



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**GUÍA PARA EL DISEÑO DE REFUERZOS DE ELEMENTOS
ESTRUCTURALES DE HORMIGÓN ARMADO MEDIANTE MATERIAL
COMPUESTO POR MALLAS DE FIBRAS MINERALES EMBEBIDAS EN
MATRIZ CEMENTÍCEA (FRCM)**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL CON MENCIÓN EN
ESTRUCTURAS

MARÍA FERNANDA MARTÍNEZ SALAZAR

PROFESOR GUÍA:

FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

MAURICIO SARRAZIN ARELLANO

YURI TOMICIC CALVO

SANTIAGO DE CHILE

MAYO 2016

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil, mención estructuras
POR: María Fernanda Martínez Salazar
FECHA: 12/05/2016
PROFESOR GUÍA: Federico Delfín Ariztía.

**GUÍA PARA EL DISEÑO DE REFUERZOS DE ELEMENTOS
ESTRUCTURALES DE HORMIGÓN ARMADO MEDIANTE MATERIAL
COMPUESTO POR MALLAS DE FIBRAS MINERALES EMBEBIDAS EN
MATRIZ CEMENTÍCEA (FRCM*)**

Las tecnologías para la rehabilitación de estructuras dañadas resultan de especial relevancia en países sísmicos. En el caso de estructuras frágiles de hormigón armado y de albañilería se han estudiado diferentes sistemas de reparación estructural, en busca de un refuerzo cuyas propiedades sean compatibles con las del sustrato y que restituyan la integridad y recuperen o aumenten de buena manera la capacidad portante de los elementos. El objetivo principal del presente trabajo de título consiste en el estudio de la metodología de diseño de uno de estos sistemas de refuerzo, sistema conocido como FRCM*. Este tipo de refuerzo es un material compuesto, constituido por aglomerante cementíceo como matriz y malla de fibras minerales como refuerzo, el cual se adhiere externamente a los elementos de hormigón armado, con mínima alteración arquitectónica. Este sistema de refuerzo es considerado como una solución prometedora para la recuperación de estructuras dañadas.

En este trabajo se realiza primeramente una revisión bibliográfica de manera de contextualizar los avances y las principales características del refuerzo y comparar con el método actualmente en uso, refuerzo conocido como FRP**, variante del cual surge el desarrollo del FRCM. Uno de los objetivos de esta memoria es el estudio la precisión del método de diseño, que se realiza a partir de las disposiciones que establece el manual de diseño ACI 549, para elementos representativos de vigas y columnas a partir de resultados experimentales obtenidos de estudios de laboratorios de otros autores. De estos análisis comparativos se concluye que la norma de diseño cuantifica de manera conservadora los aumentos de capacidad de los elementos.

Como aplicación de la metodología a un caso práctico, se estudia el diseño del refuerzo FRCM para una estructura real, que ha sufrido deterioro en su manto, con agrietamiento y deslaminación. Se trata de una chimenea de hormigón armado perteneciente a una termoeléctrica de carbón, ubicada en Ventanas, V región. Se propone realizar la consolidación del manto exterior, lo que permite llevar la estructura a su estado original, recuperando la capacidad estructural y prolongando su período de servicio.

*FRCM: Fabric Reinforced Cementitious Matrix

**FRP: Fiber Reinforced Polymer

Para mis padres y mis hermanos.

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido	iii
Índice de Tablas	v
Índice de Figuras	vi
Notación	Notación 1
1 Introducción	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivos Generales.....	2
1.1.2 Objetivos Específicos	2
1.2 Alcance	2
2 Revisión Bibliográfica.....	4
2.1 Antecedentes Generales	4
2.2 Antecedentes Específicos	5
2.2.1 Estudios Experimentales en Hormigón Armado	5
3 Aplicación Sistema FRCM	18
3.1 Etapa Previa Instalación.....	18
3.1.1 Condiciones Sustrato FRCM.....	18
3.2 Etapa Instalación.....	19
4 Consideraciones Generales para el Diseño de Refuerzo de Elementos de Hormigón Armado mediante Sistema FRCM.....	22
4.1 Caracterización de los Materiales Constituyentes	22
4.1.1 Caracterización de la Matriz.....	22
4.1.2 Caracterización sistema FRCM.....	23
4.2 Combinaciones de Cargas.....	28
4.2.1 Combinación de Cargas para la Realización del Diseño del Refuerzo	28
4.2.2 Combinaciones de Carga para el Diseño del Refuerzo	28
4.3 Factores de Reducción de Capacidad para el Diseño de Refuerzo	29
4.4 Disposición de Refuerzo, Según Esfuerzo.....	29
4.4.1 Refuerzo a Flexión.....	29
4.4.2 Refuerzo a Corte.....	30
4.4.3 Refuerzo Axial.....	30
4.5 Diseño del Refuerzo de Elementos de Hormigón Armado mediante FRCM.....	31
4.5.1 Reforzamiento a Flexión	31
4.5.2 Reforzamiento a Corte.....	35
4.5.3 Reforzamiento Axial.....	37
5 Resultados Experimentales versus Teóricos.....	41

5.1	Refuerzo a Flexión.....	41
5.2	Refuerzo a Corte	43
5.3	Refuerzo Axial.....	44
6	Conclusiones	45
7	Aplicación del Sistema de Refuerzo FRCM a la Reparación de Chimenea de Hormigón Armado con Deterioro Estructural.....	47
7.1	Descripción del Estado de la Estructura	48
7.1.1	Descripción Daño	51
7.1.2	Descripción Metodología de Reparación.	53
7.2	Combinaciones de Cargas.....	57
7.3	Cargas y Esfuerzos.....	58
7.3.1	Carga: Peso Muerto (D).....	58
7.3.2	Carga: Sismo (E)	58
7.3.3	Carga: Viento (W)	59
7.3.4	Esfuerzo Térmico (T), Temperatura.....	60
7.4	Capacidad Nominal.....	61
7.4.1	Cálculo Capacidad a Flexo-Compresión Estructura Estado Actual	62
7.4.2	Cálculo Capacidad Flexo-Compresión Estructura Reforzada	66
7.5	Capacidad Circunferencial a Flexión.....	72
7.5.1	Cálculo Capacidad Circunferencial a Flexión Estructura Estado Actual	72
7.5.2	Cálculo Capacidad Circunferencial a Flexión Estructura Reforzada	74
7.6	Capacidad a Corte Chimenea.....	76
7.6.1	Cálculo Capacidad a Corte Estructura Estado Actual	76
7.6.2	Cálculo Capacidad a Corte Estructura con Refuerzo	76
7.7	Verificación Capacidad Estructural	78
7.7.1	Solicitaciones.....	78
7.7.2	Verificación Flexo-Compresión	81
7.7.3	Verificación Flexión Circunferencial	82
7.7.4	Verificación Corte	84
7.8	Conclusiones.....	85
8	Bibliografía	86
A.	Anexo A: Cálculo Capacidad Teórica <i>Papers</i>.....	Anexo A - 1 -
A.1.	Capacidad a Flexión	Anexo A - 1 -
A.2.	Capacidad a Corte.....	Anexo A - 7 -
A.3.	Capacidad Axial.....	Anexo A - 10 -
B.	Anexo B: Cálculo Fuerzas Chimenea.....	Anexo B - 1 -
B.1.	Efecto Temperatura.....	Anexo B - 1 -
B.2.	Cargas de Viento.....	Anexo B - 5 -
C.	Anexo C: Cálculo Capacidad Chimenea Reforzada.....	Anexo C - 1 -

C.1. Flexión Nominal	Anexo C - 1 -
C.2. Flexión Circunferencial	Anexo C - 9 -
C.3. Corte.....	Anexo C - 13 -

Índice de Tablas

Tabla 2-1. Resultados Carga Máxima a Flexión, Babaeidarabad et al. (2014).....	10
Tabla 2-2. Carga Máxima a Flexión, Loreto et al. (2014).	11
Tabla 2-3. Carga Máxima a Corte, Triantafillou & Papanicolaou (2006).	13
Tabla 2-4. Serie A y C Triantafillou et al. (2006).	14
Tabla 5-1. Comparación Resultados Experimentales versus Teóricos, Flexión Viga.	41
Tabla 5-2. Comparación Resultados Experimentales versus Teóricos, Flexión Losa.	41
Tabla 5-3. Comparación Resultados Experimentales versus Teóricos, Corte.	43
Tabla 5-4. Comparación Resultados Experimentales versus Teóricos, Axial.	44
Tabla 7-1. Características Geométricas de la Estructura.	48
Tabla 7-2. Armadura Vertical.	50
Tabla 7-3. Armadura Transversal.	50
Tabla 7-4. Propiedades FRCM Chimenea (Datos del proveedor)	54
Tabla 7-5. Datos Ensayo a Tracción FRCM, Sandoval (2014).	55
Tabla 7-6. Propiedades Mecánicas FRCM.	56
Tabla 7-7. Mediciones Temperatura, informe IDIEM.	60
Tabla 7-8. Resistencia Hormigón y Acero, Efecto Temperatura.	61
Tabla 7-9. Armadura a Flexión Circunferencial (por unidad de alto).....	72
Tabla 7-10. Solicitaciones Verticales, Estructura Estado Actual.....	79
Tabla 7-11. Solicitaciones Verticales, Estructura Reforzada.....	79
Tabla 7-12. Solicitaciones Verticales de Servicio, Estructura Reforzada.....	80
Tabla 7-13. Capacidad a Flexión Sección, Estado Actual.	81
Tabla 7-14. Capacidad a Flexión Sección Reforzada Mediante Confinamiento con FRCM.	82
Tabla 7-15. Condiciones de Diseño Refuerzo FRCM	82
Tabla 7-16. Capacidad a Flexión Circunferencial Tracción en el Exterior.....	83
Tabla 7-17. Capacidad a Flexión Circunferencial Tracción en el Interior.....	83
Tabla 7-18. Capacidad a Corte, Estado Actual.	84
Tabla 7-19. Capacidad a Corte, Reforzada FRCM.	84

Índice de Figuras

Figura 2.1. Montaje Experimental, D'Ambrisi & Focacci (2011).....	6
Figura 2.2. Disposición Fibras, D'Ambrisi & Focacci (2011).....	6
Figura 2.3. Modos de Falla a Flexión, D'Ambrisi & Focacci (2011).	7
Figura 2.4. Carga versus deformación esquemática modos de falla, D'Ambrisi & Focacci (2011).....	7
Figura 2.5. Carga-deformación según material de refuerzo, D'Ambrisi & Focacci (2011). .	8
Figura 2.6. Carga-deformación según disposición de refuerzo, D'Ambrisi & Focacci (2011).	9
Figura 2.7. Curva Carga-Deformación Hormigón Baja Resistencia, Sin Refuerzo (Izquierda), con Una Capa de Refuerzo (Centro), con Cuatro Capas de Refuerzo (Derecha), Babaeidarabad et al. (2014).....	10
Figura 2.8. Deformación Sección, Hormigón Alta Resistencia, 1 capa (Izquierda), 4 Capas (derecha), Loreto et al. (2014).....	11
Figura 2.9. Montaje Experimental Ensayo a Flexión, Triantafillou & Papanicolaou (2006).	12
Figura 2.10. Disposición de Mallas a Corte, Triantafillou & Papanicolaou (2006).	12
Figura 2.11. Capacidad a Corte, Triantafillou & Papanicolaou (2006).	13
Figura 2.12. Capacidad Axial Probetas Cilíndricas Serie B, Triantafillou & Papanicolaou (2006).....	14
Figura 2.13. Montaje Experimental Carga Cíclica, Bournas et al. (2014).....	16
Figura 3.1. Aplicación de la Malla de Fibra sobre la Matriz Cementícea.	19
Figura 3.2. Aplicación de la Matriz Cementícea sobre la Malla de Fibra.	20
Figura 3.3. Secuencia Aplicación FRCM, Ruredil.	21
Figura 3.4. Conector de Anclaje Mallas de Fibras, G&P Intech.	21
Figura 4.1. Comportamiento Teórico Compuesto FRCM, Weiland et al. (2007).	23
Figura 4.2. Curva Idealizada Tensión-Deformación espécimen FRCM.....	24
Figura 4.3. Curva Tensión-Deformación Experimental, ACI549-13.	25
Figura 4.4. Ensayo a Tracción Muestra, Arboleda (2014).....	26
Figura 4.5. Resultados Ensayo a Tracción PBO-FRCM, Bianchi et al. (2013).....	27
Figura 4.6. Disposición FRCM a Flexión, Vigas.....	29
Figura 4.7. Disposición FRCM a Corte, Vigas.....	30
Figura 4.8. Disposición FRCM Encamisado, Columnas, Arboleda (2012).....	30
Figura 4.9. Tensión en Hormigón Reforzado sometido a Flexión, a estado último, ACI 440.	32
Figura 4.10. Capacidad a Corte FRCM.....	36

Figura 4.11. Definición de ***df*** para diferentes secciones..... 37

Figura 4.12. Curva Idealizada Tensión-Deformación Hormigón Reforzado mediante FRCM.
..... 39

Figura 4.13. Sección Circular Equivalente en Sección Rectangular..... 40

Figura 7.1. Modelación, SAP2000 (izquierda. Chimenea Real (derecha) 51

Figura 7.2. Especímenes Ensayados a Tracción, Sandoval (2014)..... 55

Figura 7.3. Imagen Termográfica Chimenea N° 2, informe IDIEM..... 61

Figura 7.4. Diagrama deformación unitaria y tensión sección circular. 65

Figura 7.5. Diagrama deformación unitaria y tensión sección circular reforzada con FRCM.
..... 71

Figura 7.6. Viga Horizontal Representativa Capacidad a Flexión Circunferencial..... 72

Figura 7.7. Sección Reforzada Representativa Capacidad Circunferencial a Flexión, Mo
(tracción en el exterior). 74

