar que debido a que las muestras del mortero son probetas cúbicas, y no probetas rilem[32], el mortero se consideró como un hormigón.

Debido a que este es un estudio experimental, las losas reparadas serán sometidas a los ensayos de *Prueba de carga*, *Carga cíclica* y *Rotura*, al igual que las losas experimentales. Estos ensayos se van realizar en el laboratorio de materiales de la Universidad Central, utilizando la máquina MAC V.

---

[30] De acuerdo a la experiencia del Profesor Hernán Arnés, en el desarrollo de varios trabajos de titulación como los de Díaz y Jiménez, 2014; Fernández y Ferrada, 2012; Rogel, 2005; Uribe, 2007; mencionados en detalle en la bibliografía de este trabajo, se ha demostrado que no es necesario el uso de la malla hexagonal.

[31]Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Central.

[32]Debido a problemas con la disponibilidad del Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Central de Chile (LEMUC), solo pudieron confeccionarse probetas cúbicas.

El primer ensayo a ejecutar será el de *Prueba de carga*, el cual se efectúa según indicaciones de la ACI 318S-08; y solo es válido, si cumple con los criterios de aceptación señalados en la misma ACI. Sin embargo, en este caso también será considerado el *criterio de flecha máxima*, recomendado por los ingenieros Rafael Riddell y Pedro Hidalgo en su libro "*Diseño Estructural*"[33].

Luego se llevará a cabo el ensayo de *Carga cíclica*. Debido a que la losa N°3 presenta severos daños, únicamente serán analizadas a través de este ensayo la losa N°1 y la losa N°2. Por otro lado, solo se realizarán dos ciclos de carga para cada una de las losas, por inconvenientes con el tiempo, y de disponibilidad de una persona experta que pueda manipular la máquina MAC V.

Finalmente, las tres losas reparadas serán sometidas al ensayo de *Rotura*, para obtener la resistencia última de cada una. Es importante mencionar, que el ensayo a rotura que se realizó a las losas experimentales, se hizo aplicando dos cargas $\left(P/_2\right)$ en los límites del tercio central de la luz, mientras que en este trabajo, se optó por aplicar una carga puntual (P) en el centro de la luz de ensayo, tal como se observa en la Figura 6.1.

Por lo tanto, este es un factor que debe ser considerado, cuando se realice el análisis de los resultados de este ensayo, antes y después de la reparación de las losas experimentales.

Otro antecedente a considerar, es que al someter la losa experimental N°3 al ensayo de rotura, ésta presentó severos daños debido a una sobrecarga aplicada. La condición estructural de la losa N°3, puede influir en la evaluación de resultados del ensayo a rotura, antes y después de la reparación de las losas experimentales.

[33] Riddell, R., Hidalgo, P. Enero 2010. Diseño Estructural. Ediciones Universidad Católica de Chile. 5ª Edición. 543p.

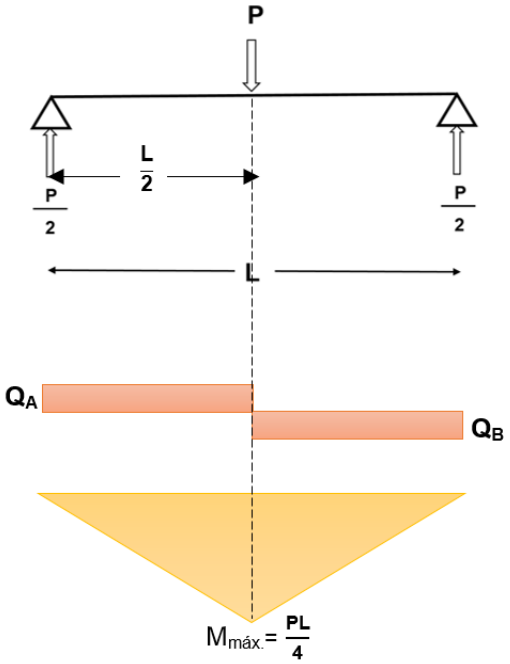

Figura 6.1: Diagrama de corte y momento para la solicitación del ensayo a rotura.
Fuente: Elaboración propia.

6.2 Diseño de la reparación de las losas experimentales

La metodología de reparación con ferrocemento, se inicia con la etapa de diseño. Esta etapa se realiza en base al ítem 5.2.1 de esta metodología, considerando los siguientes factores:

- La losa experimental corresponde a una losa unidireccional (ver Figura 6.2).
- Excepcionalmente, el diseño de la reparación de las losas experimentales, se hará considerando que las losas son de hormigón, ya que no existe una metodología establecida para el diseño de losas de ladrillo.
- Se pretende utilizar las losas en obras habitacionales, por ende, el diseño de la reparación se realizó para una sobrecarga de 200 kg/m^2, cuyo dato fue obtenido de la NCh. 1537 Of. 86 “Cargas permanentes y sobrecargas de uso”.

6.2.1 Procedimiento del diseño de la reparación

El objetivo de la etapa de diseño, es obtener el refuerzo de la reparación de las losas experimentales, a partir del procedimiento descrito a continuación[34].

1. Se calcula el peso propio total de la losa experimental (PP_{LE}):

<u>Datos Losa experimental</u>

- Peso específico albañilería: $\gamma_{albañilería}$= 1600 kg/m^3.
- Espesor losa: e_{losa} = 14 cm.
- Peso específico mortero: $\gamma_{mortero}$= 2000 kg/m^3.
- Espesor sobrelosa: $e_{sobrelosa}$ = 5 cm.

Peso propio losa: $PP_{losa} = (\gamma_{albañilería} \times e_{losa} \times 1m)$ (6.1)

PP_{losa} = (1600 kg/m^3 x 0,14 m x 1m) = 224 kg/m.

Sobrelosa: $SL = (\gamma_{mortero} \times e_{sobrelosa} \times 1m)$ (6.2)

SL = (2000 kg/m^3 x 0,05 m x 1m) = 100 kg/m.

$PP_{LE} = PP_{losa} + SL$ (6.3)

PP_{LE} = 224 kg/m + 100 kg/m = 324 kg/m.

2. Se calcula el peso propio de la reparación ($PP_{reparación}$):

<u>Datos de la reparación</u>

- Peso específico hormigón armado[35]: γ_{HA}= 2500 kg/m^3.
- Espesor reparación: $e_{reparación}$= 3 cm.

$PP_{reparación} = (\gamma_{HA} \times e_{reparación} \times 1m)$ (6.4)

---

[34] Los datos de peso específico de albañilería, mortero y hormigón armado, fueron extraídos del sitio web:
http://www.euroimportadora.com.mx/SYS_user/tips_tecnicos/es/Peso_Especifico_de_Materiales.pdf

[35] Se hará uso del peso específico de hormigón armado, debido a simplificaciones de diseño.

$PP_{reparación}$ = (2500 kg/m^3 x 0,03 m x 1m) = 75 kg/m.

3. Se obtiene el peso propio total de la losa reparada (PP):

$$PP = PP_{LE} + PP_{reparación} \quad (6.5)$$

PP = 399 kg/m ~ 400 kg/m

4. Se calcula el momento solicitante último (M_u), a partir de una de las combinaciones de carga establecidas en la ACI 318S-08:

<u>Datos losa reparada</u>

- Carga de Peso propio: q_{pp} = 400 kg/m.
- Sobrecarga de uso: SC = 200 kg/m^2.
  - Donde: SC x 1m = 200 kg/m.
- Largo losa: L = 2,6 m.

$$M_{PP} = \frac{q_{pp} \times l^2}{8} = \frac{(400\ kg/m)(2,6\ m)^2}{8} = 338\ kg\text{-}m$$

$$M_{SC} = \frac{q_{SC} \times l^2}{8} = \frac{(200\ kg/m)(2,6\ m)^2}{8} = 169\ kg\text{-}m$$

$$M_u = 1,2\ M_{PP} + 1,6\ M_{SL} \quad (6.6)$$

M_u = 1,2 (338 kg-m) + 1,6 (169 kg-m) = 676 kg-m.

5. Finalmente, se calcula el área de acero de refuerzo de la losa.

- Acero de refuerzo: A440-280H → F_y = 2.800 kg/cm^2.
- Mortero M20 → f'_c = 160 kg/cm^2.

- Alto losa reparada: h = 17 cm.
- Altura útil: d = 15 cm.
- Ancho: b = 32 cm.

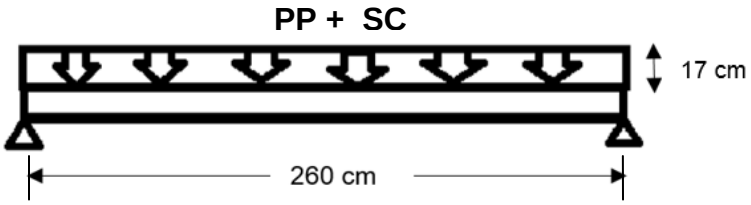

Figura 6.2: Bosquejo losa.
Fuente: Elaboración propia.

$$A_s = \frac{0{,}85 \times f_c' \times b \times h}{f_y}\left[1 - \sqrt{1 - \frac{2\,M_u}{0{,}85 \times 0{,}9 \times f_c' \times b \times h^2}}\right] \qquad (6.7)$$

$A_s = 1{,}86\ cm^2 \rightarrow 4\ \phi\ 8.$

Detalle malla electrosoldada a utilizar (ver Figura 3.6 y Tabla III.4):

- Malla ACMA 139-C: AT 56-50 H.
  - A: Acero.
  - T: Trefilado/Laminado.
  - 56: Límite de ruptura = 5.600 kg/cm^2.
  - 50: Límite de fluencia = 5.000 kg/cm^2.
  - H: Hormigón.

Por lo tanto, el refuerzo total será la armadura calculada 4ϕ8, junto a la malla ACMA 139-C.

6.3 Procedimiento constructivo de la reparación

La segunda etapa de la metodología de reparación, se inicia con la reparación de las tres losas experimentales. Este procedimiento se realiza según indicaciones del ítem 5.2.2 de esta metodología.

Para comenzar, las losas experimentales se enderezan con la máquina de ensayos MAC V[36], hasta quedar completamente planas (ver Figura 6.3). Luego el área traccionada de cada losa se limpia, la finalidad de dejar esta superficie en condiciones óptimas para continuar con la reparación.

Figura 6.3: Losa enderezada con la máquina MAC V.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, cada una de las losas se reubica para iniciar con reparación (ver Figura 6.4). Lo primero, es la limpieza de la superficies de las losas, para la posterior colocación de resinas epóxicas.

[36] En este estudio, el proceso constructivo de la reparación de las losas experimentales, se desarrolla en un laboratorio, por ende, se hará uso de la máquina de ensayos MAC V.

Figura 6.4: Losas posicionadas antes de iniciar la reparación.
Fuente: Elaboración propia.

Luego, se confecciona e instala el moldaje en cada losa; para continuar con la instalación de anclajes ϕ 6 de 15 cm de largo (A440-280H), anclados a 5 cm de profundidad con resina epóxica (Sikadur-31HMG[37]); estos anclajes son utilizados como refuerzos para asegurar la adherencia de la armadura (ver Figura 6.5). Sin embargo, se deben esperar 24 horas, para que el anclaje pueda estar en servicio, tal como se indica en la ficha técnica de este producto[38], por lo tanto, mientras pasa el tiempo estimado, se prepara el refuerzo de la losa, es decir, las barras de acero (4ϕ8) se distribuyen y amarran a la malla electrosoldada (malla ACMA 139-C) con alambre recocido, tal como se aprecia en la Figura 6.6.