Figura 7.8. Sección Representativa Capacidad a Corte. 77

Notación

a	$\beta_1 c$, mm (ver Figura 7.6).
A_c	Área de la sección transversal neta del elemento a compresión, mm^2 .
A_f	Área de malla de refuerzo por unidad de ancho, mm^2/mm .
A_{fvi}	Área de refuerzo FRCM efectiva a corte por unidad de ancho, según la dirección, mm^2/mm .
A_e	Área efectiva confinada, mm^2 .
A_g	Área bruta de la sección transversal del elemento a compresión, mm^2 .
A_k	Carga debido a un evento extraordinario, N .
A_s	Área del acero longitudinal, mm^2 .
A_v	Sección área de acero de refuerzo transversal, mm^2 .
b	Lado corto de la sección rectangular del elemento a compresión, mm .
b_w	Ancho de la sección, mm .
c	Distancia desde el extremo a compresión hasta el eje neutro, mm .
c_{cr}	Distancia desde el extremo a compresión hasta el eje neutro de la sección fisurada, mm .
c_{crf}	Distancia desde el extremo a compresión hasta el eje neutro de la sección fisurada, bajo condiciones de servicio, mm .
De	Carga muerta, N .
D	Diámetro de la sección circular del elemento a compresión, mm .
d_f	Ver Figura 4.11, mm .
E	Carga Sísmica, N .
E_2	Pendiente de la sección linear del gráfico tensión versus deformación del hormigón confinado mediante FRCM, MPa .
E_c	Módulo de elasticidad del hormigón, MPa .
E_f	Módulo de elasticidad refuerzo a tracción, fisurado, MPa .
E_f^*	Módulo de elasticidad refuerzo a tracción no fisurado, MPa .
E_s	Módulo de elasticidad del acero de refuerzo longitudinal, MPa .
f_c'	Resistencia a compresión del hormigón, MPa .
f_{cc}'	Resistencia máxima a compresión del hormigón confinado, MPa .
f_{fd}	Tensión de diseño efectiva, $E_f \varepsilon_{fd}$, MPa .
f_{fe}	Tensión efectiva a tracción alcanzada en la falla del material de refuerzo, MPa .
f_{fi}	Tensión de tracción correspondiente al i -ésimo punto, MPa .
f_{fs}	Tensión de tracción en el refuerzo FRCM, bajo cargas de servicio, MPa .
f_{ft}	Tensión a tracción correspondiente al punto de transición, MPa .
f_{fu}	Tensión de tracción última, MPa .
f_{fv}	Tensión de tracción última, $E_f \varepsilon_{fv}$ MPa .
f_l	Presión de confinamiento máxima, debido al refuerzo FRCM, MPa .
f_s	Tensión en el acero de refuerzo longitudinal, MPa .

f_{ss}	Tensión de tracción en el acero de refuerzo bajo cargas de servicio, <i>MPa</i> .
f_y	Tensión de fluencia del acero, <i>MPa</i> .
F_c	Fuerza debido al hormigón a compresión, <i>N</i> .
F_{fe}	Fuerza debido al refuerzo FRCM, <i>N</i> .
$FRCM_1$	Capacidad a tracción proporcionada por el sistema de refuerzo FRCM, bajo la tensión efectiva de diseño, <i>N</i> .
$FRCM_2$	Capacidad a tracción proporcionada por el sistema de refuerzo FRCM, en la tensión efectiva de diseño, <i>N</i> .
$FRCM'_1$	Momento debido a la capacidad a tracción proporcionada por el sistema de refuerzo FRCM, bajo la tensión efectiva de diseño, <i>Nmm</i> .
$FRCM'_2$	Momento debido a la capacidad a tracción proporcionada por el sistema de refuerzo FRCM, en la tensión efectiva de diseño, <i>Nmm</i> .
$FRCM_{s1}$	Carga a tracción proporcionada por el sistema de refuerzo FRCM, bajo la tensión efectiva de diseño, condición fisurada, <i>N</i> .
$FRCM_{s2}$	Carga a tracción proporcionada por el sistema de refuerzo FRCM, en la tensión efectiva de diseño, condición fisurada, <i>N</i> .
F_s	Fuerza debido al acero de refuerzo, <i>N</i> .
$G_r(z)$	Factor de Gust para presión radial del viento, según altura <i>z</i> .
h	Lado largo de la sección rectangular del elemento a compresión, <i>mm</i> .
H	Altura de la viga considerada, <i>1m</i> , <i>mm</i> .
I_{cr}	Momento de inercia fisurado, <i>mm⁴</i> .
k_a	Factor de eficiencia.
k_b	Factor de eficiencia.
L	Carga viva, estructura rehabilitada, <i>N</i> .
M	Momento en la viga debido a las cargas presentes durante la aplicación del refuerzo <i>Nmm</i> .
M_0	Momento circunferencial máximo solicitante, con tracción en el exterior del manto, <i>Nmm</i> .
M_i	Momento circunferencial máximo solicitante, con tracción en el interior del manto, <i>Nmm</i> .
M_f	Capacidad a flexión, debida al refuerzo FRCM, <i>Nmm</i> .
M_{FS}	Capacidad a flexión circunferencial, debida al acero de refuerzo, <i>Nmm</i> .
M_n	Capacidad nominal a flexión del elemento reforzado, <i>Nmm</i> .
$M_{n,sr}$	Capacidad nominal a flexión circunferencial del elemento sin refuerzo, <i>Nmm</i> .
M_s	Capacidad a flexión, debida al acero de refuerzo, <i>Nmm</i> .
M_{su}	Momento solicitante, bajo cargas de servicio <i>Nmm</i> .
n	Número de capas de refuerzo.
N_u	Compresión solicitante, <i>N</i> .
$\frac{N_u}{A_g}$	Debe estar expresado en unidades de <i>MPa</i> .
P	Fuerza de compresión del hormigón, <i>N</i> .

P'	Momento debido al hormigón en compresión, Nmm .
$\bar{p}(z)$	Presión debido a la velocidad media de diseño del viento, según altura z , MPa .
P_i	Carga correspondiente al i -ésimo punto, N .
P_n	Resistencia a compresión elemento reforzado con FRCM, N .
$p_r(z)$	Presión radial de viento, según altura z , MPa .
P_s	Fuerza de compresión del hormigón fisurado, N .
P_{su}	Carga axial a compresión solicitante, bajo cargas de servicio N .
P_u	Compresión solicitante, N .
$\bar{p}(z)$	Presión debido a la velocidad media de diseño del viento, según altura z , MPa .
Q	Parámetro de corrección del esfuerzo del hormigón.
$r(z)$	Radio de la sección circular, mm .
r	Radio promedio de la sección, mm .
S	Espaciamiento entre fibras, mm .
S_c	Carga de nieve, estructura rehabilitada, N .
s	Espaciamiento acero transversal, mm .
S_1	Fuerza de compresión del acero, en tensión de fluencia, N .
S_2	Fuerza de compresión del acero, bajo la tensión de fluencia, N .
S_3	Fuerza de tracción del acero, bajo la tensión de fluencia, N .
S_4	Fuerza de tracción del acero, en tensión de fluencia, N .
S'_1	Momento debido a la compresión del acero, en tensión de fluencia, Nmm .
S'_2	Momento debido a la compresión del acero, bajo la tensión de fluencia, Nmm .
S'_3	Momento debido a la tracción del acero, bajo la tensión de fluencia, Nmm .
S'_4	Momento debido a la tracción del acero, en tensión de fluencia, Nmm .
s_i	Espaciamiento entre fibras con respecto a la horizontal, mm .
S_{s1}	Fuerza de compresión del acero, bajo la tensión de fluencia, calculado para condición fisurado, N .
S_{s2}	Fuerza de compresión del acero, bajo la tensión de fluencia, calculado para condición fisurado, N .
T	Efecto temperatura normal.
t	Espesor manto de hormigón, mm .
t_f	Espesor fibras, mm .
U	Capacidad necesaria, calculada a partir de las combinaciones de carga.
U_c	Capacidad circunferencial.
U_v	Capacidad vertical.
V_c	Capacidad a corte debido al hormigón, N .
V_n	Capacidad nominal a corte, N .
V_f	Capacidad a corte, debido al refuerzo FRCM, N .
V_s	Capacidad a corte, debido al acero de refuerzo, N .
V_u	Corte solicitante, N .
w_f	Ancho nominal del espécimen de refuerzo, mm .
W_{along}	Carga de viento en la dirección longitudinal (<i>along-wind</i>).

$W_{comb\ along+across}$	Carga de viento combinada en la dirección longitudinal y transversal (<i>along-wind+across wind</i>).
α	Mitad del ángulo subtendido por el eje neutro, <i>radianes</i> .
α_{crf}	Mitad del ángulo subtendido por el eje neutro obtenido para la sección fisurada, <i>radianes</i> .
β_1	Coficiente Bloque de Whitney.
β_i	Ángulo formado entre la horizontal y la fibra, <i>radianes</i> .
γ	Ángulo, ver Figura 7.5 , <i>radianes</i>
ε_{bi}	Deformación unitaria a tracción existente en el hormigón antes de la instalación del FRCM, <i>mm/mm</i> .
ε_c	Deformación unitaria del hormigón en compresión, <i>mm/mm</i> .
ε'_c	Deformación unitaria del hormigón no confinado correspondiente a f'_c en la curva tensión versus deformación, <i>mm/mm</i> .
ε_{cc}	Deformación unitaria del hormigón, en el extremo comprimido, calculado para sección fisurada, <i>mm/mm</i> .
ε_{ccu}	Deformación unitaria última hormigón confinado en compresión, <i>mm/mm</i> .
ε_{cu}	Deformación unitaria máxima del hormigón a compresión, <i>mm/mm</i> .
ε_{fd}	Deformación unitaria a tracción de diseño del material de refuerzo.
ε_{fe}	Deformación unitaria efectiva a tracción en el refuerzo en la falla, <i>mm/mm</i> .
ε_{feu}	Deformación unitaria efectiva máxima del refuerzo, <i>mm/mm</i> .
ε_{ft}	Deformación unitaria a tracción correspondiente al punto de transición, <i>mm/mm</i> .
ε_{fu}	Deformación unitaria última a tracción, ε_{fv} , <i>mm/mm</i> , <i>mm/mm</i> .
ε_m	Deformación unitaria hormigón extremo a compresión, <i>mm/mm</i> .
ε_s	Deformación unitaria en el acero de refuerzo longitudinal, <i>mm/mm</i> .
ε_{st}	Deformación unitaria del acero, en el extremo traccionado, calculado para sección fisurada, <i>mm/mm</i> .
ε_t	Deformación unitaria de transición del gráfico tensión versus deformación del hormigón confinado mediante FRCM, <i>mm/mm</i> .
\emptyset	Factor de reducción, 0.75.
$\emptyset R_n$	Capacidad de diseño minorada.
\emptyset_m	Factor de reducción esfuerzo de flexión y/o axial.
\emptyset_v	Factor de reducción esfuerzo corte, 0.75.
ρ_f	Cuantía de fibra mm^2/mm^2 .
ρ_g	Cuantía de acero longitudinal, mm^2/mm^2 .
ρ_s	Cuantía de acero longitudinal, mm^2/mm^2 .
ρ_t	Cuantía de acero, mm^2/mm^2 .
ρ'	Cuantía de acero a flexión circunferencial por unidad de alto, mm^2/mm .
τ	Ángulo, ver Figura 7.4 , <i>radianes</i> .
μ	Ángulo, ver Figura 7.4 , <i>radianes</i> .
ψ	Ángulo, ver Figura 7.4 , <i>radianes</i> .

1 Introducción

El desarrollo de diferentes tipos de refuerzos estructurales en el último tiempo se debe principalmente a la necesidad de realizar una compatibilización con las normas de diseño o una rehabilitación estructural frente a deterioros específicos. El primero, mejor conocido en la literatura internacional como *Structural Upgrading o Retrofit*, involucra una adecuación de la estructura, ya sea por cambios en su uso, diferentes necesidades de diseño o actualización de normas. Por otro lado, la rehabilitación estructural implica restituir la capacidad portante de una estructura dañada.

Para abordar esta problemática se han estudiado distintas tecnologías y tipos de refuerzo, entre ellos el uso de sistemas de refuerzo mediante materiales poliméricos reforzados con láminas continuas de fibra, FRP (*Fiber Reinforced Polymer*). Este método ha ganado popularidad debido a la favorable relación capacidad/peso que posee y a la casi nula intervención arquitectónica que conlleva, con respecto a los métodos tradicionales. Estas fibras generalmente corresponden a fibras inorgánicas, como vidrio, carbono, u otros materiales. No obstante, las resinas poliméricas, utilizadas como matriz en este tipo de refuerzos, presentan limitaciones, tales como su mal comportamiento ante altas temperaturas, baja resistencia al fuego e inaplicabilidad en presencia de humedades altas.

Debido a los posibles inconvenientes que conllevan las matrices en base a resinas del sistema FRP, se desarrolla una solución que utiliza materiales inorgánicos como matriz, en general mortero de cemento. Además, a modo de mejorar la interacción de la fibra en la matriz cementícea, éstas se disponen en forma de malla o grilla de fibras, con las fibras orientadas en direcciones ortogonales. Este sistema de refuerzo estructural se denomina FRCM (*Fabric Reinforced Cementitious Matrix*) y se define como un material compuesto por capas de matriz cementícea que incorporan mallas de fibras como refuerzo. Este sistema de refuerzo estructural tiene ventajas importantes, con respecto a su análogo con matriz orgánica, tales como:

- Compatibilidad con las propiedades químicas, físicas y mecánicas del hormigón armado.
- Matriz cementícea que, por su estructura de poros, permite el transporte de la humedad dentro y fuera de la mezcla.
- Comportamiento compatible con la exposición a altas temperaturas y una resistencia parcial al fuego.
- No altera significativamente las características arquitectónicas de los elementos reforzados y posibilidad de restituir la condición original de la estructura si se requiere.

En este trabajo de título se aborda el diseño de refuerzos estructurales mediante compuesto por malla de fibra y matriz cementícea, FRCM, ya sea para recuperar la resistencia de una estructura dañada, o para mejorar el desempeño de una estructura inicialmente diseñada para otro uso o con un código de diseño actualmente obsoleto. Se detalla en forma sistemática el procedimiento

para el cálculo de este tipo de refuerzo, a partir del manual de diseño ACI 549, publicado en diciembre del 2013. Debido al poco tiempo transcurrido desde su publicación, aún no ha sido utilizado a nivel nacional, por lo que este trabajo apunta a servir como una guía que facilite el diseño de refuerzos mediante FRCM, bajo los criterios dispuestos por el ACI (*American Concrete Institute*) en Chile. Como caso práctico de trabajo, aplicando este manual, se realiza el diseño del refuerzo en base a malla de fibra de carbono embebidas en matriz cementícea, para una chimenea de hormigón armado que presenta serios deterioros en su manto y requiere de una solución de refuerzo estructural

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Generales

Sistematizar la metodología de diseño para el sistema de refuerzo FRCM de estructuras de hormigón armado, aplicando los criterios del ACI 549.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Detallamiento y disposición óptima del refuerzo según el modo de falla previsto.
2. Establecer los criterios metodológicos para el diseño de refuerzo de fibra de carbono FRCM.
3. Verificar la precisión del método de diseño en cuanto a la estimación de la capacidad última carga para vigas, losas y columnas, a partir de resultados experimentales correspondientes.
4. Verificar el refuerzo FRCM necesario para la reparación estructural de una chimenea, perteneciente a una termoeléctrica a carbón, de la empresa AES GENER, ubicada en Ventanas, V región, Chile, utilizando el método del ACI 549.

1.2 Alcance

Capítulo 1: Introducción

Se expone una contextualización con respecto al desarrollo del sistema de refuerzo FRCM, señalando la motivación y los objetivos de la memoria.

Capítulo 2: Antecedentes

Se realiza una revisión bibliográfica de manera de contextualizar los avances en la materia en estudio, sus usos, sus principales ventajas y su comportamiento comparado con el sistema

de refuerzo predecesor, el FRP. Como método de diseño se recurre al estudio y análisis tanto del manual de diseño ACI 549, como del AC 434, normativa europea vigente, los cuales detallan el diseño de refuerzo de fibras embebidas en matriz cementícea.

Capítulo 3: Aplicación del Sistema FRCM

Se definen los procedimientos constructivos que se deben seguir para la correcta instalación del sistema de refuerzo, especificando las condiciones previas en las que se debe realizar, tanto ambientales como del sustrato.

Capítulo 4: Diseño del refuerzo FRCM

Se detallan los materiales constituyentes de un sistema de refuerzo FRCM, la metodología para caracterizar el material compuesto y sus propiedades mecánicas caracterizadas por su curva tensión-deformación. Según los modos de fallas y el tipo de elemento estructural se indica la disposición óptima recomendada para aumentar la capacidad portante en conformidad con las disposiciones de la ACI 549.

Capítulo 5: Cálculo de incremento en la capacidad de elementos reforzados

Se realiza el cálculo de la capacidad última a partir de la guía de diseño, basada en la ACI 549, de algunos elementos estructurales reforzados mediante sistema FRCM que cuentan con resultados de ensayos experimentales realizados por otros autores. El cálculo se realiza según las características geométricas y las propiedades de los materiales tanto de la probeta como del refuerzo, con cuyos resultados se caracteriza la precisión del método de diseño.

Capítulo 6: Diseño de refuerzo FRCM estructura dañada.

Se verifica el diseño del refuerzo FRCM necesario para la reparación estructural de una chimenea, perteneciente a una central termoeléctrica a carbón, a partir de las disposiciones de la ACI 549.

2 Revisión Bibliográfica

2.1 Antecedentes Generales

Los refuerzos estructurales han sido especialmente importantes en el área de la ingeniería estructural en el último tiempo, debido a las constantes actualizaciones de las normas de diseño, particularmente los códigos de diseño sísmico. En las últimas décadas el sistema FRP (*Fiber-Reinforced Polymer*), material compuesto en base a resinas poliméricas y fibras minerales, fue propuesto como la nueva tecnología en materia de reparación estructural de hormigón y albañilería que utilizan sistemas de refuerzo adheridos externamente a la estructura (Nanni 1995 y 1997). No obstante, actualmente está en estudio el uso de una tecnología posterior (Nanni 2012), que deriva de ésta, denominada FRCM (*Fabric Reinforced Cementitious Matrix*), la que también utiliza fibras, pero embebidas en matrices inorgánicas.

El uso del sistema FRP ha logrado posicionarse entre las técnicas de reforzamiento estructural debido a las favorables propiedades que el material compuesto posee. Éste refuerzo consiste en láminas de fibras minerales en una matriz orgánica, generalmente resina epóxica. Entre las propiedades que le han dado popularidad al refuerzo FRP destacan: extremadamente alta razón resistencia-peso, resistencia a la corrosión, fácil y rápida aplicación, y cambio mínimo en la geometría y masa de la estructura original.

A pesar de las ventajas antes mencionadas, el sistema FRP también posee desventajas importantes, las cuales están asociadas a las resinas orgánicas utilizadas como matriz para unir e impregnar las fibras y adherir el refuerzo a la estructura. Las desventajas principales asociadas son las siguientes:

- Mal comportamiento de las resinas epóxicas ante temperaturas por encima del punto de transición del vidrio.
- Riesgo para el trabajador, debido al contenido de sustancias nocivas presente en las resinas.
- Imposibilidad de aplicar el sistema FRP en superficies húmedas o a bajas temperaturas.
- Baja permeabilidad al vapor de agua (riesgo de deslaminación).
- Incompatibilidad de la resina con las propiedades del hormigón.
- Costo relativamente alto.
- Dificultad para identificar hormigón dañado bajo el FRP, debido a que la resina no refleja el daño en el hormigón.

Debido a lo anterior se estudió el reemplazo de la matriz en base a resina orgánica por una matriz inorgánica en base a mortero de cemento, conocido como FRM (*Fiber-Reinforced Mortar*). Lamentablemente este sistema de refuerzo conlleva otro problema, el que viene de

la granularidad del mortero, que le dificulta a la matriz penetrar e impregnar las láminas de fibras. Esto sucede debido a que los morteros, a diferencia de las resinas, no pueden mojar fibras individuales. Para resolver esta limitante se observó que las propiedades y características de la unión de la fibra-matriz en una matriz en base a cemento podían ser mejoradas si las láminas continuas de fibras eran reemplazadas por mallas de fibras, dando origen al sistema de refuerzo FRCM. Estas telas o mallas se fabrican a partir de haces de fibras tejidas en al menos dos direcciones, generalmente ortogonales. Mediante la distribución de estos haces de fibras y los espacios presenten en la malla se hace posible una mejor penetración de la matriz dentro de la malla de fibras. De esta forma, el sistema de refuerzo FRCM, definido como un material compuesto por una matriz en base a mortero de cemento dentro de la cual se encuentra embebida una malla de fibras posee varias ventajas, como:

- Compatibilidad con las propiedades químicas, físicas y mecánicas del hormigón armado.
- Fácil instalación.
- Matriz cementícea lo suficientemente porosa como para permitir el transporte del aire y de la humedad a través del refuerzo.
- Buen comportamiento ante elevadas temperaturas y una resistencia aceptable al fuego.
- Mantener las condiciones arquitectónicas originales en caso de requerir el retiro del refuerzo.

No obstante el uso de malla de fibras, la unión entre la malla y la matriz es el punto débil del sistema de refuerzo, por lo que la efectividad mecánica del FRCM está altamente influenciada por la capacidad de la matriz de impregnar los haces de fibras que conforman la malla(Zastrau et al. 2008), la efectividad de la unión entre la matriz y las fibras, y entre la matriz y la superficie de hormigón, que está influenciado por la fisuración de la matriz en base a cemento (Bücker et al. 2006).

En los últimos 10 años el sistema de refuerzo FRCM ha sido objeto de un importante desarrollo a nivel de estudios experimentales a escala, en laboratorios y en estructuras reales, algunos de los cuales son mencionados a continuación. Todas estas experiencias avalan las virtudes del método como solución para recuperar o incrementar la capacidad de estructuras.

2.2 Antecedentes Específicos

2.2.1 Estudios Experimentales en Hormigón Armado

Durante los últimos años se han realizado numerosos ensayos experimentales para estudiar el comportamiento del sistema de refuerzo FRCM en elementos estructurales de hormigón armado y albañilería, debido a las favorables propiedades mencionadas anteriormente. A continuación se presentan ensayos realizados sobre vigas y columnas de hormigón armado, y sus conclusiones. Algunos de estos datos son utilizados en el Capítulo 5, donde se calcula,

mediante las disposiciones del ACI 549, la resistencia última de los elementos reforzados, con el fin de realizar una comparación con los resultados experimentales, a modo de determinar la precisión de la metodología empleada.

2.2.1.1 Ensayos de Vigas Sometidas a Esfuerzo de Flexión

D'Ambrisi & Focacci (2011) realizaron tres tipos de ensayos a flexión en vigas de hormigón armado reforzadas mediante FRCM, para estudiar el comportamiento de las mallas de fibras de carbono (C-FRCM) y PBO (*poliparafenilenbenzobisoxazole*, PBO-FRCM), con diferentes disposiciones, número de capas de refuerzo y calidades de matrices. Además, utilizaron el sistema de refuerzo FRP, con fibra de carbono unidireccional en forma de pletinas (C-FRP), a modo de comparación. En los casos de las mallas (sistema FRCM), las fibras estaban embebidas en matriz cementícea, mientras en el caso de la lámina de fibras continuas de carbono se utiliza resina epóxica como adhesivo para fijar el refuerzo al elemento estructural (sistema FRP).

En la Figura 2.1 y Figura 2.2 se muestra el montaje experimental y la disposición de mallas de refuerzo, respectivamente, para uno de los tipos de ensayos que realizaron.

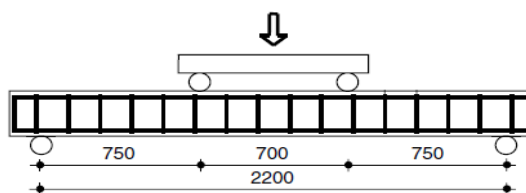


Figura 2.1. Montaje Experimental, D'Ambrisi & Focacci (2011).

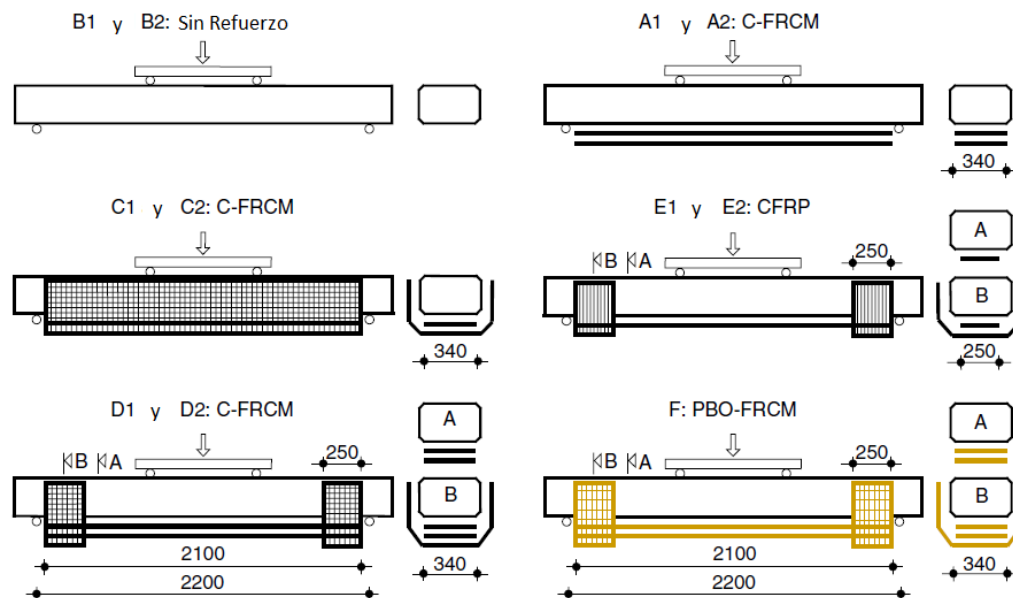


Figura 2.2. Disposición Fibras, D'Ambrisi & Focacci (2011).

Las vigas reforzadas presentaron los siguientes cuatro modos de falla (ver Figura 2.3):

- Desprendimiento frágil del sistema de refuerzo con fractura en el hormigón.
- Deslizamiento de las fibras dentro de la matriz con deformación del refuerzo.
- Desprendimiento frágil del material de refuerzo en la interfaz matriz/hormigón, en el plano de la unión.
- Deslaminación de la capa de la malla, con fractura en la interfaz con la matriz, precedido por un deslizamiento relevante entre la fibra y la matriz.

Los modos de falla y su correspondiente curva carga-deformación, se presentan en la Figura 2.3 y Figura 2.4, respectivamente.

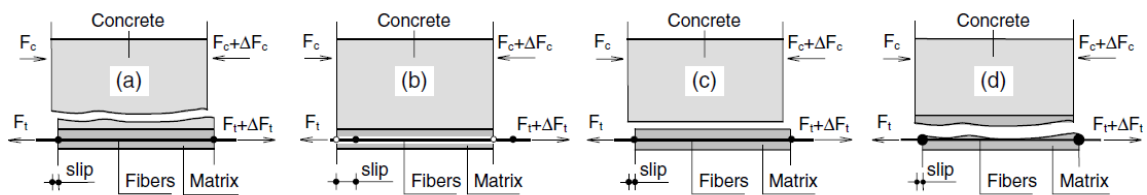


Figura 2.3. Modos de Falla a Flexión, D'Ambrisi & Focacci (2011).

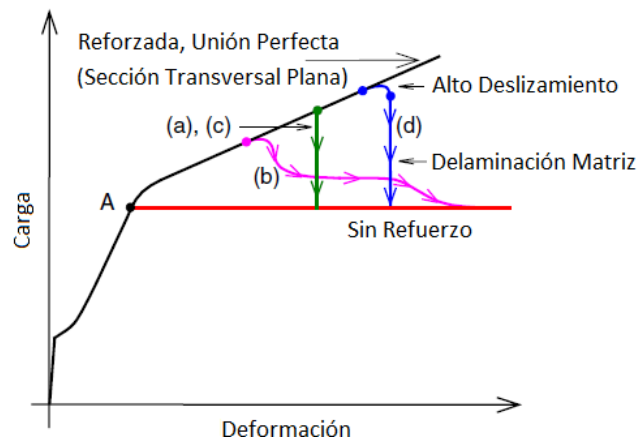


Figura 2.4. Carga versus deformación esquemática modos de falla, D'Ambrisi & Focacci (2011).

Los modos de fallas a), c) y d) corresponden a fallas frágiles, no deseables, mientras que el b) es una falla más dúctil. La falla a) se presentó en los especímenes CFRP y la c) en los C-FRCM, sin refuerzo al corte en las caras laterales (*U-wrap*) en los extremos. Por otro lado el modo de falla b) fue característico de los especímenes C-FRCM y se manifiesta por una disminución de la carga en la curva carga-deformación, especialmente en los especímenes C y D (dos capas de fibras). Esto se puede explicar por la pérdida gradual de la unión entre las fibras y la matriz hasta alcanzar la falla por deslizamiento de la fibra con respecto a la matriz.

La mayoría de las vigas ensayadas reforzadas (en los tres tipos de ensayos) con sistema FRCM presentaron pérdida de capacidad debido, inicialmente, al deslizamiento de las fibras con respecto a la matriz, causada por fisuras por flexión en el hormigón y, por lo tanto, en la matriz, debido a la concentración de esfuerzos en estas zonas. En el caso de una matriz con menor resistencia mecánica, a medida que el agrietamiento aumentó se pudo observar deslaminación de las fibras del refuerzo en la región de momento máximo. Se concluyó que la pérdida de capacidad del elemento reforzado mediante FRCM ocurre primordialmente debido al deslizamiento entre las fibras y la matriz.

Con respecto a las diferentes fibras y sistemas de refuerzo, en la Figura 2.5 se muestra la curva carga-deformación de configuraciones equivalentes en cuanto a rigidez axial de las fibras, donde la del sistema FRP es aproximadamente un 20% mayor. Los especímenes reforzados (D1, D2, E1, E2 y F) poseen refuerzo en forma de U en los extremos. A partir del gráfico se puede observar que los especímenes reforzados con fibra de carbono con sistema FRCM, que fallaron según el modo de falla b), presentan una disminución gradual de capacidad una vez alcanzado un deslizamiento considerable. Por otro lado los especímenes C-FRP y PBO-FRCM, que fallaron según los modos a) y c) respectivamente, presentaron una pérdida repentina de capacidad, lo que corresponde a la deslaminación de tipo frágil representativa de esos modos de falla.

Los especímenes PBO-FRCM y CFRP alcanzaron valores similares de capacidad, con un aumento de aproximadamente un 30%, mientras que el especímenes C-FRCM sólo produjo un aumento de entre un 9-18%. Por lo que éste último se considera menos efectivo en cuanto a aumento de capacidad, no obstante, es el único que presentó una falla dúctil.