Finalizado el período de espera, se procede a aplicar un puente de adherencia epóxico (Colma Fix 32[39]) para la unión del mortero fresco con el endurecido, tal como se observa en la Figura 6.7; luego, se ubica la malla electrosoldada con los refuerzos, y se fija la malla a la losa, doblando los anclajes verticales, como se aprecia en la Figura 6.8.

[37]Sikadur-31HMG: Adhesivo tixotrópico de dos componentes a base de resinas epoxi y cargas inactivas. Se utiliza para anclajes de fierros, pernos, soportes, tirantes y maquinarias, entre otros usos.
[38]Garantiza el rendimiento óptimo del producto.
[39]Colma Fix 32: Adhesivo de dos componentes a base de resinas epoxi, libre de solventes, para unir homigón fresco con endurecido.

Figura 6.5: Losas con moldaje y anclajes.
Fuente: Elaboración propia.

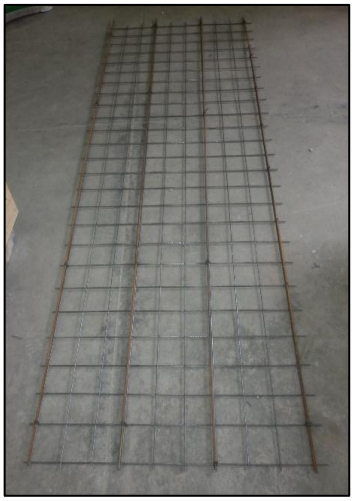

Figura 6.6: Malla ACMA C-139 y el refuerzo de diseño de la losa.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.7: Losa con puente de adherencia epóxica.
Fuente: Elaboración propia.

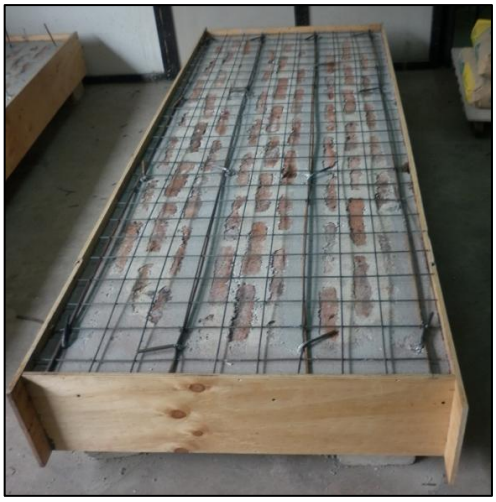

Figura 6.8: Fijación de malla electrosoldada y refuerzos.
Fuente: Elaboración propia.

Para garantizar el rendimiento del puente adherente, debía transcurrir una hora desde la aplicación del producto, y colocar antes de siete horas el mortero fresco[40]. Este mortero fue preparado manualmente *in situ*, cumpliendo con la siguiente proporción de volumen 1:2:0,5 (cemento:arena:agua), con la cual se espera obtener un mortero de resistencia similar a 200 kg/cm^2. Además, el mortero debe obtener una fluidez media para asegurar su adecuada distribución a través de la armadura y el moldaje.

En las Figuras 6.9, 6.10 y 6.11, se indica el proceso de colocación del mortero.

1. Vaciado del mortero a la losa.
2. Compactación por vibración con un dispositivo mecánico (Vibrador de concreto 5.5 HP 50 MM).
3. Enrasar el mortero superficial con movimientos aserrados.
4. Alisar la superficie.

Paralelo al proceso anterior, se realizan tres probetas del mortero utilizado, que serán dejados en las mismas condiciones que la reparación de las losas. Las

[40]Indicaciones según ficha técnica del producto.

cuáles serán posteriormente ensayadas, según indicaciones de la NCh 1037 Of. 77“ Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas”, para determinar si se obtuvo la resistencia esperada del mortero.

Figura 6.9: Vaciado del mortero.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.10: Vibración del mortero.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.11: Losa con la reparación terminada.
Fuente: Elaboración propia.

Inmediatamente después, viene el proceso de curado de las losas (ver Figura 6.12). Sobre cada losa se aplica una capa de arena que debe mantenerse húmeda, la cual se cubre con plástico, con la finalidad de proporcionar una humedad constante que sirve para evitar el agrietamiento de la losa. Durante la colocación y curado del mortero, es fundamental evitar el fenómeno de retracción, ya que la aparición de fisuras reduce su durabilidad y resistencia final.

Figura 6.12: Curado de la losa.
Fuente: Elaboración propia.

Un vez culminado el tiempo de curado de las losas experimentales, se retira la capa de arena de la superficie de cada losa, y se inicia el desmolde de cada una. Luego, las losas experimentales serán volteadas, para dejar el área reparada en la zona inferior, y así ya están listas para ser ensayadas, tal como se señala en la Figura 6.13.

Figura 6.13: Losa reparada lista para ser ensayada.
Fuente: Elaboración propia.

6.4 Ensayo mortero de refuerzo

Las tres probetas cúbicas de 15 x 15 x 15 cm (ver Figura 6.14), corresponden a una muestra real del mortero, y se elaboraron conforme a la NCh. 1017 Of. 75 “Confección y curado de probetas para ensayos a compresión y tracción”.

Según requerimientos de la NCh. 170 Of. 1985 “Hormigón - Requisitos Generales”, las probetas cúbicas de dimensiones distintas a 20 cm, deben ser multiplicadas por un factor de conversión establecido en el Anexo A – Tabla 17 de la misma norma, en este caso, el factor es igual a 0,95.

Los ensayos de cada probeta, se realizaron según indicaciones de la NCh. 1037 Of. 77“ Ensayo de probetas cúbicas y cilíndricas”, y fueron ejecutados en

la máquina *Prensa de Compresión* del LEMUC, tal como se observa en la Figura 6.15.

El propósito de este ensayo, es determinar la resistencia a compresión del mortero de refuerzo; en este caso, se obtuvo una resistencia del mortero de 220 kg/cm^2, la cual resultó ser superior a la resistencia esperada. En la Tabla VI.1, se presenta un resumen de los resultados obtenidos del ensayo.

Figura 6.14: Probetas del mortero – muestra real.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.15: Ensayo de probetas – muestra real.
Fuente: Elaboración propia.

Muestra Real	Edad (días)	Peso (kg)	Volumen (lt)	Densidad (kg/lt)	Resistencia 15x15x15cm (kg/cm^2)	Resistencia 20x20x20cm (kg/cm^2)
1	42	7,52	3,375	2,229	227,55	216,17
2	42	7,51	3,375	2,224	224	212,80
3	42	7,54	3,375	2,234	208,44	198,02
				Promedio	220	209

Tabla VI.1: Resumen ensayo de probetas.
Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 7: ENSAYOS DE LOSAS REPARADAS

7.1 Introducción

Una vez finalizada la reparación de las tres losas experimentales, estas fueron sometidas a los ensayos de prueba de carga, carga cíclica y rotura. A partir de los resultados obtenidos en estos ensayos, se pretende evaluar la metodología de reparación propuesta en este trabajo,

7.2 Prueba de carga

El primer ensayo al que se someten las losas experimentales, es el de *Prueba de carga*, cuyo objetivo es evaluar si una estructura o parte de ella, cumple con los requisitos de seguridad del reglamento ACI 318S-08.

7.2.1 Procedimiento para la prueba de carga

7.2.1.1 Intensidad de carga

Se determina la carga máxima a utilizar en la prueba de carga, según indicaciones de la ACI 318S-08 (Capítulo 20, sección 20.3.2); la cual establece en la siguiente ecuación:

$$0{,}85\ (1{,}4\ D+1{,}7\ L) \tag{7.1}$$

El factor 1,4D de la fórmula se reemplaza por 0,4 D, ya que el peso propio de la estructura está incluido, por ende, la ecuación queda:

$$0{,}85\ (0{,}4\ D+1{,}7\ L) \tag{7.2}$$

Por lo tanto:

$$0{,}85\ (0{,}4\ D+1{,}7\ L)=0{,}85\ \left[\left(0{,}4 \times 400\ \frac{kg}{m^2}\right)\left(1{,}7 \times 200\ \frac{kg}{m^2}\right)\right] = 425\ \frac{kg}{m^2}$$

Donde:

D: Peso propio losa reparada = 400 kg/m^2.
L: Sobrecarga de uso = 200 kg/m^2.

Además, en la misma sección 20.3.2 del ACI 318S-08, se exige que: “La carga total del ensayo no debe ser menor que el mayor entre (a), (b) y (c)":

(a) 1,15 D + 1,5 L (7.3)

$$1{,}15\ D + 1{,}5\ L = \left(1{,}15 \times 400\ \frac{kg}{m}\right) + \left(1{,}5 \times 200\ \frac{kg}{m}\right) = 760\ \frac{kg}{m^2}$$

(b) 1,15 D + 0,9 L (7.4)

$$\left(1{,}15 \times 400\ \frac{kg}{m^2}\right) + \left(0{,}9 \times 200\ \frac{kg}{m^2}\right) = 640\ \frac{kg}{m^2}$$

(c) 1,3 D + 0,9 L (7.5)

$$1{,}3\ D + 0{,}9\ L = \left(1{,}3 \times 400\ \frac{kg}{m^2}\right) + \left(0{,}9 \times 200\ \frac{kg}{m^2}\right) = 700\ \frac{kg}{m^2}$$

De acuerdo a lo anterior se obtiene:

$$400\ \frac{kg}{m^2} + 425\ \frac{kg}{m^2} = 825\ \frac{kg}{m^2} > 760\ \frac{kg}{m^2}$$

Por lo tanto, se cumple con los requerimientos del ACI 318S-08.

7.2.1.2 Criterio de carga

De la sección 20.4 del Capítulo 20 de la ACI 318S-08, se extraen los requisitos de criterio de carga:

1) Las mediciones deben realizarse en ubicaciones donde se espere la respuesta máxima.
2) La carga de ensayo debe aplicarse en no menos de cuatro incrementos aproximadamente iguales.
3) La carga uniforme de ensayo, debe aplicarse de manera que se asegure su distribución uniforme a la estructura, o parte de la estructura que está siendo ensayada.
4) Debe realizarse un conjunto de mediciones de la respuesta después de que se coloca cada incremento de carga, y después de que se ha colocado el total de la carga sobre la estructura por al menos 24 horas.
5) Debe removerse toda la carga de prueba, inmediatamente después que se han realizado todas las mediciones definidas en el punto 4.
6) Debe realizarse un conjunto final de mediciones de la respuesta, 24 horas después que se ha removido la carga de prueba.

Por lo tanto, la carga de ensayo obtenida se multiplica por el volumen de la losa, para determinar su distribución:

$$\text{Intensidad de carga x Largo útil de la losa x ancho losa} \qquad (7.6)$$

Donde:

Intensidad de carga = 425 kg/m^2.

Largo útil de la losa[41] = 2,4 m.

Ancho losa = 1 m.

$\therefore$ 425 kg/m^2 x 2,4 m x 1 m = 1020 kg. (Se aproxima a 1000 kg)

[41]Se descontaron 20 cm. del largo total de la losa (2,6 m.), correspondiente a los apoyos; por lo tanto la luz de ensayo quedo de 2,4 m.

La carga resultante (1000 kg) se distribuye sobre la superficie de la losa, en cuatro incrementos de 250 kg. cada uno. Para cargar las losas se utilizan bloques de hormigón de aproximadamente 10,5 kg. cada uno, existentes en el laboratorio.