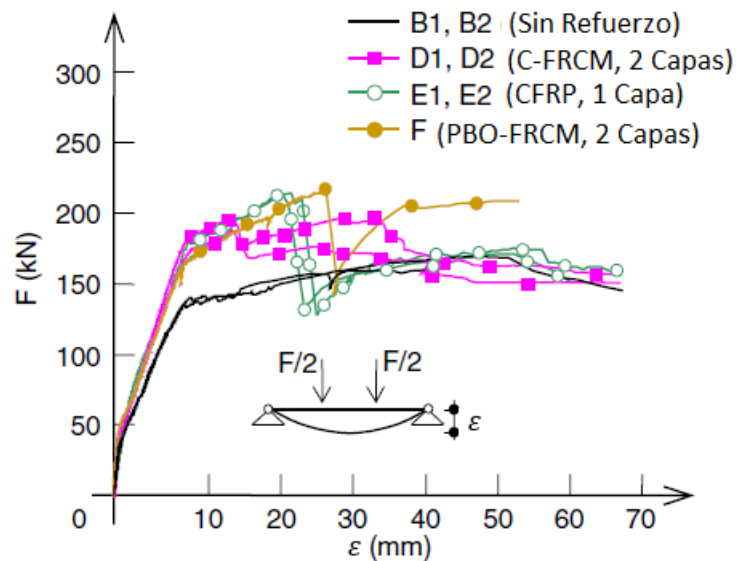


Figura 2.5. Carga-deformación según material de refuerzo, D'Ambrisi & Focacci (2011).

En relación a la diferente disposición de las fibras, en la Figura 2.6 se muestra la curva carga-deformación para diferentes configuraciones. El espécimen C posee refuerzo en forma de U continuo, el D lo tiene sólo en los extremos y el A no posee refuerzo transversal. Éste último fue el único que falló mediante un modo de falla frágil, a). Los otros dos fallaron con el modo b). A partir del gráfico se puede observar que todos alcanzaron valores similares en cuanto a capacidad, siendo el espécimen C un 18% superior, debido al refuerzo continuo lateral.

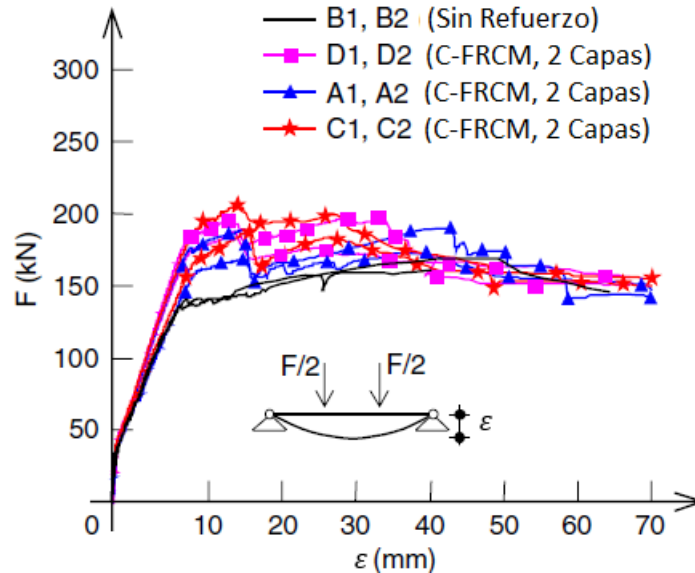


Figura 2.6. Carga-deformación según disposición de refuerzo, D'Ambrisi & Focacci (2011).

Finalmente, se concluyó que la pérdida de capacidad del refuerzo está determinada, en la mayoría de los casos, por el deslizamiento entre las fibras y la matriz, por lo que el óptimo diseño de la matriz es vital en el mejoramiento de las propiedades de adherencia entre la malla y el mortero del refuerzo, y por lo tanto en el desempeño del refuerzo, favoreciendo un modo de falla dúctil y un aumento de la capacidad resistente del elemento.

Babaeidarabad et al. (2014) realizó ensayos a flexión sobre doce vigas de hormigón armado, para estudiar el comportamiento del FRCM, utilizado como refuerzo adherido en la cara a tracción. Se utilizaron una o cuatro capas de mallas fibra de PBO, y compararon resultados con hormigón de baja y alta resistencia. Las propiedades a tracción del refuerzo fueron obtenidas a partir de las disposiciones de la norma AC 434.

A partir de los resultados obtenidos se observó una menor efectividad en el refuerzo de las vigas con hormigón de mayor resistencia, lo que indica que la resistencia a compresión del hormigón no determina un aumento de capacidad del elemento reforzado, no así la resistencia a tracción, la que en este caso era prácticamente igual para ambos hormigones. Por otro lado, las vigas reforzadas con una o cuatro capas presentaron modos de falla diferentes, las primeras fallaron debido al deslizamiento entre la matriz y las fibras en la zona del máximo

momento, mientras que las segundas presentaron deslaminación de la matriz del sustrato, que dio inicio a una grieta amplia en la zona central, en un modo de falla más frágil. Adicionalmente se concluyó que el refuerzo aumenta considerablemente la capacidad a flexión y la rigidez, pero que disminuye la pseudo-ductilidad

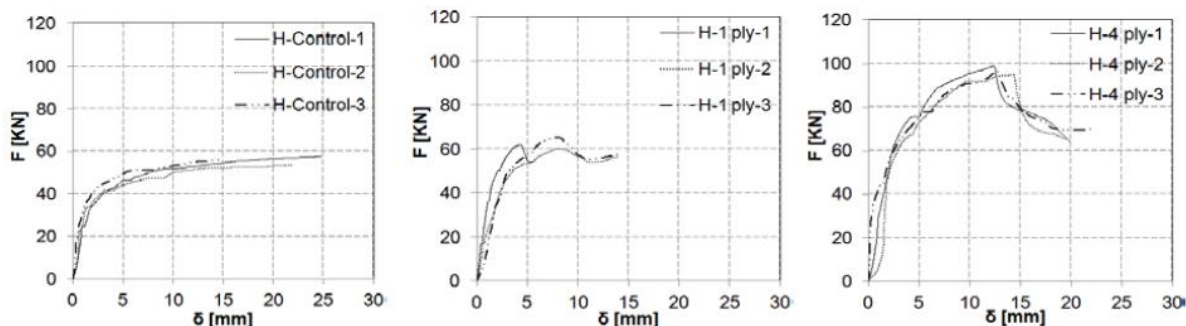


Figura 2.7. Curva Carga-Deformación Hormigón Baja Resistencia, Sin Refuerzo (Izquierda), con Una Capa de Refuerzo (Centro), con Cuatro Capas de Refuerzo (Derecha), Babaeidarabad et al. (2014).

La carga máxima soportada, con su respectivo modo de falla de presentan en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Resultados Carga Máxima a Flexión, Babaeidarabad et al. (2014).

Especimen		N° Capas Fibra	Carga máx. [kN]	Modo de Falla FRCM
Hormigón baja resistencia	CL	-	51.4	-
	L1	1	67.7	Deslizamiento
	L4	4	99.0	Deslaminación
Hormigón alta resistencia	CH	-	55.8	-
	H1	1	63.0	Deslizamiento
	H4	4	96.8	Deslaminación

Loreto et al. (2014) realizó ensayos a flexión sobre vigas de hormigón armado tipo losa, reforzadas mediante el sistema FRCM, con fibra de PBO. Las propiedades mecánicas del refuerzo fueron obtenidas a partir de ensayos a tracción, según lo indica la AC 434. Se estudió el efecto del refuerzo con una o cuatro capas, en vigas de hormigón de baja y alta resistencia.

En la Tabla 2-2 se muestran los resultados para la carga máxima. Se concluyó que el refuerzo es efectivo para ambos tipo de hormigón, se alcanzó un aumento de capacidad de aproximadamente 138% y 208% con una y cuatro capas de refuerzo respectivamente, pero que se traduce en una pérdida de ductilidad importante.

En la Figura 2.8 se muestra la deformación unitaria en una sección de hormigón armado, con una y cuatro capas de refuerzo. En ella se observa que para cargas altas ya no se cumple el supuesto de compatibilidad de deformaciones. En el caso de una capa de refuerzo se observa

una pequeña desviación con respecto a una recta, donde el refuerzo se deforma más de lo supuesto, lo que se traduce en una falla por deslizamiento, mientras que en el espécimen con cuatro capas se observa una gran desviación, la cual es menor a la de las barras de acero, lo que significa que en el lugar donde el refuerzo se ha separado del sustrato éste experimenta una deformación pequeña, pero constante.

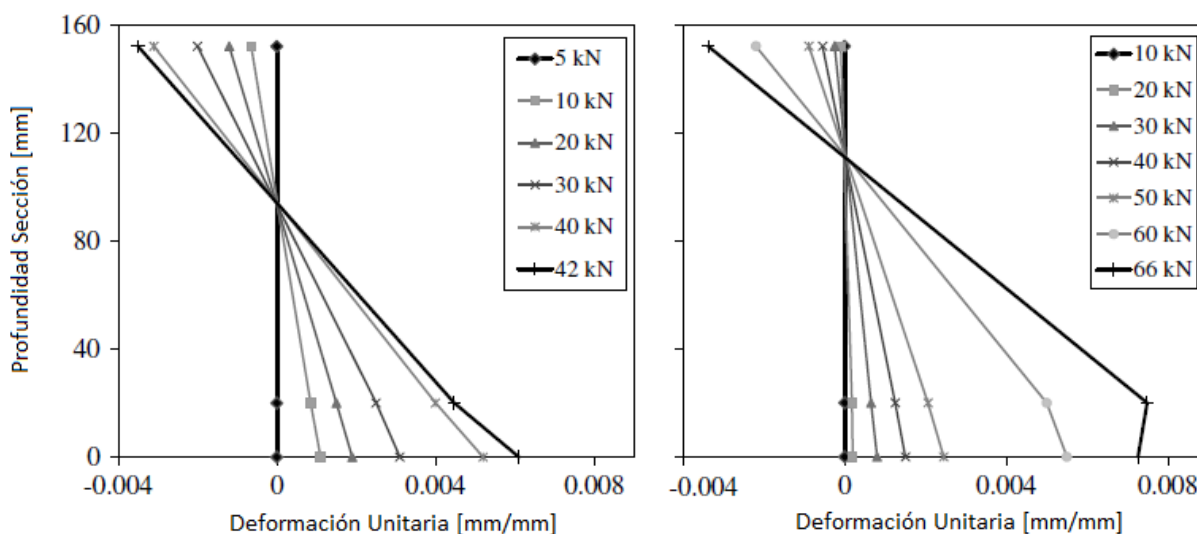


Figura 2.8. Deformación Sección, Hormigón Alta Resistencia, 1 capa (Izquierda), 4 Capas (derecha), Loreto et al. (2014).

Tabla 2-2. Carga Máxima a Flexión, Loreto et al. (2014).

Espécimen		Nº Capas Fibra	Carga máx. [kN]
Hormigón baja resistencia	CL	-	31.83
	L1	1	45.01
	L4	4	65.30
Hormigón alta resistencia	CH	-	31.01
	H1	1	42.00
	H4	4	65.76

2.2.1.2 Ensayos a Esfuerzo de Corte

Triantafyllou & Papanicolaou (2006) estudiaron la resistencia de elementos reforzados al corte mediante refuerzo FRCM (que denominan TRM, *Textile Reinforced Mortar*) como alternativa al FRP.

Realizaron ensayos sobre vigas encamisadas con malla de fibra de carbono embebida en matrices en base a mortero de cemento, en la sección sometida a corte. Utilizaron vigas con

deficiencia al corte, Figura 2.9, de manera de asegurar la falla de este tipo. Los parámetros en estudio eran el uso de mortero de cemento versus una base de resina como matriz, el número de capas de fibras (una o dos) y el uso de envoltorio tradicional (malla de refuerzo ortogonal al eje) versus malla de refuerzo aplicado en forma helicoidal, con un ángulo de 10° con respecto a la vertical.

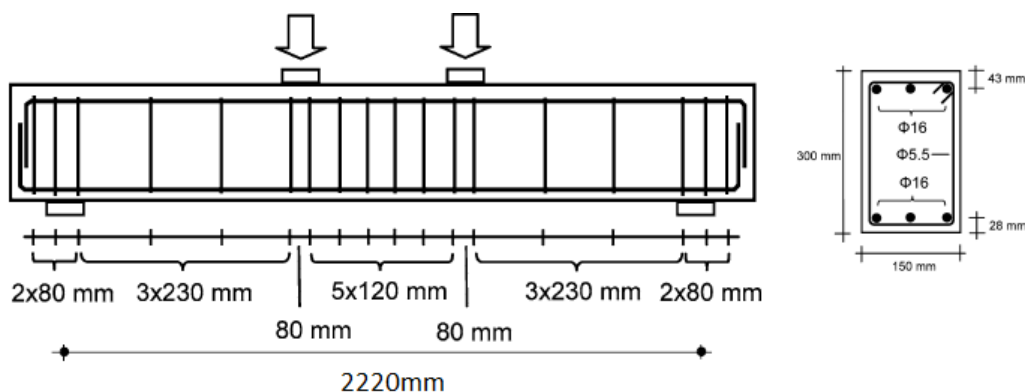


Figura 2.9. Montaje Experimental Ensayo a Flexión, Triantafillou & Papanicolaou (2006).

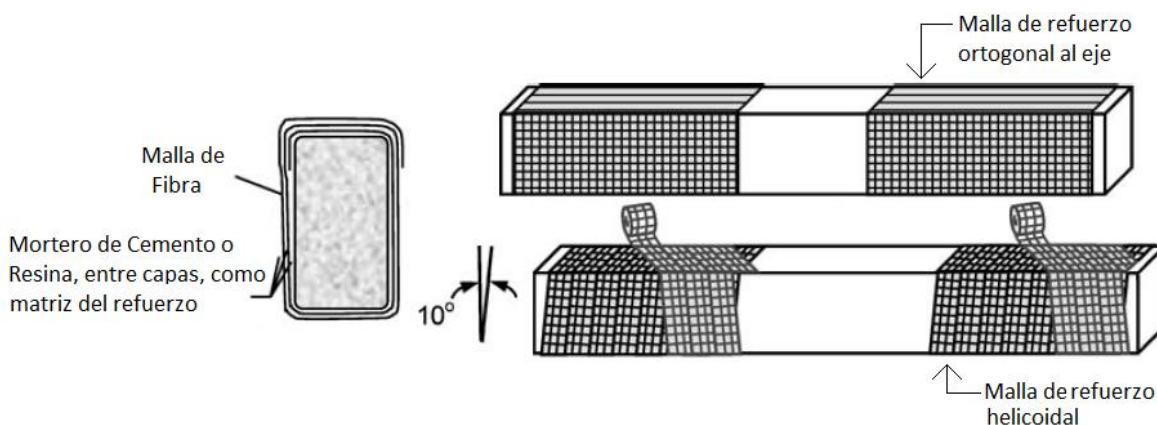


Figura 2.10. Disposición de Mallas a Corte, Triantafillou & Papanicolaou (2006).