Antes de iniciar con el ensayo, se debe instalar un *deformímetro* en cada losa, el cual mide las deformaciones de la losa en centésimas de milímetros, tal como se aprecia en la Figura 7.1.

La primera medida se obtiene antes de cargar la losa, y luego se obtiene el resto de las mediciones cada 250 kg., hasta llegar a la carga total de 1000 kg. sobre la losa, como se observa en la Figura 7.2 y la Figura 7.3.

Figura 7.1: Prueba de carga – instalación de deformímetro.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.2: Prueba de carga – carga inicial.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.3: Prueba de carga – carga final.
Fuente: Elaboración propia.

7.2.1.3 Criterio de aceptación

Un criterio general de aceptación para el comportamiento de una estructura en la prueba de carga, es que ella no debe mostrar evidencias de falla, como fisuración, descascaramiento o deflexión. A continuación, se presentan los criterios de aceptación, descritos en la sección 20.5 del Capítulo 20 de la ACI 318S-08:

1) La porción de la estructura ensayada no debe mostrar evidencias de falla. El descascaramiento y aplastamiento del concreto comprimido debe considerarse como una indicación de falla.

2) Las deflexiones máximas medidas, deben satisfacer una de las siguientes condiciones:

a) $\Delta_t \leq \frac{l_t^2}{20000\ h}$ (7.7)

b) $\Delta_r \leq \frac{\Delta_t}{4}$ (7.8)

Donde:

Δ_t = Deflexión máxima.

Δ_r = Deflexión residual.

l_t = largo útil de la losa.

h = espesor losa reparada.

c) Si la máxima medida y las deflexiones residuales: Δ_t y Δ_r, no satisfacen las ecuaciones (7.7) y (7.8), se puede repetir la prueba de carga.

3) Los elementos estructurales ensayados no deben tener fisuras que indiquen la inminencia de una falla cortante.
4) En las zonas de elementos estructurales que no cuenten con refuerzo transversal, la aparición de fisuras estructurales inclinadas respecto al eje longitudinal, y que tengan una proyección horizontal mayor que la altura del elemento en el punto medio de la fisura debe ser evaluada.

5) En zonas de anclajes o empalmes por traslapo, la aparición a lo largo de la línea de refuerzo de una serie de fisuras cortas inclinadas o de fisuras horizontales debe ser investigada.

En el caso de este proyecto, se considerará un criterio de aceptación adicional, el cual consiste en comparar las deflexiones máximas medidas con el criterio de flecha máxima[42].

$$\Delta_t \leq \frac{L}{300} \qquad (7.9)$$

Donde, L = Largo útil de la losa.

[42] Libro: “Diseño Estructural” de los autores Rafael Riddell y Pedro Hidalgo; Capítulo 3: Tabla 3.1; Vigas corrientes de piso.

7.2.2 Resultados de la prueba de carga

Tal como se mencionó anteriormente, para ejecutar este ensayo se debe seguir el procedimiento establecido en el capítulo 20 de la ACI 318S-08.

Para comenzar, se determina una carga máxima de 1000 kg., la cual se distribuye uniformemente sobre la superficie de la losa reparada en cuatro incrementos iguales de 250 kg. cada uno.

Debe realizarse un registro de las deflexiones provocadas, después de colocar cada incremento de carga, y después de 24 hrs. con el total de la carga sobre la estructura.

En seguida, se procede a retirar la carga de prueba, midiendo y registrando las deflexiones que provoca cada descarga, incluyendo la medida 24 hrs. después de haber removido totalmente la carga.

Para analizar los resultados de la prueba de carga, se realiza una tabla que registra cada carga colocada y la deflexión que ésta provoca sobre la losa reparada. Tal como se observa en la Tabla VII.1, donde se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el ensayo de prueba de carga para las tres losas reparadas.

Además, de acuerdo a los resultados de la tabla anterior, se elabora una gráfica para cada una de las losas reparadas; esta gráfica representa la carga en función de la deformación. Desde la Figura 7.4 a la Figura 7.6, se observa la representación gráfica de cada losa reparada.

Así mismo, es fundamental evaluar si se satisfacen los criterios de aceptación del ACI 318S-08 y el criterio de flecha máxima, indicados en las ecuaciones (7.7), (7.8) y (7.9). Por ende, se realiza un análisis de las mediciones de *deflexión máxima* y *deflexión residual*. En la Tabla VII.2 se presenta un resumen de los criterios de aceptación de las tres losas reparadas.

		Losa N°1	Losa N°2	Losa N°3
	Carga (kg/m^2)	**Deflexión (mm)**	**Deflexión (mm)**	**Deflexión (mm)**
	0	0	0	0
	250	1,41	0,24	0,57
	500	2,01	0,61	2,44
	750	2,71	1,03	3,23
Deflexión instantánea	1000	3,34	1,54	4,02
24 hrs. después (Δ_t)	1000	3,78	2,06	4,39
	750	3,67	1,94	4,19
	500	3,49	1,75	3,9
	250	3,24	1,51	3,47
	0	2,84	1,15	2,96
24 hrs. después (Δ_r)	0	2,71	1,04	2,84

Tabla VII.1: Resumen deflexiones de las tres losas reparadas.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados presentados, se observa que:

- La losa N°3 tiene una deflexión instantánea que supera en un 6% y en un 161%, la deflexión instantánea de la losa N°1 y la losa N°2, respectivamente.
- La deflexión máxima de la losa N°3, es un 15% y un 113% mayor en la losa N°1 y la losa N°2, respectivamente.
- La deflexión residual, la losa N°3 se deformó un 4% y un 173% más que la losa N°1 y la losa N°2, respectivamente.

Por ende, se puede concluir que la losa N°2 es la que menos se deformó en este ensayo, mientras que la losa N°3 fue la que más se deformó de las tres losas reparadas.

	$\Delta_t \leq \frac{l_t^2}{20000\ h}$	$\Delta_r \leq \frac{\Delta_t}{4}$	$\Delta_t \leq \frac{L}{300}$
Losa N°1	No cumple	No cumple	Cumple
Losa N°2	No cumple	No cumple	Cumple
Losa N°3	No cumple	No cumple	Cumple

Tabla VII.2: Resumen criterio de aceptación de las losas reparadas.
Fuente: Elaboración propia.

Según los datos, se observa que las condiciones de las deflexiones máximas y remanentes de las tres losas reparadas, no cumplen con los criterios de aceptación impuestos en el ACI 318S-08. Las losas, solo cumplen con el criterio de flecha máxima.

De acuerdo a los datos de la Tabla VII.2, se elaboró una gráfica para cada losa reparada, tal como se observa en la Figura 7.4, 7.5 y 7.6,

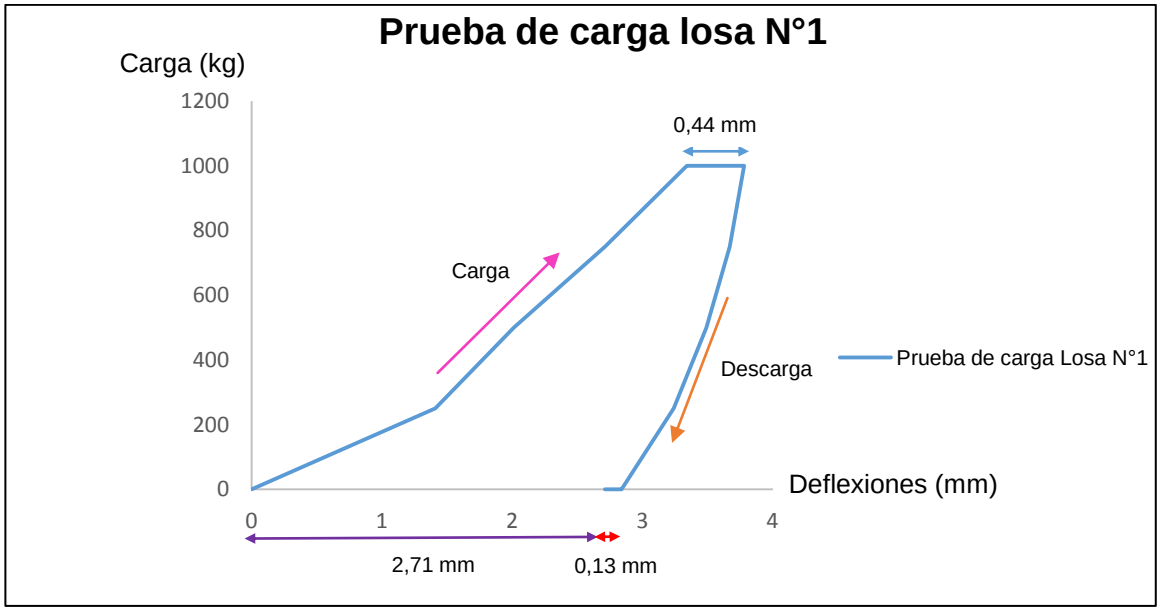

Figura 7.4: Gráfico prueba de carga losa N°1.
Fuente: Elaboración propia.

Interpretación del gráfico de la losa N°1:

- Después de colocar el total de la carga de prueba, se obtiene una deformación instantánea de 3,34 mm.
- Se observa que 24 hrs. después de retirar la carga, se produce una deformación máxima de 3,78 mm.
- Tras colocar toda la carga de prueba, y esperar 24 hrs. para retirar el total de la carga, se produjo una deformación por carga mantenida de 0,44 mm.
- Entre la descarga de la losa, y después de 24 hrs. de retirar el total de la carga de prueba, la recuperación instantánea de la losa fue de 0,13 mm.
- Pasadas las 24 hrs. después de quitar totalmente la carga de prueba, resultó una deformación remanente de 2,71 mm.

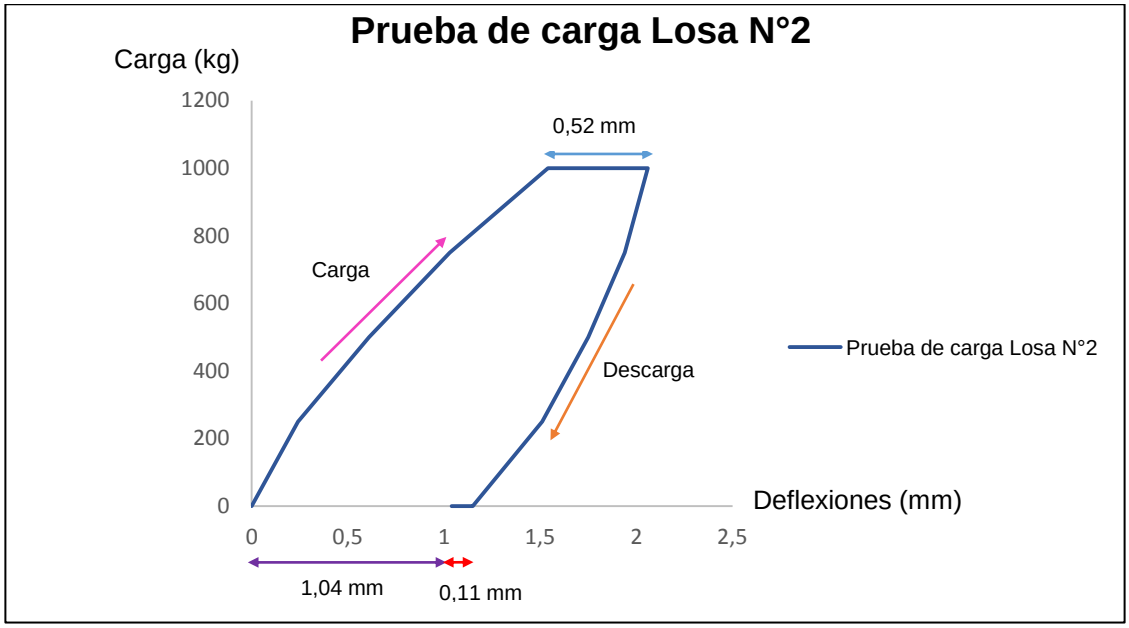

Figura 7.5: Gráfico prueba de carga losa N°2.
Fuente: Elaboración propia.