Como se esperaba, la viga de control falló debido a insuficiente capacidad al corte, al igual que la viga reforzada con una capa de FRCM. No obstante la viga reforzada con una capa de FRP alcanzó valores de resistencia un 30% mayor y reemplazó la falla a corte por falla a flexión, al igual que todas las probetas reforzadas con dos capas de mallas del sistema FRCM. Se debe destacar que la probeta reforzada con refuerzo de una capa de malla presentó falla progresiva por rotura de las fibras que se transmitían al mortero de cemento, además el agrietamiento de la viga era reflejado en la matriz. Estas características son deseables, ya que permiten una detección rápida y una fácil inspección de las zonas insuficientemente reforzadas. En la Figura 2.11 y en la Tabla 2-3 se presentan los resultados para la carga máxima a corte soportada.

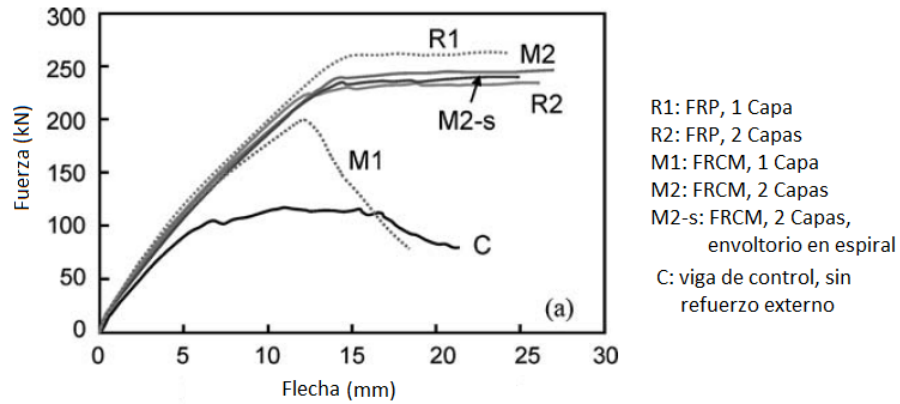


Figura 2.11. Capacidad a Corte, Triantafillou & Papanicolaou (2006).

Tabla 2-3. Carga Máxima a Corte, Triantafillou & Papanicolaou (2006).

Espécimen	Carga máx. [kN]	Modo de Falla	Tipo de Carga
C	116.5	Corte	Monotónica
M2	243.8	Flexión	Monotónica
M2-s	237.7	Flexión	Monotónica
M1	200.1	Corte	Cíclica

A modo de conclusión se determinó que el encamisado mediante FRCM de elementos de hormigón armado aumenta considerablemente la capacidad al corte. Pero, como se esperaba, no alcanza la resistencia que provee la solución con FRP. Una capa de fibra aumenta la capacidad al corte de manera significativa, pero dos capas, ya sea de encamisado tradicional o helicoidal, no sólo incrementan la capacidad al corte, sino que aumenta la ductilidad, permitiendo la activación de fluencia por flexión en lugar de la falla por corte. Además, se debe destacar que en estos casos la resistencia a flexión no se vio disminuida.

2.2.1.3 Ensayos a Esfuerzo Axial

Triantafillou & Papanicolaou (2006) realizaron ensayos sobre probetas cilíndricas y rectangulares de hormigón, para estudiar el comportamiento axial del refuerzo FRCM como alternativa del refuerzo externo (confinamiento) mediante FRP. El confinamiento de elementos sometidos a carga axial de estructuras es un método comúnmente utilizado para aumentar la capacidad de elementos de hormigón armado, evitando la falla frágil del hormigón.

Los autores utilizan el sistema FRCM (TRM) como confinamiento para investigar la respuesta de los elementos reforzados en resistencia y ductilidad, mediante mallas compuestas por fibras de carbono continuas en una matriz inorgánica, en base de cemento. El estudio tomó en consideración los efectos debido al uso de matriz orgánica versus

inorgánica, distintos tipos de matrices cementíceas y dos o tres capas de malla en el caso de las probetas cilíndricas, o dos o cuatro en el caso de las de sección rectangular.

En la Figura 2.12 se muestran los diferentes modos de fallas según tipo de refuerzo y en la Tabla 2-4 se adjuntan las cargas máximas para el sistema FRCM. A partir de los ensayos de los cilindros con distintos morteros de cemento se observaron dos tipos de fallas:

- Fractura del encamisado debido a insuficiencia del refuerzo bajo tensiones de tracción.
- Desunión del refuerzo al final del encamisado (extremo del elemento).

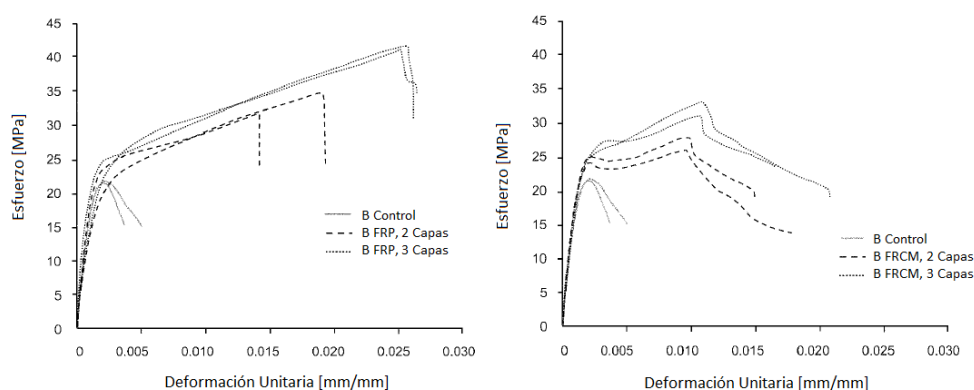


Figura 2.12. Capacidad Axial Probetas Cilíndricas Serie B, Triantafillou & Papanicolaou (2006).

Tabla 2-4. Serie A y C Triantafillou et al. (2006).

Especimen	Tensión de Compresión fcc [Mpa]		Deformación unitaria última %	
	Promedio	STD	Promedio	STD
Serie A (Cilíndrica)				
A_C	15.24	0.43	0.2	0.01
A_MI2	20.77	0.48	0.96	0.40
A_MII2	23.88	0.79	1.08	0.06
A_MI3	26.50	0.55	1.13	0.02
A_MII3	27.00	2.59	1.22	0.06
Serie C (Cuadrada)				
C_C	14.25	1.06	0.2	0.02
C_MII2	20.00	0.74	1.18	0.08
C_MII4	21.56	0.16	1.76	0.06

Como conclusión se determinó que el confinamiento que provee el encamisado mejora sustancialmente el comportamiento a compresión de los elementos ensayados. El grado de mejoramiento aumenta según la cantidad de capas de fibras de refuerzo incorporadas. En relación al modo de falla del encamisado, ya sea por fractura de la fibra o desunión del refuerzo, éste queda determinado por la fuerza de corte interlaminar entre la malla y la matriz, la que es proporcional a la resistencia a flexión del mortero, por lo que el correcto diseño de la matriz es fundamental para el buen desempeño del refuerzo. Por otro lado, a pesar de que el refuerzo FRP presentó valores de resistencia y deformación última significativamente mayores que el obtenido para el caso del sistema FRCM, este último presenta un modo de falla bastante menos frágil, debido al lento progreso de la fractura de las fibras, que se propaga lentamente a las hebras vecinas. Lo anterior es una característica deseable, al ser un modo de falla más dúctil que el observado en FRP.

2.2.1.4 Ensayos ante Carga Cíclica

Bournas et al. (2014) realizó ensayos sobre probetas rectangulares de hormigón armado, para estudiar el comportamiento del encamisado mediante refuerzo FRCM ante cargas cíclicas. Experimentalmente se investigó cómo afecta este confinamiento a columnas de hormigón armado con capacidad limitada ante cargas sísmicas debido al pandeo de las barras longitudinales o a la falla por hendimiento de éstas en la zona de empalme. Además, se compararon los resultados para refuerzos FRCM vs FRP.

Las probetas estudiadas corresponden a columnas tipo cantiléver, empotradas sobre una base de 0.5m de altura de hormigón armado, cargadas cíclicamente a flexión uniaxial bajo carga axial constante (Figura 2.13). El acero de refuerzo presente en estas columnas se definió sin considerar un detallamiento sísmico. Se estudiaron columnas con barras longitudinales continuas, con barras lisas y deformadas, y barras longitudinales discontinuas, con empalmes de 20 o 40 diámetros. Además, para la comparación del sistema FRCM y FRP se utiliza fibra de carbono en la cantidad equivalente para obtener la misma resistencia y rigidez en la dirección circunferencial de la columna.

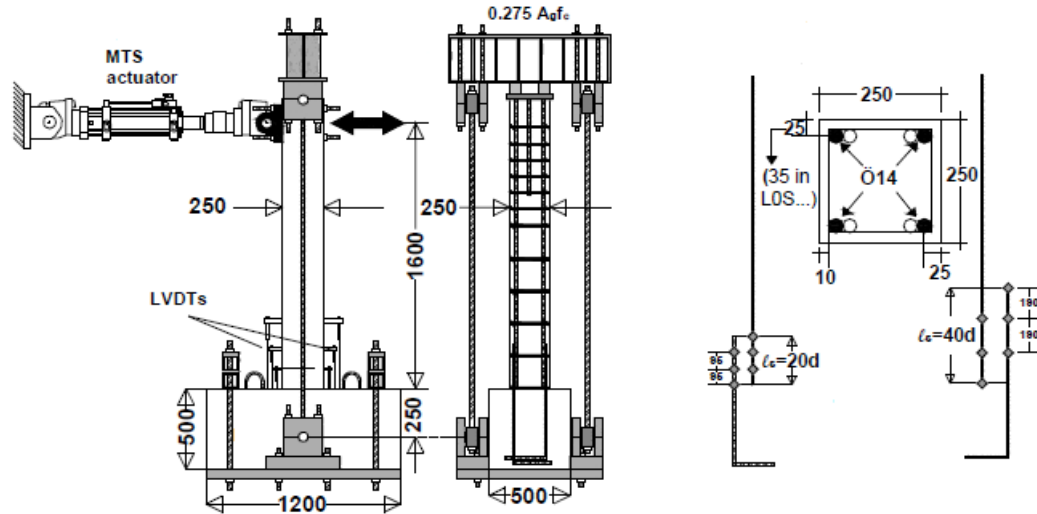


Figura 2.13. Montaje Experimental Carga Cíclica, Bournas et al. (2014).

A partir de los ensayos realizados a las columnas reforzadas mediante el sistema FRCM, se concluyó que el refuerzo es efectivo en términos de aumentar la capacidad a deformación cíclica y la energía de disipación de columnas ante cargas sísmicas, retrasando el pandeo de las barras longitudinales o previniendo las fallas por hendimiento de las columnas con empalmes insuficientemente largos. Específicamente, comparando el encamisado con FRCM vs FRP, ambos tienen prácticamente la misma efectividad en columnas con barras longitudinales continuas lisas, pero que con barras deformadas el sistema FRCM es un 50% más efectivo.

Con respecto a los diferentes largos de empalme se concluye que el confinamiento mediante FRCM entrega una ganancia sustancial en la capacidad de resistencia lateral y de deformación de columnas de hormigón armado con empalmes en la base. Comparadas con su contraparte FRP, el sistema FRCM se caracteriza por una efectividad un poco menor en términos de capacidad a la deformación en las columnas con empalmes cortos e igual para las que poseen empalmes largos.

Adicionalmente los autores realizan un análisis teórico a partir de las disposiciones impuestas en el Eurocode8, para la curvatura de falla. En el caso de las barras continuas deformadas el Eurocode predice de buena manera la curvatura, mientras que en el caso de las barras lisas es conservadora. En el caso de las barras discontinuas los valores son similares al caso de los mayores largos de empalme y bastante conservadora en los largos menores.

2.2.1.5 Durabilidad Material Compuesto FRCM

Arboleda et al. (2014) estudió la durabilidad de dos tipos fibras en el sistema de refuerzo FRCM, fibras de carbono y de PBO (*poliparafenilenbenzobisoxazole*). Para esto se determinó la capacidad a tracción del compuesto y de la unión entre la fibra y la matriz. La capacidad a tracción del material se determinó mediante las disposiciones de la AC 434, luego de estar expuesto a condiciones ambientales que podrían afectar su durabilidad, por ejemplo ciclos de congelación y descongelación, fraguado en alta temperatura de vapor de agua, inmersión en agua salada o en un ambiente alcalino, y la resistencia al combustible. Los resultados indicaron que no existe una degradación significativa debido a los ambientes descritos anteriormente, por el contrario, en la mayoría la resistencia aumentó, probablemente por la hidratación continua pasado los 28 días.

3 Aplicación Sistema FRCM

El sistema FRCM es un método de refuerzo estructural que se utiliza en elementos de albañilería y hormigón armado, siendo aplicado externamente a la superficie de hormigón que se debe encontrar previamente preparada para asegurar la adherencia del refuerzo al sustrato. El FRCM corresponde a un material compuesto por dos elementos principales, una o más capas de malla de refuerzo estructural de fibras minerales, la cual se encuentra embebida en una matriz cementícea. Esta matriz corresponde generalmente a un mortero de cemento Portland, con una dosis máxima de polímeros orgánicos de un 5% del peso del cemento.

Las siguientes condiciones para la instalación del refuerzo se basan en las disposiciones de la ACI 549.

3.1 Etapa Previa Instalación

Para la instalación de un sistema de refuerzo FRCM se debe tener en cuenta, en primer lugar, las condiciones ambientales a las que se encontrará sometido éste antes y durante la instalación, ya que las temperaturas pueden afectar el correcto desempeño del refuerzo. Por ejemplo, temperaturas entre 35° a 50°C pueden disminuir la trabajabilidad del mortero, mientras que temperaturas entre 4° a 6°C pueden retrasar el fraguado considerablemente. Debido a lo anterior se deben documentar las condiciones ambientales presentes antes y durante la instalación

Los límites de temperatura mínima y máxima, ambientales o del sustrato, humedad relativa y velocidad del viento deben ser especificadas por el proveedor, estas condiciones son importantes, pues no cumplirlas puede incurrir en una instalación inadecuada que comprometa la integridad del refuerzo.

3.1.1 Condiciones Sustrato FRCM

Antes de la instalación, además de las condiciones ambientales que se deben satisfacer, se debe tener en cuenta la preparación y/o reparación del sustrato sobre el que se instalará el refuerzo. Se debe destacar que una mala o nula preparación de la superficie puede conllevar una disminución de la capacidad del refuerzo.

La reparación del sustrato, en caso de ser necesario, debe ser realizada durante la etapa de preparación y el proveedor debe verificar que los materiales utilizados en la reparación sean compatibles con las propiedades de la matriz del refuerzo.

La preparación del sustrato depende del sistema utilizado, en general puede incluir procedimientos para regularizar la superficie, dejando discontinuidades no mayores a 2mm

o aplicación de morteros de relleno en las discontinuidades propias de los moldajes según los requerimientos del proveedor. Adicionalmente, en superficies extremadamente lisas puede ser necesario dar una cierta rugosidad, para obtener una buena adherencia de la matriz en el sustrato, lo que se puede lograr mediante tratamientos abrasivos a las superficies.

Especificaciones adicionales dependen del proveedor del refuerzo.