De la gráfica de la losa N°2 se obtiene:

- Después de colocar el total de la carga de prueba, se obtiene una deformación instantánea de 1,54 mm.
- Se observa que 24 hrs. después de retirar la carga, se produce una deformación máxima de 2,06 mm.
- Tras colocar toda la carga de prueba, y esperar 24 hrs. para retirar el total de la carga, se produjo una deformación por carga mantenida de 0,52 mm.
- Entre la descarga de la losa, y después de 24 hrs. de retirar el total de la carga de prueba, la recuperación instantánea de la losa fue de 0,11 mm.
- Pasadas las 24 hrs. después de quitar totalmente la carga de prueba, resultó una deformación remanente de 1,04 mm.

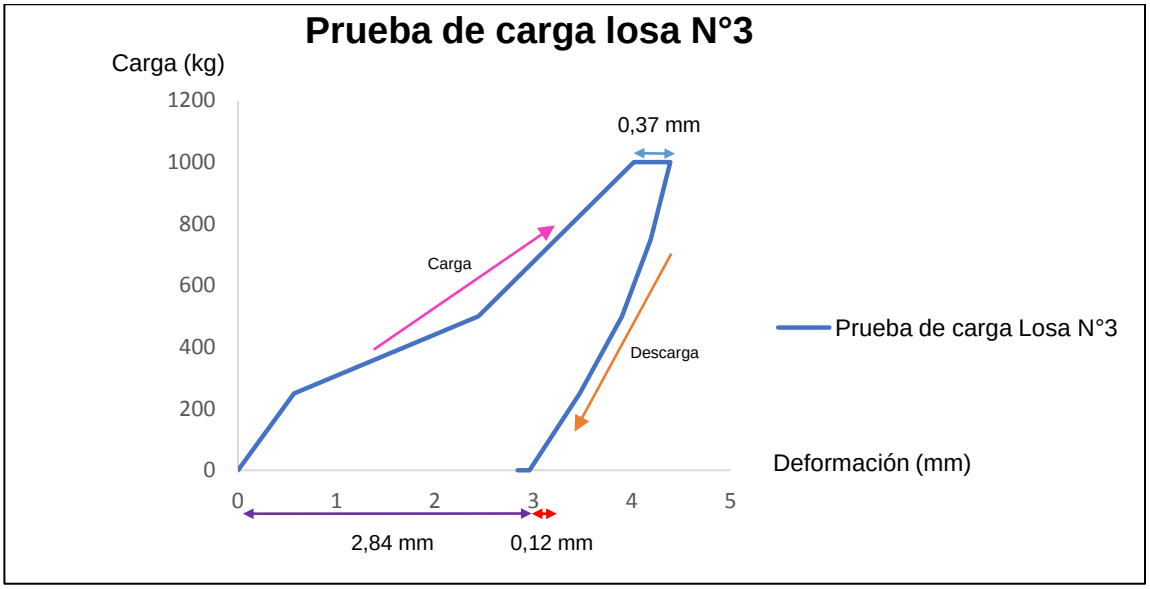

Figura 7.6: Grafico prueba de carga losa N°3.
Fuente: Elaboración propia.

Interpretación del gráfico de la losa N°3:

- Después de colocar el total de la carga de prueba, se obtiene una deformación instantánea de 4,02 mm.
- Se observa que 24 hrs. después de retirar la carga, se produce una deformación máxima de 4,39 mm.
- Tras colocar toda la carga de prueba, y esperar 24 hrs. para retirar el total de la carga, se produjo una deformación por carga mantenida de 0,37 mm.
- Entre la descarga de la losa, y después de 24 hrs. de retirar el total de la carga de prueba, la recuperación instantánea de la losa fue de 0,12 mm.
- Pasadas las 24 hrs. después de quitar totalmente la carga de prueba, resultó una deformación remanente de 2,84 mm.

7.2.3 Análisis de resultados

Las tres losas reparadas sometidas a este ensayo, presentaron un comportamiento viscoplástico[43].

Las losas cumplen con el criterio de flecha máxima $\left({}^{L}/_{300}\right)$, y satisfacen el primer y tercer criterio de aceptación del ACI 318S-08. Sin embargo, las losas reparadas no cumplieron con las condiciones establecidas en las ecuaciones (7.7) y (7.8) del segundo criterio de aceptación del ACI 318S-08.

7.3 Ensayo de cargas cíclicas

Todo material sometido a cargas cíclicas o a cargas que varían en el tiempo, se ve afectado por el fenómeno de *fatiga,* es decir, los materiales que soportan cargas alternadas, fallan por esfuerzos que superan el límite elástico.

[43] La respuesta de un material sometido a carga es viscoplástica, cuando después de retirar la carga, el material sigue respondiendo con el tiempo.

En la rotura por fatiga aparece una microgrieta que crece con cada ciclo de carga, hasta alcanzar un tamaño tal que la sección es incapaz de soportar la carga máxima en el ciclo, y finalmente falla de forma frágil o dúctil, según las características del material. Generalmente, la rotura se inicia en un punto de concentración de esfuerzos.

El ensayo a carga cíclica consiste en someter un elemento a cierta cantidad de ciclos de carga repetida, con el objetivo de analizar las características resistentes de los materiales cuando trabajan bajo cargas fluctuantes (ver Figura 7.7). La representación gráfica de este ensayo, indica el número de ciclos requeridos para producir el fallo del material en distintos niveles de esfuerzos cíclicos.

Figura 7.7: Ensayo de carga cíclica.
Fuente: Elaboración propia.

7.3.1 Ensayo carga cíclica losa N°1

La losa N°1 fue sometida a dos ciclos de carga, cuyos resultados se representaron en la Figura 7.8 y la Figura 7.9.

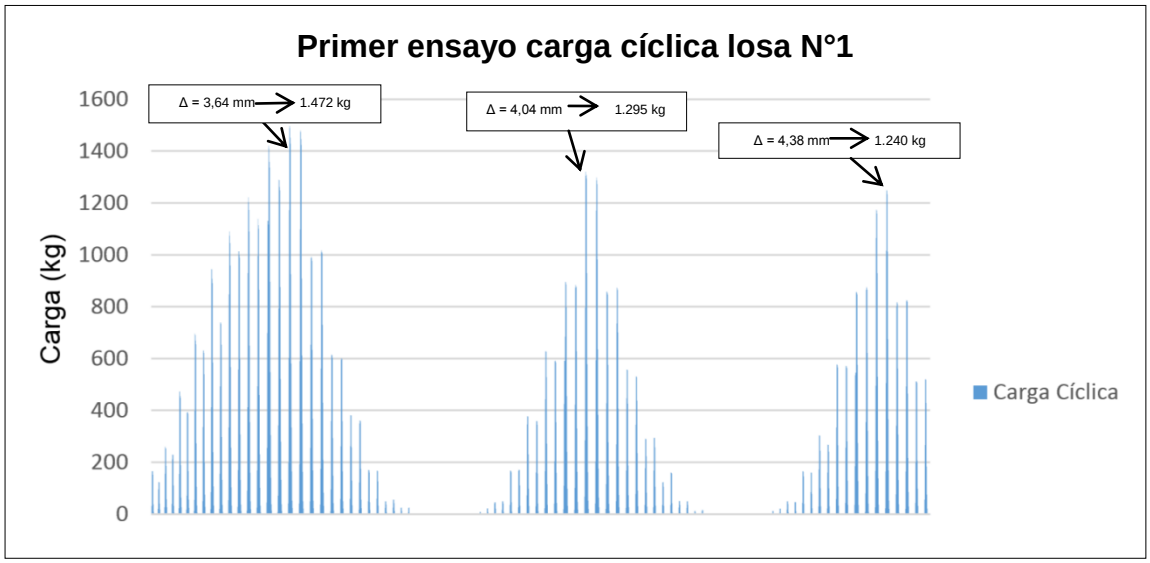

Figura 7.8: Primer ciclo losa N°1.
Fuente: Elaboración propia.

Los puntos más altos del primer ciclo de carga, corresponden a las cargas máximas del ciclo, las cuales se indican a continuación:

- Carga:1.472 kg → Desplazamiento: 3,64 mm.
- Carga: 1.295 kg → Desplazamiento: 4,04 mm.
- Carga: 1.240 kg → Desplazamiento: 4,38 mm.

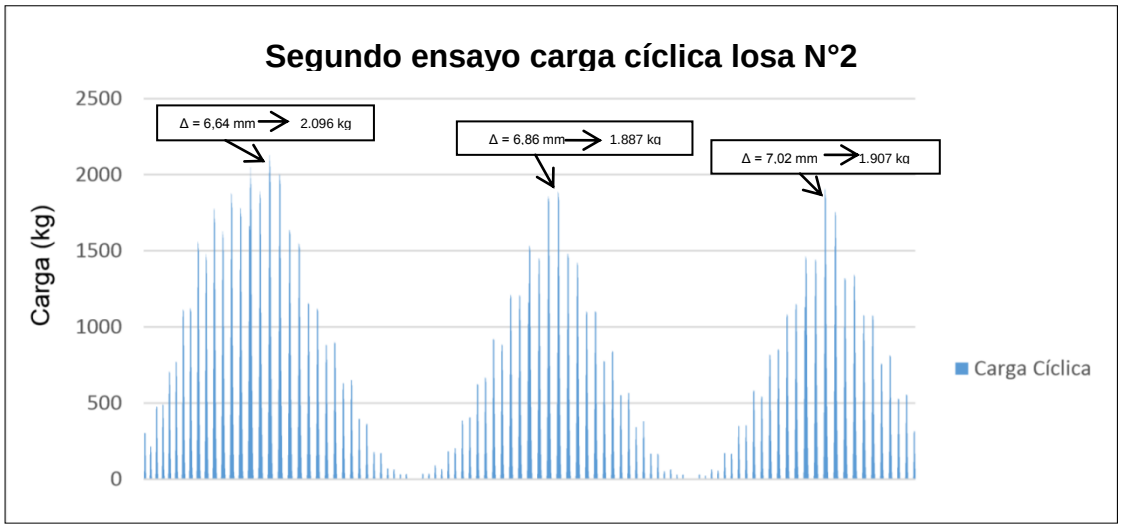

Figura 7.9: Segundo ciclo losa N°1.
Fuente: Elaboración propia.

Los puntos más altos del segundo ciclo de carga, corresponden a las cargas máximas del ciclo, las cuales se indican a continuación:

- Carga: 2.096 kg → Desplazamiento: 6,64 mm.
- Carga: 1.887 kg → Desplazamiento: 6,86 mm.
- Carga: 1.907 kg → Desplazamiento: 7,02 mm.

Al observar los resultados de cada ensayo de carga cíclica, se aprecia que los desplazamientos del primer ciclo de carga son de aproximadamente 4 mm, mientras que en el segundo ciclo de carga, el desplazamiento promedio es igual a 7 mm. Por ende, se advierte que los desplazamientos del segundo ciclo casi se duplicaron con respecto a los desplazamientos del primer ciclo.