3.2 Etapa Instalación

La instalación del FRCM consiste, de modo general, en 3 pasos; aplicación de la matriz en el sustrato, aplicación de la malla de refuerzo sobre la matriz y finalmente la aplicación de una última capa de matriz, como recubrimiento.

1. Matriz Cementícea

En primer lugar se aplica una capa de matriz cementícea sobre el sustrato a reforzar, en la cual se embeberán las fibras, con espesor de aproximadamente 12mm. Si es necesario la matriz puede utilizarse para uniformar la superficie, cuando las discontinuidades son menores 2mm.

Es importante señalar que la matriz se considera un pegamento inorgánico, con único objetivo de adherir las fibras y no un mortero de reparación estructural, por lo que los daños existentes en el elemento deben repararse en la etapa de preparación del sustrato.

2. Malla de Fibras

Las mallas de refuerzo se aplican, en general, manualmente, presionándolas levemente sobre la matriz (Ver Figura 3.1). Especificaciones particulares serán entregadas por el proveedor. En caso de necesitar varias capas de refuerzo se requerirá aplicar sucesivamente capas de matriz y refuerzo, antes del fraguado completo de la capa anterior de matriz.



Figura 3.1. Aplicación de la Malla de Fibra sobre la Matriz Cementícea.

3. Recubrimiento Matriz Cementícea

Una vez aplicadas las capas de fibras necesarias, se aplica una última capa de matriz cementícea sobre las fibras, a modo de recubrimiento de protección (Ver Figura 3.2). Adicionalmente otros recubrimientos pueden utilizarse a modo de protección, siempre que sean compatibles con las propiedades físicas y mecánicas de la matriz, y sean aplicadas según las indicaciones del proveedor.



Figura 3.2. Aplicación de la Matriz Cementícea sobre la Malla de Fibra.

Algunos proveedores recomiendan metodologías más específicas para la aplicación del refuerzo, en la Figura 3.3 se presenta la sugerida por Ruredil, donde los números corresponden a los pasos antes mencionados, siendo el número 0 la preparación del sustrato. Ruredil aconseja la aplicación de una segunda capa de malla de fibras, en el caso de la fibra de carbono, con una inclinación de 45° con respecto a la horizontal y un recubrimiento adicional al de la matriz cementícea, de ser necesario, como sellador, el cual se presenta como el paso 3.1 en la figura.

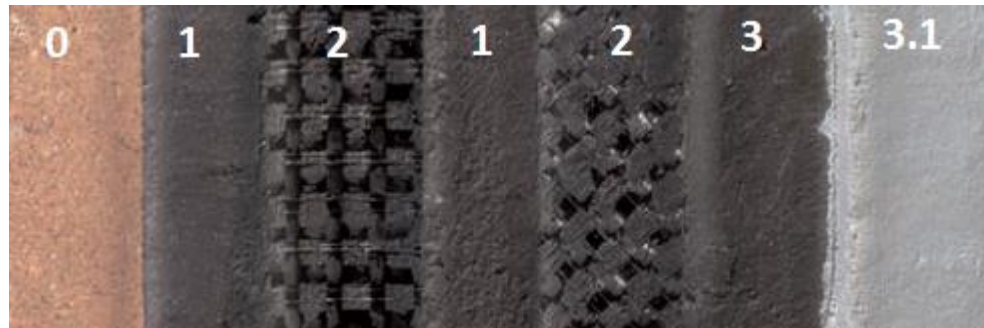


Figura 3.3. Secuencia Aplicación FRCM, Ruredil.

Adicionalmente, como metodo de anclaje se pueden utilizar conectores de fibras, como se muestra en la Figura 3.4, los cuales se entrelazan con las mallas y generan empotramiento del refuerzo en la matriz, creando un mejor agarre e interacción de los materiales que componen el refuerzo FRCM.



Figura 3.4. Conector de Anclaje Mallas de Fibras, G&P Intech.

4 Consideraciones Generales para el Diseño de Refuerzo de Elementos de Hormigón Armado mediante Sistema FRCCM

Las siguientes recomendaciones de diseño están basadas en la ACI 549-13, “Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCCM) System for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures”, y son consistentes con las disposiciones del AC 434, “Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening Using Fiber-Reinforced Cementitious Matrix (FRCCM) Composite Systems”, además están en acuerdo con los procedimientos de diseño de las normas ACI 318 y ACI 562.

El diseño presentado a continuación entrega niveles adecuados de seguridad, tanto para los límites impuestos para los estados de servicios como para los correspondientes al estado último, como deformaciones excesivas y agrietamiento, o deformaciones por fluencia lenta (*creep*) y fatiga, respectivamente.

4.1 Caracterización de los Materiales Constituyentes

A pesar de que los valores de las propiedades mecánicas de los materiales constituyentes del sistema FRCCM generalmente son informadas por los proveedores, éstos no son los que se deben utilizar para efectos de diseño del refuerzo. Según las disposiciones de la ACI 549 las propiedades entregadas por los proveedores sólo se deben utilizar como una aproximación inicial de que el material escogido cumple con los requerimientos mecánicos y físicos para el refuerzo requerido. Los materiales del refuerzo del sistema FRCCM a utilizar deben ser caracterizados según su uso y las condiciones ambientales a las que estará sometido.

A continuación se adjuntan los métodos de caracterización de la matriz cementícea y del material compuesto FRCCM, según la AC 434 y ACI 549.

4.1.1 Caracterización de la Matriz

A continuación se detallan las normativas que debe cumplir el mortero de cemento utilizado como matriz en el refuerzo:

- ASTM C157; la cual se refiere a la caracterización del comportamiento del mortero de cemento con respecto a la contracción
- ASTM C387; se refiere a la resistencia del mortero a compresión y al contenido de vacíos, a los 7 y 28 días.

Para determinar las propiedades de la matriz cementícea, al menos 5 especímenes deben ser ensayados.

4.1.2 Caracterización sistema FRCM

Para caracterizar el sistema FRCM se deben determinar sus propiedades mecánicas mediante un ensayo a tracción, de acuerdo al procedimiento establecido en el Anexo A de la guía de diseño AC 434.

En la Figura 4.1 se presente el comportamiento del refuerzo como lo define Weiland et al. (2007), considerando que la unión entre la matriz y la malla es perfecta y por lo tanto no se produce deslizamiento de las fibras con respecto a la matriz. En este gráfico se observan tres etapas principales, la primera corresponde a la etapa donde la matriz aún no se ha fisurado y la rigidez del compuesto se puede considerar igual a la de la matriz cementícea. Una vez que aparece la primera grieta se considera el inicio de la etapa IIa, hasta que el agrietamiento se detiene y la curva es aproximadamente paralela a la curva de la malla de refuerzo. Por último la etapa III se alcanza al momento de la falla.

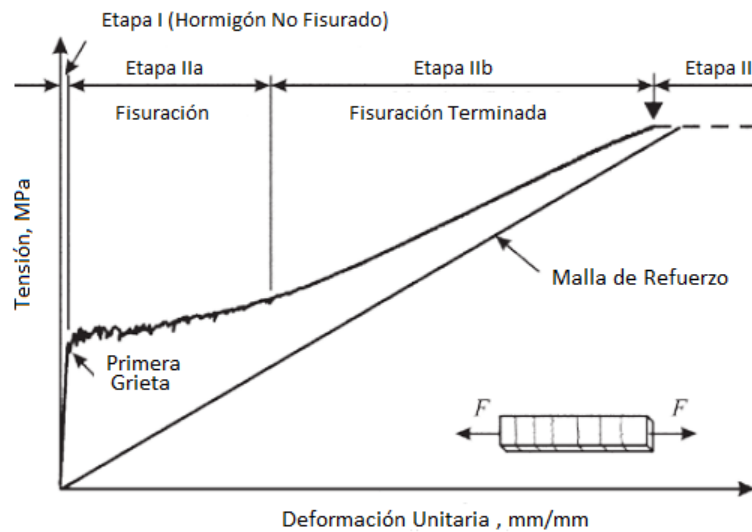


Figura 4.1. Comportamiento Teórico Compuesto FRCM, Weiland et al. (2007).

En la Figura 4.2 se muestra la curva tensión-deformación idealizada de un espécimen FRCM según la ACI 549, esta curva está compuesta por dos partes, una inicialmente lineal, hasta la tensión donde la matriz cementícea se fisura (ϵ_{ft}, f_{ft}), la segunda parte es lineal hasta la falla por deslizamiento de la fibra con respecto a la matriz (ϵ_{fu}, f_{fu}). El punto donde se unen las dos curvas se denominada punto de transición.

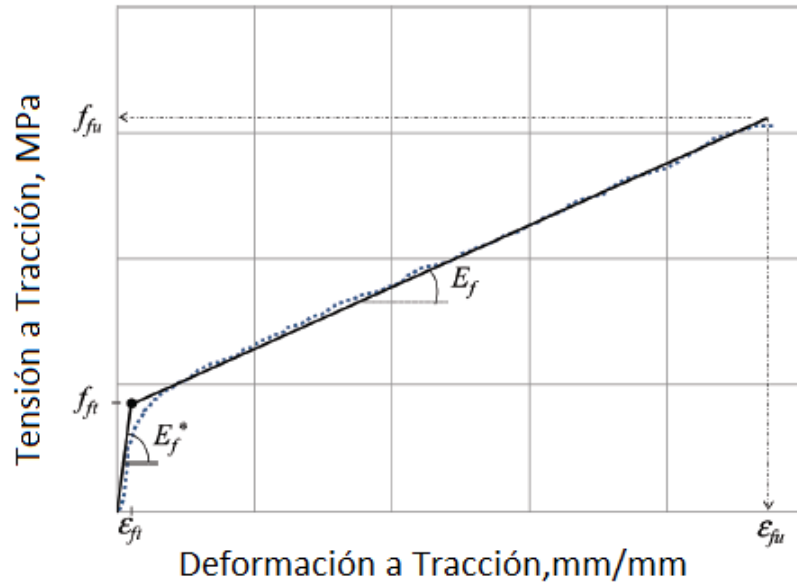


Figura 4.2. Curva Idealizada Tensión-Deformación espécimen FRCCM.

En la Figura 4.2:

- E_f Módulo de Elasticidad a tracción fisurado, *MPa*.
- E_f^* Módulo de Elasticidad a tracción no fisurado, *MPa*.
- f_{ft} Tensión a tracción correspondiente al punto de transición, *MPa*.
- f_{fu} Tensión de tracción última, *MPa*.
- ϵ_{ft} Deformación unitaria a tracción correspondiente al punto de transición, *mm/mm*.
- ϵ_{fu} Deformación unitaria última a tracción, *mm/mm*, *mm/mm*.

La tensión a tracción en el espécimen se calcula en función del área de la malla de fibra:

$$f_{fi} = \frac{P_i}{A_f w_f} \quad (4.1.2 - 1)$$

Donde:

- f_{fi} Tensión de tracción correspondiente al *i*-ésimo punto, *MPa*.
- P_i Carga correspondiente al *i*-ésimo punto, *N*.
- A_f Área de malla de refuerzo por unidad de ancho, *mm*²/*mm*.
- w_f Ancho nominal del espécimen, *mm*.

El ensayo para determinar la curva tensión-deformación del material compuesto consiste en cargar de manera axial una placa delgada del material (Figura 4.4). La placa debe tener el espesor en función de la cantidad de capas de fibras que serán utilizadas en el refuerzo, con respecto a su largo y ancho, debe tener al menos tres haces de fibra en cada dirección y no ser menor a cuatro veces el espesor del espécimen.

Durante el ensayo se aumenta paulatinamente la carga, mientras se registra la carga y la deformación. La deformación unitaria del espécimen se monitorea de manera de determinar la relación tensión-deformación, a partir de la cual se determina la tensión y la deformación de fisuración, la tensión a tracción última, el módulo de elasticidad antes y después de la fisuración de la matriz cementícea.

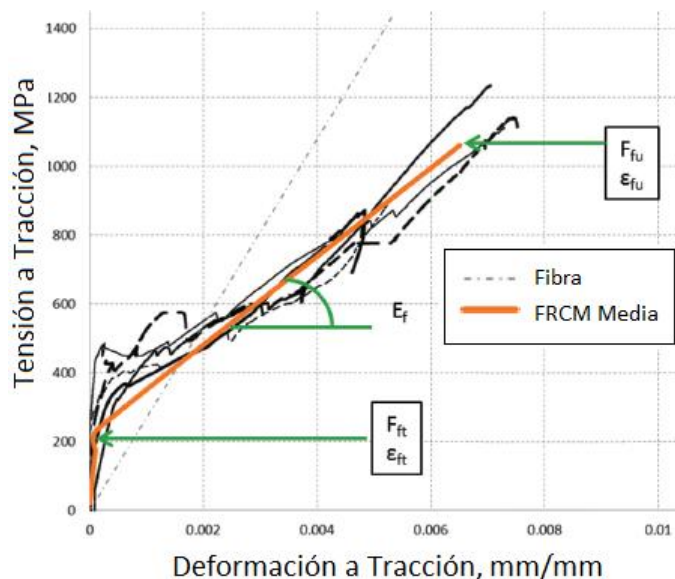


Figura 4.3. Curva Tensión-Deformación Experimental, ACI549-13.

En la Figura 4.3 se muestra la curva tensión-deformación de especímenes ensayados mediante las disposiciones de AC 434.

El módulo de elasticidad fisurado del espécimen se determina mediante la pendiente de la segunda curva. La norma sugiere que para calcular la pendiente se utilicen los puntos $0.9f_{fu}$ y $0.6f_{fu}$, y que E_f se calcule de la siguiente manera:

$$E_f = \frac{\Delta f}{\Delta \varepsilon} = \frac{0.9f_{fu} - 0.6f_{fu}}{\varepsilon_{f@0.9f_{fu}} - \varepsilon_{f@0.6f_{fu}}} \quad (4.1.2 - 2)$$

Finalmente, a partir del módulo de elasticidad fisurado, recién calculado, se debe calcular la deformación última:

$$\varepsilon_{fu} = \frac{f_{fu} - y_{intercept}}{E_f} \quad (4.1.2 - 3)$$

$$y_{intercept} = 0.6f_{fu} - E_f \varepsilon_{f@0.6f_{fu}} \quad (4.1.2 - 4)$$

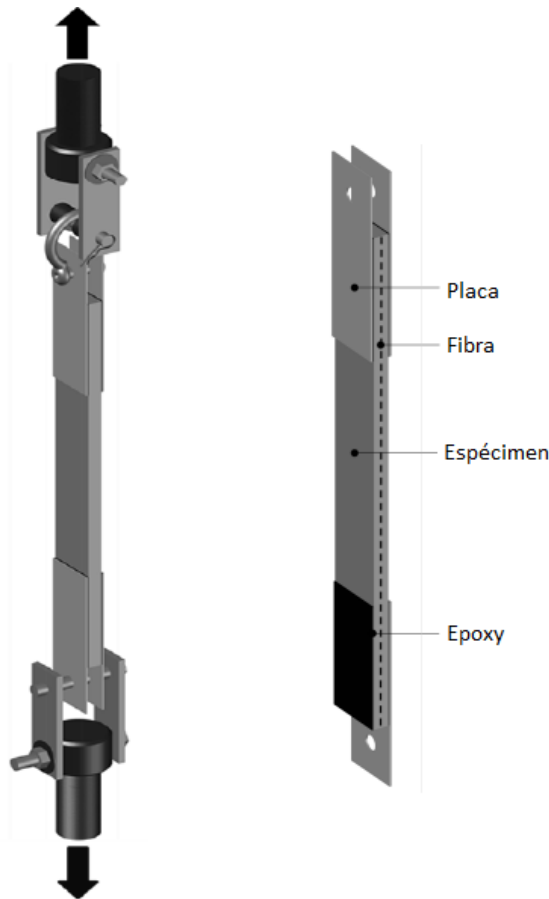


Figura 4.4. Ensayo a Tracción Muestra, Arboleda (2014).

La capacidad de soporte de carga de la muestra está sumamente influenciada por el mecanismo de agarre del ensayo, por lo que es importante que éste reproduzca las condiciones reales a las que se verá sometido el refuerzo. Bianchi et al. (2013) estudió experimentalmente dos tipos de configuraciones de agarre para muestras de FRCCM con fibras de PBO, una cuña, donde los esfuerzos se transmiten de manera transversal en los extremos de la muestra (Tipo A y B) y un agarre de tipo horquilla, el que permite el traspaso de esfuerzos de manera longitudinal a través de placas de metal adheridas mediante adhesivo epóxico a la muestra (Tipo C). Concluyó que la configuración tipo cuña alcanzaba la capacidad máxima de la fibra, mientras que la tipo horquilla llegaba a valores de capacidad bastante menores, debido a que la fibra no se encuentra anclada en los extremos. En la Figura 4.5 se muestran los resultados obtenidos para los dos mecanismos de agarre.

Arboleda (2014), a partir de los resultados experimentales obtenidos por ensayos realizados por Bianchi et al. (2013) estudió diferentes configuraciones de agarre, de lo que concluyó que los que transmiten la carga de manera transversal a la muestra, como los agarre de sujeción, están en realidad anclando tanto la matriz como la fibra, lo que se traduce en valores de soporte de carga altos, que no se producirían en la realidad. Por otro lado, los mecanismos que transmiten la carga de manera longitudinal no anclan los extremos de la muestra

permitiendo deslizamiento entre la matriz y la fibra, por lo que es una alternativa de agarre que se acerca más a las aplicaciones de reparación donde los extremos del refuerzo no se encuentran empotrados.

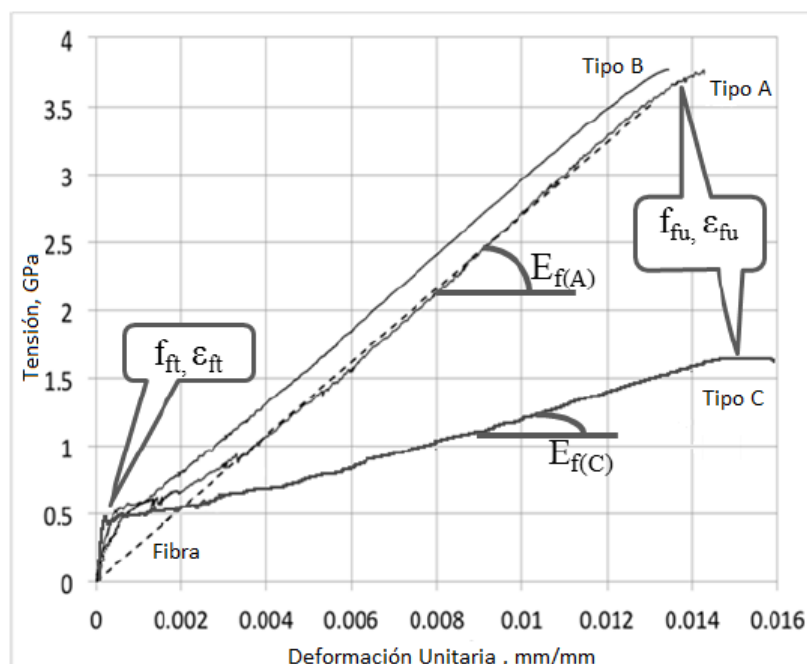


Figura 4.5. Resultados Ensayo a Tracción PBO-FRCM, Bianchi et al. (2013).

Arboleda (2014) también estudió el efecto del largo de la placa que conecta el mecanismo de agarre con la muestra a ensayar. La configuración correspondía a un agarre tipo horquilla, de manera de representar de buena manera las condiciones a las que estaría sometido un refuerzo. A partir de ensayos experimentales observó que el largo de la placa afectaba la capacidad de carga pasada la fisuración, siendo un 50% mayor en el caso de una placa de 150mm con respecto a una de 100mm. Sneed et al. (2014) realizó ensayos a corte comparables, con los que llegó a valores similares, al aumentar el largo a 200mm la capacidad aumentó un 25% con respecto al de 150mm. A partir de esto se concluyó que el largo de la placa, que corresponde al largo de transferencia de carga, afecta la capacidad a tracción y tiende a nivelarse a una mayor longitud.

4.2 Combinaciones de Cargas

4.2.1 Combinación de Cargas para la Realización del Diseño del Refuerzo

Según la ACI 562, “Code Requirements for Evaluation, Repair, and Rehabilitation of Concrete Buildings”, la cual define los criterios específicos para la evaluación, reparación y rehabilitación de estructuras de hormigón, en reparaciones realizadas mediante sistemas externos, como es el FRM, la capacidad de la estructura previa a la instalación del refuerzo debe ser al menos igual a la combinación de cargas presentada en la ecuación 4.2.1-1, de esta manera se asegura que la estructura tiene la capacidad suficiente para resistir las cargas de servicio hasta la instalación del refuerzo.

$$U \geq 1.2De + 0.5L + A_k + 0.2S_c \quad (4.2.1 - 1)$$

Donde:

- U Capacidad estructura minorada, sin refuerzo, N .
- De Carga muerta, estructura rehabilitada, N .
- L Carga viva, estructura rehabilitada, N .
- A_k Carga debido a un evento extraordinario, N .
- S_c Carga de nieve, estructura rehabilitada, N .

En caso de que la carga viva de diseño tenga una alta probabilidad de mantenerse por un periodo largo de tiempo el factor de mayoración correspondiente, 0.5, debe ser reemplazado por 1.

Como evento extraordinario se considera cualquier situación que pueda influir con una probabilidad baja de ocurrencia, pero de alta incidencia en el desempeño del elemento a reforzar, entre ellos se encuentra el fuego, los impactos y las explosiones.

4.2.2 Combinaciones de Carga para el Diseño del Refuerzo

Según los manuales de diseño antes mencionados, las cargas y sus combinaciones deben ser determinadas de acuerdo a la ASCE/SEI 7 y en caso que exista carga sísmica presentes se debe utilizar la ASCE/SEI 41, no obstante en Chile se debe utilizar la normativa chilena vigente, NCh 3171 y NCh 2369, según corresponda.

El requerimiento básico para el diseño del refuerzo es:

$$\phi R_n \geq U \quad (4.2.2 - 2)$$

Donde:

- ϕR_n Capacidad de diseño minorada.
- U Capacidad necesaria, calculada a partir de las combinaciones de carga.

4.3 Factores de Reducción de Capacidad para el Diseño de Refuerzo

Los factores de reducción deben ser escogidos en función del tipo de refuerzo. Estos factores son de vital importancia para resguardar la estructura del colapso debido a alguna falla relacionada con el sistema de refuerzo.

El factor de reducción para el refuerzo trabajando a flexión o a esfuerzo axial, ϕ_m , se define como:

$$\phi_m = \begin{cases} 0.90 & \text{para } \varepsilon_t > 0.005 \\ 0.65 + \frac{0.25(\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \text{para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0.005 \\ 0.65 & \text{para } \varepsilon_t < \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (4.3 - 1)$$

El factor de reducción para el refuerzo trabajando a esfuerzo de corte, ϕ_v , se considera igual a 0.75.

4.4 Disposición de Refuerzo, Según Esfuerzo

La manera en la que se disponen las mallas de refuerzo depende del esfuerzo actuante y del compromiso que se impone en el refuerzo externo y del tipo de elemento.

4.4.1 Refuerzo a Flexión

Para el caso de vigas y losas, donde se quiere aumentar la capacidad a flexión, las fibras se disponen en la cara a tensión del elemento (Figura 4.6), con la dirección primaria de las haces del tejido en la dirección del esfuerzo a tracción. La orientación de las fibras no debe superar los $\pm 5^\circ$ de la orientación de diseño.

Se destaca que la aplicación de refuerzo en las caras laterales del elemento, en las zonas sometidas a corte, aumenta la capacidad a flexión e induce un modo de falla más dúctil (D'Ambrisi & Focacci, 2011).

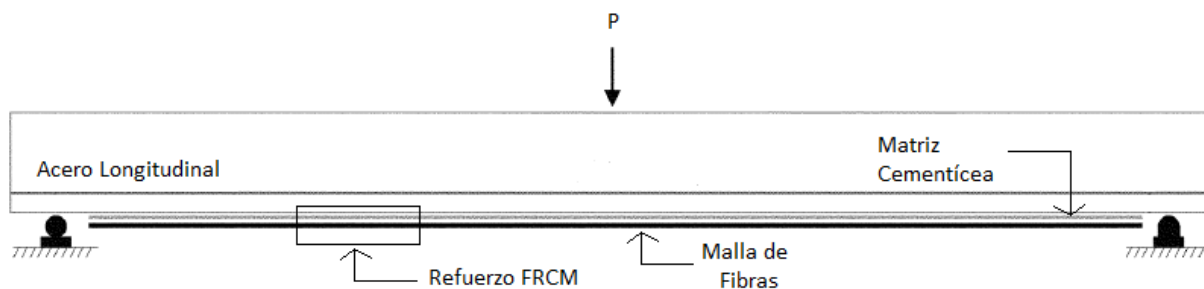


Figura 4.6. Disposición FRM a Flexión, Vigas

4.4.2 Refuerzo a Corte

Para realizar un refuerzo a corte se debe encamisar el elemento mediante FRCM, envolviéndolo en su sección transversal. El encamisado puede ser continuo, completo o en forma de u (*U-wrap*) en el caso de vigas (Figura 4.7) y completo en el de columnas (Figura 4.8). Puede ser utilizado en las zonas donde se esperan rotulas plásticas o para mejorar el comportamiento a flexión, pero en estos casos el encamisado debe ser completo. En ambos casos, se puede someter todo el elemento al sistema de refuerzo o sólo las secciones que lo requieran, como los tramos de corte/flexión en el caso de las vigas.

Las fibras se disponen con la dirección primaria de las hebras del tejido en la dirección perpendicular al eje mayor del elemento, no obstante se puede orientar las hebras primarias en la dirección paralela, debido a que éstas están dispuestas en dos direcciones y se asume que la continuidad en el tejido se mantiene. De igual manera que en el caso del refuerzo a flexión, la orientación de las fibras no debe superar los $\pm 5^\circ$ de la orientación de diseño.

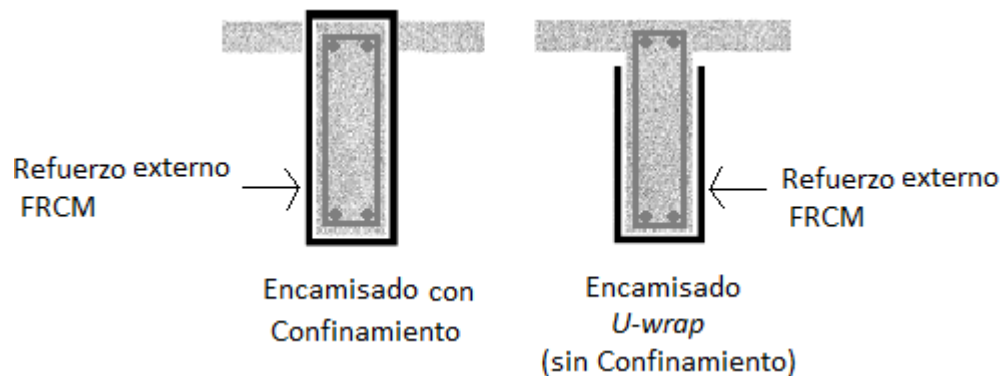


Figura 4.7. Disposición FRCM a Corte, Vigas

4.4.3 Refuerzo Axial

El elemento reforzado para aumentar su capacidad a compresión debe ser encamisado (Figura 4.8), a modo de confinamiento, de modo transversal a la dirección de la carga axial a la que se encuentra sometida.

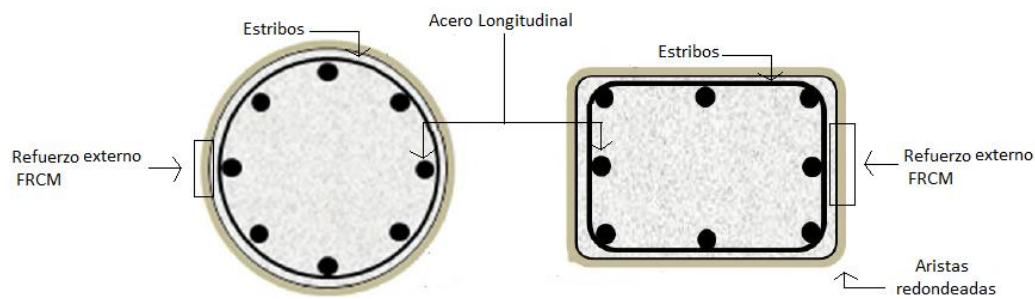


Figura 4.8. Disposición FRCM Encamisado, Columnas, Arboleda (2012).

4.5 Diseño del Refuerzo de Elementos de Hormigón Armado mediante FRCM

Es importante destacar que las propiedades de diseño utilizadas a continuación, como la tensión y deformación de diseño, f_{fd} y ε_{fd} , se definen como la tensión y deformación última, respectivamente, menos una desviación estándar, mientras que el módulo elástico fisurado, E_f , es el promedio.

4.5.1 Reforzamiento a Flexión

El sistema de refuerzo FRCM puede ser utilizado para aumentar la capacidad a flexión de elementos existentes de hormigón armado, losas o vigas, siendo normalmente adherido externamente a las caras correspondientes al esfuerzo a tracción.

Se debe destacar que la metodología presentada a continuación no aplica para el uso del sistema de refuerzo a flexión en zonas donde se esperan rotulas plásticas de elementos tipo marco de momento de ductilidad controlada, resistiendo cargas sísmicas. En esos casos se debe estudiar el efecto de la carga cíclica.

Para este tipo de refuerzo se hacen las siguientes suposiciones:

- Las secciones permanecen planas una vez cargadas.
- La unión entre el FRCM y el elemento permanece efectiva (perfecta adherencia).
- La máxima deformación unitaria a compresión en el hormigón es $\varepsilon_{cu} = 0.003$.
- El FRCM posee un comportamiento bilinear hasta la falla.