7.3.2 Ensayo carga cíclica losa N°2

La losa N°2 fue sometida a dos ciclos de carga, cuyos resultados se representaron en la Figura 7.10 y la Figura 7.11.

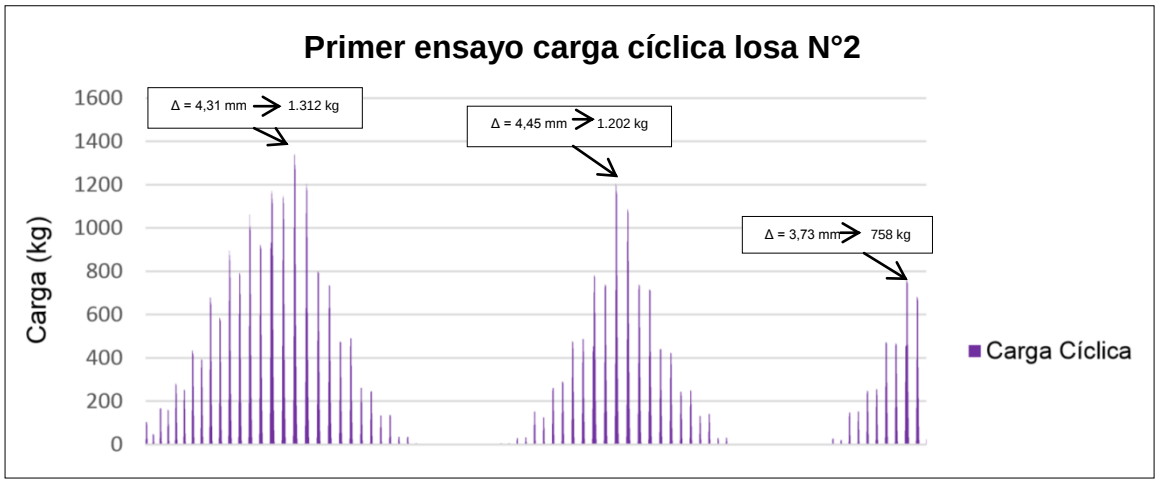

Figura 7.10: Primer ciclo losa N°2.
Fuente: Elaboración propia.

Los puntos más altos del primer ciclo de carga, corresponden a las cargas máximas del ciclo, las cuales se indican a continuación:

- Carga: 1.312 kg → Desplazamiento: 4,31 mm.
- Carga: 1.202 kg → Desplazamiento: 4,45 mm.
- Carga: 758 kg → Desplazamiento: 3,73 mm.

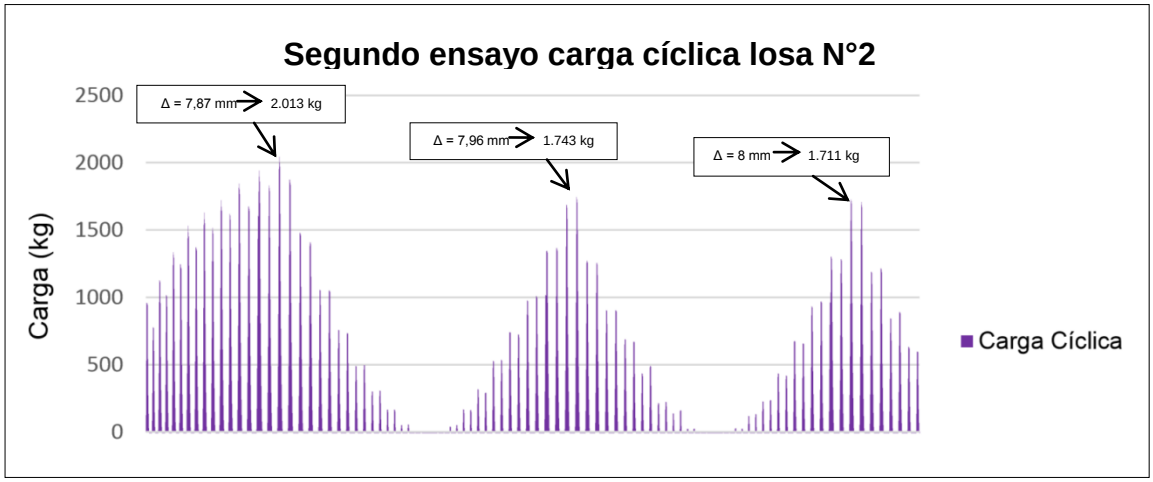

Figura 7.11: Segundo ciclo losa N°2.
Fuente: Elaboración propia.

Los puntos más altos del segundo ciclo de carga, corresponden a las cargas máximas del ciclo, las cuales se indican a continuación:

- Carga: 2.013 kg → Desplazamiento: 7,87 mm.
- Carga: 1.743 kg → Desplazamiento: 7,96 mm.
- Carga: 1.711 kg → Desplazamiento: 8 mm.

Al analizar los resultados de cada ensayo de carga cíclica, se observa que los desplazamientos del primer ciclo de carga son de aproximadamente 4 mm, mientras que en el segundo ciclo de carga, el desplazamiento promedio es igual a 8 mm. Por lo tanto, se advierte que los desplazamientos duplicaron su valor entre el primer y segundo ciclo.

7.3.3 Análisis de resultados

Finalizado este ensayo, las losas reparadas (losa N°1 y losa N°2) mantuvieron un comportamiento inelástico[44] e histerético[45]. Además, no se observó algún tipo de deterioro aparente, ni la aparición de fisuras o grietas en ninguna de las dos losas reparadas.

Las deformaciones resultantes de cada losa reparada, variaron entre cada ciclo de carga, lo cual fue imprevisto, ya que las losas solo fueron sometidas a dos ciclos de carga, y se esperaban deformaciones de valor similar. Esta variación pudo ser causada por un error aleatorio del sensor que mide las deformaciones durante el ensayo. También, es posible que la lectura de cada deformación, haya sido afectada por la deformación residual que queda entre cada lectura.

Por otro lado, para realizar los ensayos de carga cíclica, las losas reparadas se apoyaron sobre probetas cúbicas ensayadas, las cuales al estar deterioradas

[44]Comportamiento inelástico de un material, es cuando un material presenta deformaciones permanentes cuando éste se descarga.
[45]Histéresis: Tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado.

pudieron provocar una inestabilidad en cada losa apoyada, e influir en los valores de las deformaciones obtenidas.

Además, es probable que para obtener información más exacta del comportamiento real de la losa reparada, sea necesaria una mayor cantidad de ensayos de carga cíclica.

7.4 Ensayo a rotura

El objetivo del ensayo a rotura, es determinar la resistencia última de un elemento frente a cargas perpendiculares a su plano, mediante un ensayo experimental de flexión con carga vertical.

La gráfica de este ensayo, representa la curva carga-desplazamiento, donde el punto más elevado de la curva, corresponde a la carga máxima bajo la cual el elemento falla. También de esta gráfica, se pueden obtener características y resistencias que son útiles en el diseño de un elemento.

En este estudio, las tres losas reparadas serán sometidas al ensayo de rotura, para obtener qué cargas provocan el fallo en cada una de ellas. El procedimiento de este ensayo, consiste en colocar cada una de las losas en la máquina de ensayos MAC V, y aplicar una carga puntual en el centro de la luz de ensayo, la cual va aumentando hasta que alcanza el valor de rotura (ver Figura 7.12).

A partir de este ensayo, se obtendrán características importantes de las losas reparadas, como el *módulo de elasticidad* y la *tensión por flexión*.

A continuación, se presentan los resultados del ensayo a rotura de las tres losas reparadas.

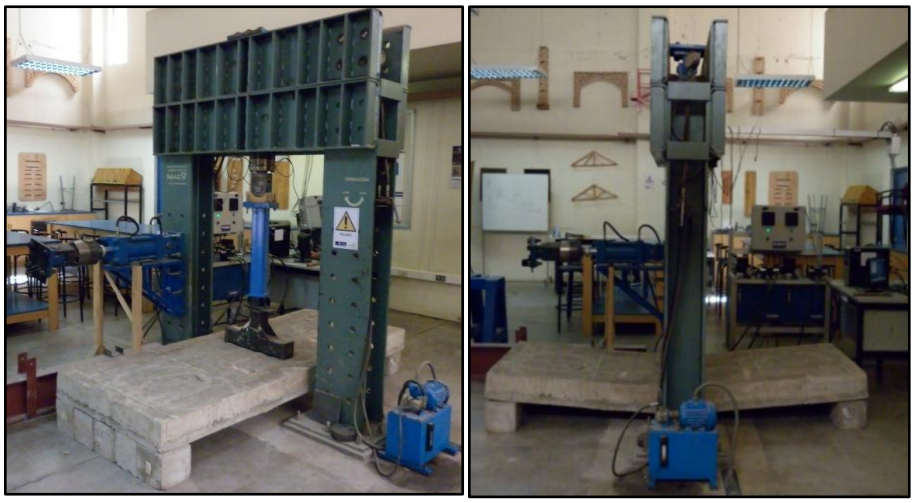

Figura 7.12: Losa antes y después del ensayo a rotura.
Fuente: Elaboración propia.

7.4.1 Ensayo a rotura losa N°1

La gráfica con los resultados del ensayo a rotura de la losa N°1, está representada en la Figura 7.13. Se observa que la carga máxima fue de 5.726 kg., con una deformación de 37,71 mm.

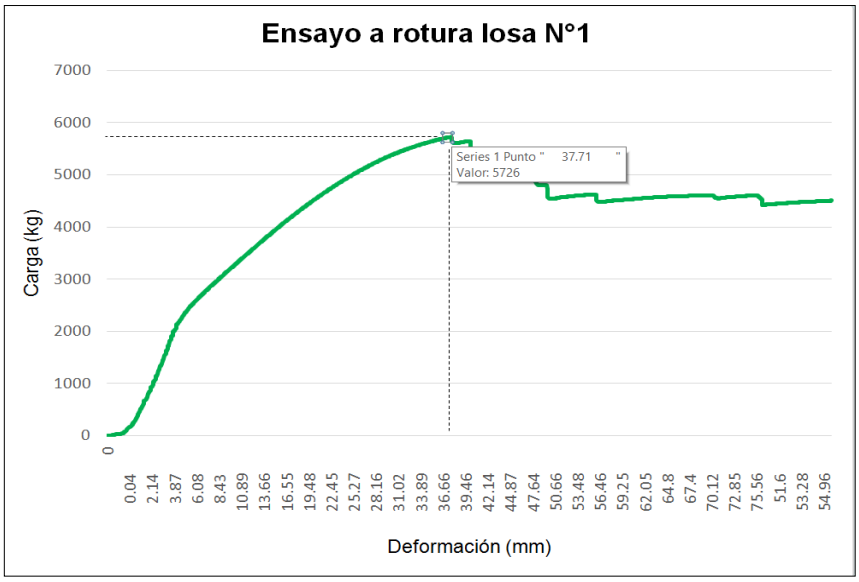

Figura 7.13: Gráfico ensayo a rotura losa N°1.
Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, a consecuencia de este ensayo, en la superficie de la losa N°1 se produjo una grieta por flexión de ancho aproximado de 0,8 mm, y a su vez, esta grieta originó la aparición de grietas más pequeñas en el borde de la losa, de ancho aproximado entre 0,5 mm - 0,75 mm; tal como se observa en la Figura 7.14.

Figura 7.14: Grieta post-ensayo a rotura losa N°1.
Fuente: Elaboración propia.

7.4.2 Ensayo a rotura losa N°2

La gráfica con los resultados del ensayo a rotura de la losa N°1, está representada en la Figura 7.15. Se observa que la carga máxima fue de 5.362 kg., con una deformación de 30,37 mm.

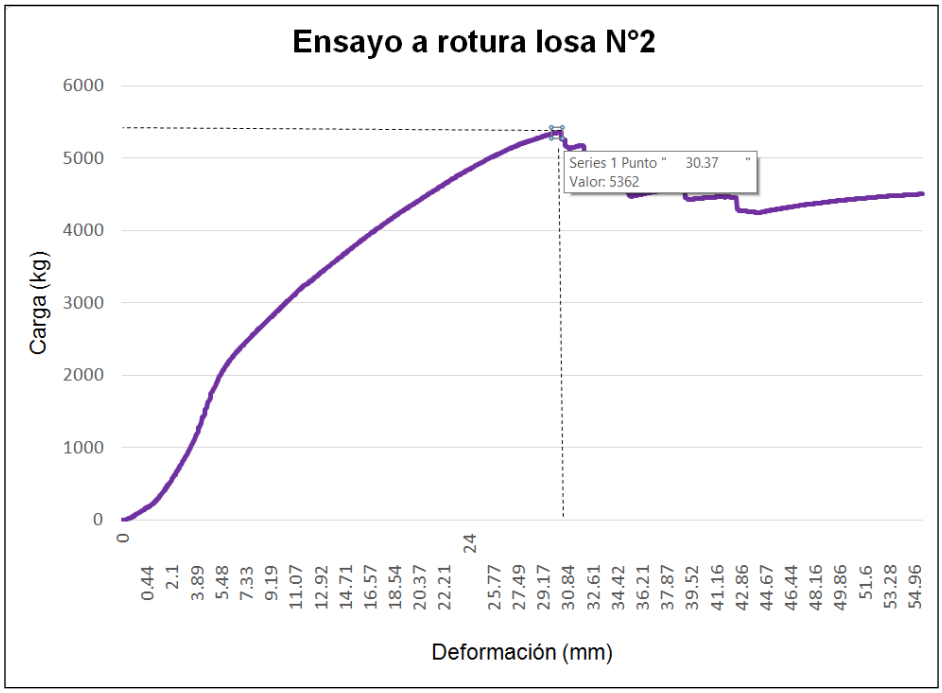

Figura 7.15: Gráfico ensayo a rotura losa N°2.
Fuente: Elaboración propia.

Como consecuencia del ensayo a rotura, se produjo en la superficie de la losa N°2 una grieta por flexión de ancho aproximado de 1 mm, y a su vez, esta grieta causó la aparición de grietas más pequeñas en el borde de la losa, de ancho aproximado entre 0,5 mm - 0,75 mm; tal como se observa en la Figura 7.16.

Figura 7.16: Grieta post-ensayo a rotura losa N°2.
Fuente: Elaboración propia.

7.4.3 Ensayo a rotura losa N°3

La gráfica con los resultados del ensayo a rotura de la losa N°1, está representada en la Figura 7.17. Se observa que la carga máxima fue de 4.578 kg., con una deformación de 52,18 mm.

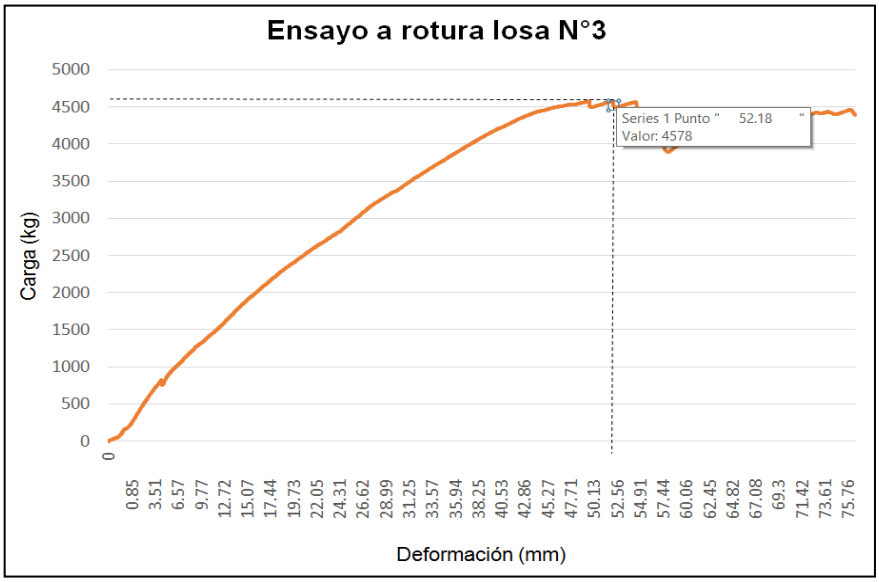

Figura 7.17: Gráfico ensayo a rotura losa N°3.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7.18, se aprecia una grieta por flexión de ancho aproximado de 1,5 mm, la cual fue producida por el ensayo a rotura de la losa N°3.

Figura 7.18: Grieta post-ensayo a rotura losa N°3.
Fuente: Elaboración propia.

7.4.4 Análisis de resultados

Las tres losas reparadas, sufrieron grietas por flexión. Durante el ensayo y a medida que se aproximaba la carga de rotura (zona plástica), se comenzaron a producir las primeras fisura, hasta provocar la falla final.

En el caso de la losa N°1 y la losa N°2, las grietas centrales originaron la aparición de grietas más pequeñas, a diferencia de la losa N°3, que solo tiene una grieta principal. Esto pudo ser causado porque la carga de rotura de la losa N°3 es aproximadamente 1000 kg menor, que la carga de rotura de las otras losas.

Para analizar más detalladamente los resultados obtenidos del ensayo a rotura, en la Tabla VII.3, se presenta un resumen con los principales datos de cada losa reparada.

	Losa N°1	Losa N°2	Losa N°3
Rotura (kg)	5.726	5.362	4.578
Deflexión (mm)	37,71	30,37	52,18

Tabla VII.3: Resumen ensayo a rotura.
Fuente: Elaboración propia.

Al observar los datos de esta tabla, se aprecia que la losa N°1 y la losa N°2, tuvieron mayor resistencia a la rotura, ya que superan entre un 16% y un 25% a la carga de rotura de la losa N°3.

Este resultado es contrario a lo que puede pensarse, ya que la losa N°3 tiene una armadura ϕ10, y las otras losas una armadura ϕ8. Este hecho, puede ser a causa del severo daño por sobrecarga que presenta la losa N°3.

Se aprecia que la carga de rotura de la losa N°1 es superior en un 7%, a la carga máxima de la losa N°2. Además, la deflexión que se produce sobre la losa N°1, es mayor en un 20% a la deflexión de la losa N°2.

Por ende, la carga de rotura y la deflexión que esta provoca sobre la losa N°1, son mayores que en la losa N°2.

7.5 Características de las losas reparadas

7.5.1 Cálculo módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad[46] es un parámetro característico de cada material[47]. Se define como la pendiente de la curva carga-deformación en la zona elástica, por ende, corresponde a una medida de la rigidez del material, es decir, es la resistencia del material a la deformación elástica.

Por lo tanto, para calcular el módulo de elasticidad de cada losa reparada, se considera la ecuación (7.11)[48], cuyos datos se obtendrán de las gráficas de cada ensayo a rotura; específicamente, de la zona elástica de la curva carga-deformación.

$$E = \frac{P\,L^3}{48\,I\Delta} \qquad (7.10)$$

Donde:

- Carga: P (kg).
- Deformación: Δ (cm).

[46] Módulo de elasticidad secante: Relación del esfuerzo con la deformación en cualquier punto de la curva en un diagrama esfuerzo-deformación. Es la pendiente de una línea desde el origen hasta el punto característico donde se inicia la fluencia.
[47] Sin embargo, en este caso el módulo de elasticidad de las losas reparadas, será considerado como si estas losas fueran de un material homogéneo.
[48] La fórmula expresada en la ecuación (6.18), se calculó considerando que el ensayo a rotura, fue realizado con una carga puntual en el centro de la luz de ensayo.

- Largo[49] = L = 240 cm.
- Ancho losa: b = 100 cm.
- Espesor losa: h = 17 cm.
- Inercia: $I = \frac{b\,h^3}{12} = \frac{(100\text{ cm})\,(17)^3}{12} = 40.942\text{ cm}^4$.

En la Tabla VII.4, se presenta un resumen del el módulo de elasticidad obtenido para cada losa reparada.

	Losa N°1	Losa N°2	Losa N°3
P (kg)	5.726	5.362	4.578
Δ (cm)	3,771	3,037	5,218
I (cm^4)	40.942	40.942	40.942
L (cm)	240	240	240
$E = \frac{P\,L^3}{48\,I\Delta}\left(\frac{kg}{cm^2}\right)$	10.681	12.419	6.172

Tabla VII.4: Resumen módulo de elasticidad.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de estos datos, se observa que de las tres losas reparadas, la losa N°2 tiene el módulo de elasticidad de mayor valor, por ende es la más rígida. En cambio, la losa N°3 es la más flexible de las tres losas, ya que tiene el menor módulo de elasticidad.

[49] El largo total de la losa es de 260 cm, pero se descuenta 20 cm. de la zona de los apoyos.

7.5.2 Cálculo tensión de rotura por flexión

Por otro lado, la tensión de rotura por flexión se define como la tensión máxima que un material soporta. Para obtener su valor, se utilizan los datos obtenidos mediante el ensayo a rotura, y se aplica la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{M_S}{W} \tag{7.11}$$

Donde:

- Momento solicitante[50]: $M_s = \frac{PL}{4}$ (kg-m). (7.12)
- Carga de rotura: P (kg).
- Momento resistente: $W = \frac{I}{\upsilon}$ (cm^3). (7.13)
- Inercia: $I = \frac{bh^3}{12}$. (7.14)
- Distancia de la fibra neutra a la fibra traccionada/comprimida:

  $\upsilon = \frac{h}{2}$. (7.15)

Para este caso, en la Tabla VI.6, se indica la tensión por flexión de cada losa:

	Losa N°1	Losa N°2	Losa N°3
P (kg)	5.726	5.362	4.578
M_S (kg-cm)	343.560	321.720	274.680
W (cm^3)	4.817	4.817	4.817
$\sigma = \frac{M_S}{W}\left(\frac{kg}{cm^2}\right)$	71	67	57

Tabla VII.5: Resumen tensión por flexión.
Fuente: Elaboración propia.

[50] La ecuación (6.20) se obtiene del modelo de viga propuesta en el ensayo a rotura, revisar Figura 6.24.

De este resumen, se puede apreciar que la losa N°1 tiene la mayor tensión por flexión de las tres losas reparadas. Siendo la losa N°3, la que posee la tensión por flexión de menor valor.

CAPÍTULO 8: LOSAS EXPERIMENTALES ANTES Y DESPUÉS DE LA REPARACIÓN

8.1 Introducción

A partir de resultados obtenidos en los ensayos de prueba de carga, carga cíclica y rotura de las losas experimentales antes[51] y después de la reparación[52], se realizó una recopilación de los principales datos, para ser comparados y analizados, con la finalidad de evaluar la efectividad de la metodología de reparación propuesta.

8.2 Prueba de carga

A continuación, en la Tabla VIII.1, se presenta un resumen de los resultados del ensayo de prueba de carga[53], y en la Tabla VIII.2 se expone un resumen de los criterios de aceptación que cumplen las losas experimentales antes y después de la reparación.

[51] Los datos de las tablas presentadas en este capítulo, fueron extraídos de la Tesis: “Diseño de losas experimentales de ladrillos de arcilla hechos a mano, reforzadas con hormigón armado”.
[52] A lo largo de este capítulo, las losas experimentales antes y después de la reparación, se denominarán *losa original* y *losa reparada* respectivamente.
[53] Los datos de las tablas presentadas en este capítulo, fueron extraídos de la Tesis: “Diseño de losas experimentales de ladrillos de arcilla hechos a mano, reforzadas con hormigón armado”.

	Losa N°1 Original (mm)	Losa N°1 Reparada (mm)	Losa N°2 Original (mm)	Losa N°2 Reparada (mm)	Losa N°3 Original (mm)	Losa N°3 Reparada (mm)
Deformación Instantánea	2,35	3,34	1,63	1,54	1,09	4,02
Deformación Máxima	2,46	3,78	2,37	2,06	1,45	4,39
Deformación Carga mantenida	0,11	0,44	0,74	0,52	0,36	0,37
Recuperación Instantánea	0,10	0,13	0,17	0,11	0,18	0,12
Deformación Remanente	2,15	2,71	0,93	1,04	0,79	2,84

Tabla VIII.1: Resumen deformaciones – losa original v/s losa reparada.
Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla VIII.1, se observa que:

- En el caso de la deformación máxima de la losa N°1, la losa reparada supera en un 53% a la losa original.
- En la losa N°2, la deformación máxima de la losa original es un 13% mayor que la losa reparada.
- La deformación máxima de la losa N°3 original se triplicó en la losa reparada.
- La deformación remanente de la losa N°1, es un 26% mayor en la losa reparada.
- La losa N°2, tiene una deformación remanente un 11% menor en la losa original.
- La losa N°3 reparada, tiene una deformación remanente que supera en un 260% a la losa N°3 original.
- De las losas originales, la losa N°3 tuvo la menor deformación máxima. Se deformó un 70% y un 63% menos que la losa N°1 y la losa N°2, respectivamente.

- La deformación remanente de la losa original N°3, fue un 63% y un 15% menor en la losa original N°1 y N°2, respectivamente.
- Mientras que de las losas reparadas, la losa N°3 fue la tuvo la deformación máxima más alta. Se deformó un 16% y un 113% más que la losa N°1 y la losa N°2, respectivamente.
- De las losas reparadas, la losa N°3 tuvo la deformación remanente de mayor valor. Superó en un 5% y en un 173% a la losa N°1 y N°2, respectivamente.

	$\Delta_t \leq \frac{l_t^2}{20000\ h}$	$\Delta_r \leq \frac{\Delta_t}{4}$	$\Delta_t \leq \frac{L}{300}$
Losa N°1 Original	No Cumple	No Cumple	Cumple
Losa N°1 Reparada	No cumple	No Cumple	Cumple
Losa N°2 Original	Cumple	No cumple	Cumple
Losa N°2 Reparada	No cumple	No cumple	Cumple
Losa N°3 Original	Cumple	No cumple	Cumple
Losa N°3 Reparada	No cumple	No cumple	Cumple

Tabla VIII.2: Criterio de aceptación – losa original v/s losa reparada.
Fuente: Elaboración propia.

En el caso del criterio de aceptación de las losas experimentales antes y después de la reparación, se observa que :

- Las losas originales y las losas reparadas, cumplen con el criterio de flecha máxima.
- La losa original N°1 no cumple con ninguna de las condiciones del ACI 318S-08.
- Las losas originales N°2 y N°3, solo cumplen con la primera de las dos condiciones de las deflexiones máximas medidas, indicadas en el ACI 318S-08.

- Ninguna de las tres losas reparadas cumplió con los criterios de aceptación impuestos por la ACI 318S-08.

8.3 Ensayo de carga cíclica

La Tabla VIII.3 presenta un resumen de los resultados del ensayo a carga cíclica de las losas originales y losas reparadas.

		Primer ensayo de carga cíclica		Segundo ensayo de carga cíclica	
		Carga (kg)	Desplazamiento (mm)	Carga (kg)	Desplazamiento (mm)
Losa Original	Losa N°1	1.330	10,25	2,024	9,99
		1.266	10,30	1.774	10,13
		1.174	10,36	1.790	10,33
	Losa N°2	1.891	10,32	1.658	10,11
		1.664	10,30	1.365	10,31
		1.653	10,30	1.246	10,28
Losa Reparada	Losa N°1	1.472	3,64	2.096	6,64
		1.295	4,04	1.887	6,86
		1.240	4,38	1.907	7,02
	Losa N°2	1.312	4,31	2.013	7,87
		1.202	4,45	1.743	7,96
		758	3,73	1.711	8

Tabla VIII.3: Resumen ensayo a carga cíclica – losa original v/s losa reparada.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de estos datos, se observa que los desplazamientos se mantuvieron constantes en cada ciclo de carga de las losas originales. Mientras que en las losas reparadas, los desplazamientos fueron irregulares con cada ciclo.

En el primer ciclo de carga de las dos losas reparadas, los desplazamientos fueron de aproximadamente 4 mm, mientras que en el segundo ciclo, estos desplazamientos se duplicaron. Estos resultados pudieron verse influenciados por las circunstancias en que se desarrolló el ensayo, y las condiciones en que se encuentra la losa.

8.4 Ensayo a rotura

En la Tabla VIII.4 se expone un resumen de los resultados del ensayo a rotura de las tres losas experimentales, antes y después de su reparación.

	Carga Rotura (kg)	Deformación (mm)
Losa N°1 Original	2.750	28,24
Losa N°1 Reparada	5.726	37,71
Losa N°2 Original	2.700	17,60
Losa N°2 Reparada	5.362	30,37
Losa N°3 Original	4.700	18,68
Losa N°3 Reparada	4.578	52,18

Tabla VIII.4: Resumen ensayo a rotura – losa original v/s losa reparada.
Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados del ensayo a rotura, se observa que la carga máxima de la losa N°1 y la losa N°2, se duplicó en losas reparadas. A diferencia de la losa

reparada N°3, que obtuvo una carga máxima un 3% menor que la losa N°3 original.

De las tres losas reparadas, la losa N°3 tuvo la deformación más alta por carga de rotura. Se deformó un 38% y un 72% más que la losa N°1 y N°2, respectivamente.

En cambio, la losa original que más se deformó por carga de rotura, fue la losa N°1, cuya deformación superó en un 38% a la losa N°2, y en un 34% a la losa N°3.

A continuación, en la Tabla VIII.5, se presenta un resumen con las características de las tres losas experimentales, antes y después de su reparación.

	Losa N°1 Original	Losa N°1 Reparada	Losa N°2 Original	Losa N°2 Reparada	Losa N°3 Original	Losa N°3 Reparada
Módulo de elasticidad (kg/cm^2)	78.849	10.681	79.570	12.419	67.920	6.172
Tensión por flexión (kg/cm^2)	36	71	35	67	59	57

Tabla VIII.5: Resumen características de las losas – losa original v/s losa reparada.
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los datos expuestos en la tabla VIII.5, se observa que el módulo de elasticidad de las losas originales es mayor que el módulo de las losas reparadas.

En la losa N°1, el módulo de elasticidad de la losa original es un 87% mayor que en la losa reparada. En la losa N°2, el módulo de elasticidad de la losa reparada es un 84% menor con respecto al módulo de la losa original. Y según los resultados de la losa N°3, el módulo de elasticidad de la losa original supera en un 91% al módulo de elasticidad de la losa reparada.

Por otro lado, en las losas N°1 y N°2, la tensión por flexión de las losas originales es el doble que en las losas reparadas; y la tensión por flexión de la losa N°3, indica que la losa reparada es un 3% menor con respecto a la losa original.

8.5 Análisis de resultados

Según los datos obtenidos del ensayo a rotura, las losas experimentales N°1 y N°2 recuperaron su capacidad estructural después de la reparación, ya que duplicaron su carga máxima. Al contrario de la losa N°3, que no pudo recuperar su capacidad de resistencia después de la reparación.

A partir del cálculo del módulo de elasticidad, se advierte que las tres losas reparadas resultaron ser más flexibles que las losas originales.

El aumento de la tensión máxima de las losas reparadas, se le adjudica al método de reparación con ferrocemento.

CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES

El estudio realizado tenía como objetivo, verificar la capacidad del método de reparación con ferrocemento, para recuperar tres losas experimentales dañadas estructuralmente, tras haber sido sometidas a los ensayos de prueba de carga, carga cíclica y rotura.

Aunque los ensayos a los cuales se sometieron las losas experimentales se desarrollaron en condiciones desfavorables, debido a que las losas no fueron previamente restauradas antes de comenzar con la reparación, los resultados obtenidos en el ensayo a rotura, indicaron que las losas reparadas con armadura ϕ8, duplicaron su capacidad estructural; solo la losa reparada con armadura ϕ10 estuvo a un 3% de recuperar su resistencia máxima. Por ende, se considerará que el método de reparación con ferrocemento cumple con el objetivo general planteado.

Además, se demostró que las losas reparadas si son aptas para resistir las cargas necesarias, para ser utilizadas en obras habitacionales.

Por otro lado, debido a que las losas experimentales están elaboradas con ladrillos de arcilla artesanales, y no existe un sistema de diseño específico para ellas, se propuso una metodología de reparación con ferrocemento, cuyos fundamentos de diseño, son similares a los criterios de diseño especificados en los métodos de reparación que se aplican en las losas de hormigón.

Gracias a los resultados del ensayo a rotura, se demostró que el método de reparación con ferrocemento, puede ser aplicado para recuperar o reforzar cualquier tipo losa que esté compuesta por materiales similares al hormigón, utilizando la metodología propuesta en este trabajo.

La ejecución de cada ensayo, se realizó utilizando los materiales disponibles en el laboratorio, con la finalidad de recrear las condiciones ideales, en las cuales deben desarrollarse los ensayos para cada losa experimental. Sin embargo, el

estado en que se encuentran los materiales utilizados, la manipulación adecuada de la máquina, errores en la lectura de los sensores usados para las mediciones, y las condiciones en que se encuentra cada losa experimental, son factores externos que pueden alterar los resultados obtenidos de cada ensayo, e influyen en el análisis del comportamiento exacto de las losas reparadas.

Los ensayos de prueba de carga para cada una de las tres losas reparadas, fueron desarrollados a partir de las indicaciones de la ACI 318S-08, y señalaron que ninguna de las losas pudo cumplir con los requisitos de seguridad impuestos por esta normativa, ya que las deflexiones máximas alcanzadas por cada losa reparada, no satisficieron las condiciones de la norma.

Sin embargo, las tres losas reparadas si cumplieron con el criterio de deformación admisible recomendado por los profesores Riddell e Hidalgo en su libro "Diseño Estructural".

En el caso del ensayo de cargas cíclicas, no se observó la aparición de fisuras o grietas, ni tampoco un deterioro aparente de las losas reparadas. Aunque, es probable que hiciera falta una mayor cantidad de ensayos de carga, para poder conocer mejor el comportamiento de las losas, ya que solo se realizaron dos ciclos de carga para cada losa. Cabe mencionar que solo se analizaron las losas con armadura de refuerzo ϕ8, ya que la losa con armadura de refuerzo ϕ10 presentaba severos daños en su zona a compresión, y se optó por evaluarla a través de la prueba de carga y el ensayo a Rotura, por considerar que de estos ensayos, podían obtenerse datos más representativos sobre su comportamiento.

En cuanto al ensayo monotónico a rotura, además de comprobar la eficacia de la reparación con ferrocemento, este ensayo indicó que las losas experimentales después de la reparación, resultaron ser entre un 50% y un 70% más flexibles. También, se observó que las losas reparadas N°1 y N°2, tenían el doble de tensión por flexión que las losas originales, debido a que duplicaron su carga de rotura.

Según la experiencia de laboratorio, se puede determinar que este método de reparación, no necesita de una mano de obra especializada, ya que la reparación fue hecha por la autora de este trabajo de titulación.

Finalmente, este estudio sirve de base para futuras investigaciones, como por ejemplo:

- Análisis de la reparación y metodología de cálculo para losas armadas cruzadas y/o continuas.
- Análisis económico que solo considere los costos de los materiales utilizados en la reparación de las losas experimentales con la técnica de ferrocemento versus losas reparadas con otros métodos más tradicionales.

TABLAS E ILUSTRACIONES

Figura 2.1: Vista planta superior losa experimental. 9
Figura 2.2: Corte A-A losa experimental. 9
Figura 2.3: Moldaje losa. 10
Figura 2.4: Armadura losa. 10
Figura 2.5: Colocación de ladrillos. 11
Figura 2.6: Aplicación del mortero. 11
Figura 2.7: Losa terminada. 12
Figura 2.8: Aplicación de arena mojada. 12
Figura 3.1:Bodega y vivienda construida por empresa Ferrosur en Puerto Montt. 17
Figura 3.2: Vivienda prefabricada proyecto Fontec 1994 en Concepción. 17
Figura 3.3: Vivienda subsidio rural en Chillán-Empresa Pablo Torres. 18
Figura 3.4: Proyecto reconstrucción fachada continua en Talca. 18
Tabla III.1: Clasificación de los cementos según su composición. 23
Tabla III.2: Características especificadas para los cementos nacionales. 23
Figura 3.5: Malla hexagonal galvanizada. 29
Tabla III.3: Características malla hexagonal. 29
Figura 3.6: Esquema típico malla electrosoldada. 31
Tabla III.4: Características malla ACMA 139-C. 31
Figura 3.7: Curva esfuerzo-deformación del ferrocemento. 35
Figura 3.8: Curva esfuerzo-deformación unitaria de mortero y ferrocemento en compresión axial. 37
Figura 3.9: Configuración de la prueba para resistencia a corte. 38
Figura 3.10: Dimensiones de los especímenes y configuración de la carga. 39
Figura 3.11: Diagrama carga-flecha típico de elemento a flexión. 42
Figura 6.1: Diagrama de corte y momento para la solicitación del ensayo a rotura. 66
Figura 6.2: Bosquejo losa. 69
Figura 6.3: Losa enderezada con la máquina MAC V. 70
Figura 6.4: Losas posicionadas antes de iniciar la reparación. 71
Figura 6.5: Losas con moldaje y anclajes. 72
Figura 6.6: Malla ACMA C-139 y el refuerzo de diseño de la losa. 72
Figura 6.7: Losa con puente de adherencia epóxica. 72
Figura 6.8: Fijación de malla electrosoldada y refuerzos. 73
Figura 6.9: Vaciado del mortero. 74
Figura 6.10: Vibración del mortero. 74
Figura 6.11: Losa con la reparación terminada. 75

Figura 6.12: Curado de la losa. 75
Figura 6.13: Losa reparada lista para ser ensayada. 76
Figura 6.14: Probetas del mortero – muestra real. 77
Figura 6.15: Ensayo de probetas – muestra real. 77
Tabla VI.1: Resumen ensayo de probetas. 78
Figura 7.1: Prueba de carga – instalación de deformímetro. 82
Figura 7.2: Prueba de carga – carga inicial. 82
Figura 7.3: Prueba de carga – carga final. 83
Tabla VII.1: Resumen deflexiones de las tres losas reparadas. 86
Tabla VII.2: Resumen criterio de aceptación de las losas reparadas. 87
Figura 7.4: Gráfico prueba de carga losa N°1. 87
Figura 7.5: Gráfico prueba de carga losa N°2. 88
Figura 7.6: Grafico prueba de carga losa N°3. 89
Figura 7.7: Ensayo de carga cíclica. 91
Figura 7.8: Primer ciclo losa N°1. 92
Figura 7.9: Segundo ciclo losa N°1. 93
Figura 7.10: Primer ciclo losa N°2. 94
Figura 7.11: Segundo ciclo losa N°2. 94
Figura 7.12: Losa antes y después del ensayo a rotura. 97
Figura 7.13: Gráfico ensayo a rotura losa N°1. 97
Figura 7.14: Grieta post-ensayo a rotura losa N°1. 98
Figura 7.15: Gráfico ensayo a rotura losa N°2. 99
Figura 7.16: Grieta post-ensayo a rotura losa N°2. 99
Figura 7.17: Gráfico ensayo a rotura losa N°3. 100
Figura 7.18: Grieta post-ensayo a rotura losa N°3. 100
Tabla VII.3: Resumen ensayo a rotura. 101
Tabla VII.4: Resumen módulo de elasticidad. 103
Tabla VII.5: Resumen tensión por flexión. 104
Tabla VIII.1: Resumen deformaciones – losa original v/s losa reparada. 107
Tabla VIII.2: Criterio de aceptación – losa original v/s losa reparada. 108
Tabla VIII.3: Resumen ensayo a carga cíclica – losa original v/s losa reparada. 109
Tabla VIII.4: Resumen ensayo a rotura – losa original v/s losa reparada. 110
Tabla VIII.5: Resumen características de las losas – losa original v/s losa reparada. 111

BILIOGRAFÍA

- Ahmad, S.F.; Lodi, S.H.; Qureshi, J. 1995. Shear Behavior of Ferrocement Thin Webbed Sections. In: Cement and Concrete Research. Vol. 25, No. 5. 969-979p.

- Al-Sulaimani, G.J.; Basunbul, J.A.; Mousselhy, E.A. 1991. Shear Behavior of Ferrocement Box Beams. In: Cement & Concrete Composites, 13. 29-36p.

- American Concrete Institute, Committee 549 – 1R. 1993. Guide for the design, construction, and repair of Ferrocement. In Manual of Concrete Practice Institute, Farmington Hills, Michigan. 26 p.

- American Concrete Institute. Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318S-08). 2008. 520p.

- Basunbul, I.A.; Saleem, M.; Al-Sulaimani, G.J. 1991. Flexural Behavior of Ferrocement Sandwich Panels. In: Cement & Concrete Composites, 13. 21-28p.

- Bedoya R., D. A. Estudio de resistencia y vulnerabilidad sísmica de viviendas: aplicación a casas de ferrocemento. Medellín – Colombia. 317p.

- Bin-Omar, A.R.; Abdel-Rahman, H.H.; Al-Sulaimani, G.J. 1989. Nonlinear Finite Element Analysis of ‘Flanged’ Ferrocement Beams. In: Computers & Structures, Vol. 31, No. 4. 581-590p.

- Briso O., F. D. y CASTILLO A., L. A. 2010. Utilización del ferrocemento en elementos de aligeramiento de placa y muros de división. Universidad Austral de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Bucaramanga. 174p.

- Carrasco B., V. 2003. Ferrocemento una alternativa para la vivienda y otras aplicaciones en ambiente marino. Cementos Bio Bio. 41p.

- Cementos Bío-Bío. Ferrocemento, Viviendas industrializadas definitivas en hormigón. Chile. PDF. 69p.

- Chao, E. Diciembre 2005. Las fuerzas del equilibrio. En: Construcción y Tecnología. 32-38p.

- Cortina S., J. A., Olvera L., A. y Zubieta C., R. 1978. Aplicaciones potenciales y usos actuales del ferrocemento. México. Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de educación continua, División de estudios superiores, Facultad de ingeniería. 69p.

- Díaz V., L. M. y Jiménez S., F. A. 2014. Diseño de losas experimentales de ladrillos de arcilla hechos a mano, reforzadas con hormigón armado. Santiago, Universidad Central de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Escuela de ingeniería civil en obras civiles. 157p.

- Diseño de losas de hormigón armado [En línea] <http://publiespe.espe.edu.ec/librosvirtuales/hormigon/temas-dehormigon-armado/hormigon08.pdf>.

- Fernández M., N. E. y Ferrada G., K. A. 2012. Reparación de losas con Ferrocemento. Santiago, Universidad Central de Chile, Facultad de

ciencias físicas y matemáticas, Escuela de ingeniería civil en obras civiles. 102p.

- Ferrocemento, Una alternativa para la vivienda [En línea] <http://es.scribd.com/doc/39909007/Ferrocemento>.
- Fundamentos para la aplicación de ferrocemento. 2000. Perú – Lima. 34p.

- Guerrero Z., A. P. y Gonzáles S., L. O. 2008. Conceptos generales sobre ferrocemento. Palmira. 95p.

- Instituto Nacional de Normalización. 1985. Hormigón – Requisitos Generales. NCh. 170 Of. 1985. Chile. 75p.

- Instituto Nacional de Normalización. 1975. Hormigón - Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción. NCh. 1017 Of.75. 15p.

- Instituto Nacional de Normalización. 1977. Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas. NCh. 1037 Of. 77. 11p.

- Instituto Nacional de Normalización. 1999. Hormigón – Ensayo detracción por flexión. NCh. 1038 of 77. Chile. 13p.

- Instituto Nacional de Normalización. 1986. Diseño estructural de edificios – Cargas permanentes y sobrecargas de uso. NCh. 1537 Of. 86. 26p.

- Instituto Nacional de Normalización. 2010. Diseño estructural – Disposiciones generales y combinaciones de cargas. NCh. 3171 Of. 2010. 18p.

- Instituto chileno del cemento y del hormigón. 1985. Aportes técnicos. Técnicas de reparación y refuerzo de estructuras de hormigón armado y albañilerías. Chile. 39p.

- Kumar, P.R.; Rao, C.B.K. November 2005. Interaction Curve for High Performance Ferrocement in Biaxial State of Tension". In: Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 475-481p.

- Losas [En línea] <http://www.farq.edu.uy/estabilidad-iii/files/2012/02/Losas.pdf>

- Naaman, A.E. 2000. Ferrocement and Laminated Cementitious Composites. Techno Press-3000. 1st edition.

- Pama, B. K. 1991. Ferrocemento. 1° ed. México. Instituto mexicano del cemento y del concreto. 227p.

- Olvera, A. 2002. El ferrocemento y sus aplicaciones. 3° ed. México. Alfaomega. 616p.

- Riddell, R., Hidalgo, P. Enero 2010. Diseño Estructural. Ediciones Universidad Católica de Chile. 5ª Edición. 543p.

- Rogel M., I. A. 2005. Valdivia. Muros de contención de ferrocemento. Universidad Austral de Chile, Facultad de ciencias de la ingeniería, Escuela ingeniería civil en obras civiles. 179p.

- Tipos de losas [En línea] <http://www.buenastareas.com/ensayos/Losas-Unidireccionales-y-Bidireccionales/3400244.html>

- Tecnología del hormigón [En línea] <http://www3.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/ClasifT2.htm>.

- Uribe M., D. R. 2007. Diseño, fabricación y ensayo de una losa de ferrocemento perfil TT. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Facultad de ciencias de la ingeniería, Escuela ingeniería civil en obras civiles. 71p.

- Wainshtok, H. 1998. Ferrocemento - diseño y construcción.3° ed. Editorial Offset Abad Cia. Ltda. 227p.

- Walkus, B.R. October 1975. Behaviour of Ferrocement in Bending. Journal of Structural Engineering. Vol. 3, no. 3.