El análisis considera los siguientes modos de falla posibles en un elemento de hormigón armado reforzado mediante FRCM externamente adherido para aumentar su capacidad a flexión, donde los últimos tres tienen relación con el refuerzo:

- a) Aplastamiento del hormigón en compresión antes de la fluencia del acero de refuerzo.
- b) Fluencia del acero en tracción seguido de aplastamiento del hormigón comprimido.
- c) Deslaminación del recubrimiento.
- d) Deslaminación del refuerzo FRCM del hormigón.
- e) Deslaminación de las fibras del refuerzo.
- f) Deslizamiento de la malla de fibras dentro de la matriz cementícea.

La deformación unitaria efectiva a tracción alcanzada al momento de la falla a nivel del refuerzo FRCM, ε_{fe} , debe estar limitada por la deformación unitaria a tracción de diseño del material, ε_{fd} .

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} \leq 0.012 \quad (4.5.1 - 1)$$

La tensión efectiva a tracción alcanzada en la falla en el refuerzo FRCM, f_{fe} , se define en función del módulo de elasticidad del refuerzo, E_f , según la ley constitutiva:

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \text{ con } \varepsilon_{fe} \leq \varepsilon_{fd} \quad (4.5.1 - 2)$$

La capacidad a flexión de diseño del elemento reforzado se define según la siguiente expresión:

$$\Phi_m M_n = \Phi_m (M_s + M_f) \quad (4.5.1 - 3)$$

Donde:

M_n Capacidad nominal a flexión del elemento reforzado, Nmm .

M_s Capacidad a flexión, debida al acero de refuerzo, Nmm .

M_f Capacidad a flexión, debida al refuerzo FRCM, Nmm .

Φ_m Factor de reducción FRCM a flexión.

4.5.1.1 Cálculo de la capacidad nominal a flexión con refuerzo FRCM, M_n

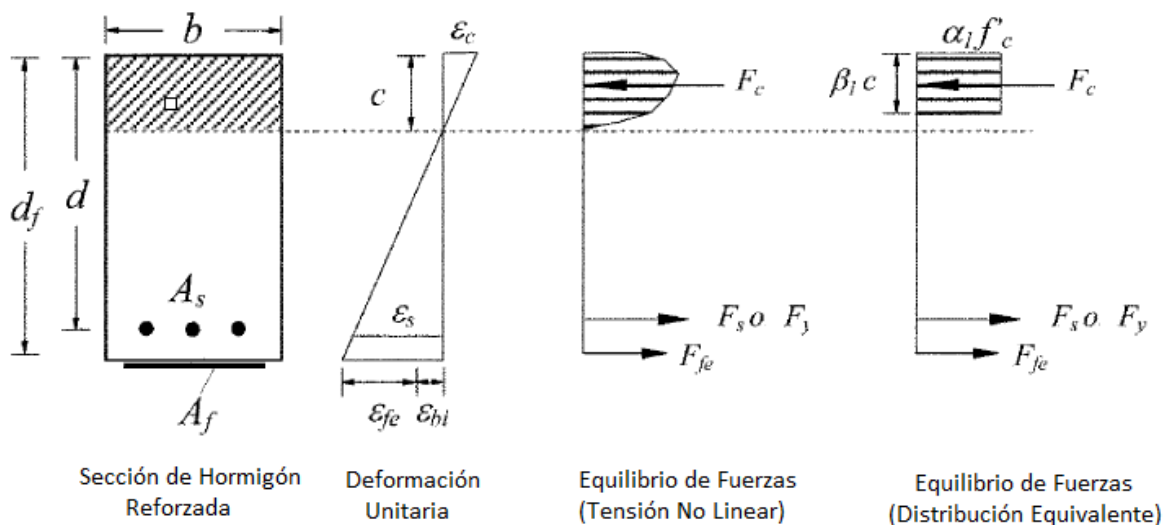


Figura 4.9. Tensión en Hormigón Reforzado sometido a Flexión, a estado último, ACI 440.

La capacidad nominal a flexión reducida, $\Phi_m M_n$, debe ser mayor al momento solicitante, M_u .

$$\Phi_m M_n \geq M_u \quad (4.5.1 - 4)$$

$$M_n = (M_s + M_f) \quad (4.5.1 - 5)$$

$$M_s = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (4.5.1 - 6)$$

$$M_f = n A_f w_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (4.5.1 - 7)$$

Donde:

A_s Sección transversal armadura longitudinal, mm^2 .

A_f	Área de refuerzo FRCM por unidad de ancho, mm^2/mm .
c	Distancia desde el extremo a compresión hasta el eje neutro, mm .
n	Número de capas de fibra de FRCM.
f_s	Tensión en el acero de refuerzo longitudinal, MPa .
f_{fe}	Tensión efectiva en el refuerzo FRCM, MPa .
w_f	Ancho refuerzo FRCM, mm .
β_1	Coefficiente Bloque de Whitney.

Según la compatibilidad de las deformaciones se definen las deformaciones unitarias en el refuerzo, el hormigón y el acero. Específicamente, la deformación máxima del refuerzo estará determinada por la deformación cuando el hormigón se aplaste, el refuerzo deslice o se deslamine, debido a esto la deformación unitaria última se calcula en función de la máxima deformación del hormigón, aun cuando ésta no sea alcanzada por el hormigón.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \frac{(d_f - c)}{c} - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (4.5.1 - 8)$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \frac{c}{(d_f - c)} \quad (4.5.1 - 9)$$

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \frac{(d - c)}{(d_f - c)} \quad (4.5.1 - 10)$$

Donde:

ε_{cu}	Deformación unitaria en el hormigón, mm/mm .
ε_s	Deformación unitaria en el acero de refuerzo longitudinal, mm/mm .
ε_{bi}	Deformación unitaria a tracción existente en el hormigón antes de la instalación del FRCM, mm/mm .
ε_{fe}	Deformación unitaria efectiva en el FRCM en la falla, mm/mm .

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M(d_f - c_{cr})}{I_{cr}E_c} \quad (4.5.1 - 11)$$

Donde:

c_{cr}	Distancia desde el extremo a compresión hasta el eje neutro de la sección fisurada, mm .
E_c	Módulo de elasticidad del hormigón, MPa .
I_{cr}	Momento de inercia fisurado, mm^4 .
M	Momento en la viga debido a las cargas presentes durante la aplicación del refuerzo Nmm .

Considerando la ley constitutiva se definen las tensiones:

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (4.5.1 - 12)$$

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (4.5.1 - 13)$$

Donde:

E_s Módulo de elasticidad del acero de refuerzo longitudinal, *MPa*.

E_f Módulo de elasticidad de tracción del FRM, *MPa*.

f_y Tensión de fluencia del acero, *MPa*.

La posición de la línea neutra se encuentra a partir del equilibrio de fuerzas

$$\sum \text{Fuerzas} = 0 \quad (4.5.1 - 14)$$

$$F_{\text{compresión}} + F_{\text{tracción}} = 0 \quad (4.5.1 - 15)$$

$$\alpha_1 f'_c \beta_1 c b + A_s f_s + A_f n w_f f_{fe} = 0 \quad (4.5.1 - 16)$$

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b} \quad (4.5.1 - 17)$$

$$\beta_1 = \begin{cases} 0.85 & \text{para } f'_c \leq 28 \text{MPa} \\ 0.85 - \frac{0.05}{7} (f'_c - 28) & \text{para } 28 \text{MPa} < f'_c \leq 56 \text{MPa} \\ 0.65 & \text{para } f'_c > 56 \text{MPa} \end{cases} \quad (4.5.1 - 18)$$

$$\alpha_1 = 0.85 \quad (4.5.1 - 19)$$

Se debe escoger un valor para c e iterar hasta que la diferencia entre el valor obtenido y el anterior sea menor, al menos, de 5%.

Se deben considerar las siguientes limitaciones de diseño para el refuerzo FRM:

1. Límite de diseño con respecto a la resistencia original del elemento.

$$M_f \leq 0.5 M_{n_{\text{sin refuerzo}}} \quad (4.5.1 - 20)$$

2. Límite de tensiones de servicio para el acero de refuerzo, f_{ss} .

Para evaluar la capacidad de servicio del elemento, se asumen las propiedades lineales elásticas del material.

$$f_{ss} \leq 0.80 f_y \quad (4.5.1 - 21)$$

$$f_{ss} = \frac{[M_{su} b + \varepsilon_{bi} A_f n w_f E_f (d_f - \frac{c_{crf}}{3})] (d - c_{crf}) E_s}{A_s b E_s (d - \frac{c_{crf}}{3}) (d - c_{crf}) + A_f n w_f E_f (d_f - \frac{c_{crf}}{3}) (d_f - c_{crf})} \quad (4.5.1 - 22)$$

$$c_{crf} = d \left[\sqrt{\left(\frac{\rho_s E_s}{E_c} + \frac{\rho_f E_f}{E_c} \right)^2 + 2 \left(\frac{\rho_s E_s}{E_c} + \frac{\rho_f E_f}{E_c} \left(\frac{d_f}{d} \right) \right)} - \left(\frac{\rho_s E_s}{E_c} + \frac{\rho_f E_f}{E_c} \right) \right] \quad (4.5.1 - 23)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (4.5.1 - 24)$$

$$\rho_s = \frac{A_s}{bd} \quad (4.5.1 - 25)$$

Donde:

- f_{ss} Tensión de tracción en el acero de refuerzo bajo cargas de servicio, *MPa*.
 c_{crf} Distancia desde el extremo a compresión hasta el eje neutro de la sección fisurada, mm.
 M_{su} Momento solicitante, bajo cargas de servicio *Nmm*.

3. Límites de rotura por fluencia y fatiga para el refuerzo bajo condiciones de servicio, f_{fs} , según tipo de fibra utilizada.

$$f_{fs} \leq \begin{cases} 0.20f_{fd} \text{ para fibras de Vidrio} \\ 0.30f_{fd} \text{ para fibras de Aramida} \\ 0.20f_{fd} \text{ para fibras de Basalto} \\ 0.55f_{fd} \text{ para fibras de Carbono} \\ 0.30f_{fd} \text{ para fibras de PBO} \end{cases} \quad (4.5.1 - 26)$$

Donde:

- f_{fd} Tensión de diseño efectiva refuerzo FRCM, $E_f \varepsilon_{fd}$, *MPa*.
 f_{fs} Tensión de tracción en el refuerzo FRCM, bajo cargas de servicio, *MPa*.

4.5.2 Reforzamiento a Corte

El sistema de refuerzo FRCM puede ser utilizado para aumentar la capacidad al corte de elementos existentes de hormigón armado, tales como vigas o columnas, mediante un encamisado parcial o total de éste. Se destaca que el incremento de la capacidad a corte puede evitar la falla frágil por corte, permitiendo el desarrollo de fallas a flexión, que resultan ser más dúctiles.

La deformación unitaria efectiva de diseño alcanzada en el refuerzo FRCM a corte, ε_{fv} , debe estar limitada por la deformación unitaria a tracción última del material, ε_{fu} .

$$\varepsilon_{fv} = \varepsilon_{fu} \leq 0.004 \quad (4.5.2 - 1)$$

La tensión de diseño a tracción alcanzada en el refuerzo FRCM, f_{fv} , se define según la Ley Constitutiva:

$$f_{fv} = E_f \varepsilon_{fv} \quad (4.5.2 - 2)$$

E_f Módulo de elasticidad de tracción del FRCM fisurado, *MPa*.

4.5.2.1 Cálculo de la capacidad nominal a corte con refuerzo FRCM, V_n

La capacidad nominal a corte reducida, $\phi_v V_n$, debe ser mayor al corte solicitante, V_u .

$$\phi_v V_n \geq V_u \quad (4.5.2 - 3)$$

$$\phi_v V_n = \phi_v (V_c + V_s + V_f) \quad (4.5.2 - 4)$$

Donde:

- V_c Capacidad a corte debido al hormigón, *N*.
- V_f Capacidad a corte, debido al refuerzo FRCM, *N*.
- V_n Capacidad nominal a corte, *N*.
- V_s Capacidad a corte, debido al acero de refuerzo, *N*.
- V_u Corte solicitante, *N*.
- ϕ_v Coeficiente de reducción, 0.75.

La capacidad a corte del refuerzo se define:

$$V_f = n \sum_{i=1}^2 A_{fv_i} f_{fv} d_f (\text{sen} \beta_i + \text{cos} \beta_i) \quad (4.5.2 - 5)$$

Donde:

- A_{fv_i} Área de refuerzo FRCM efectiva a corte por unidad de ancho, según la dirección, *mm²/mm*.
- d_f Ver Figura 4.11.
- n Número de capas de fibras.
- β_i Ángulo formado entre la fibra y el eje del elemento, ver Figura 4.10

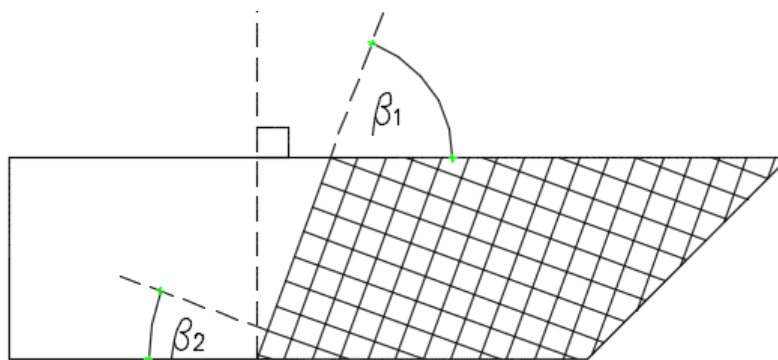


Figura 4.10. Capacidad a Corte FRCM.

Como condición de diseño se debe cumplir la siguiente desigualdad:

$$V_s + V_f \leq 0.66 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (4.5.2 - 6)$$

Donde

b_w Ancho de la sección, *mm*.

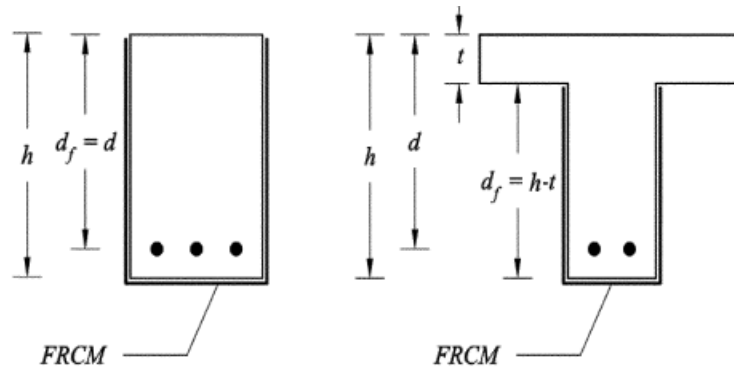


Figura 4.11. Definición de d_f para diferentes secciones.

4.5.3 Reforzamiento Axial

El sistema de refuerzo FRCM puede ser utilizado para aumentar la capacidad a esfuerzo axial y la ductilidad de elementos existentes de hormigón armado sometido a compresión, mediante un encamisado de éste, a modo de proveer confinamiento.

El aumento de capacidad se relaciona directamente con el *peak* de resistencia, no obstante, determinar la efectividad del encamisado en cuanto a aumentar la ductilidad está relacionado con la capacidad del elemento de mantener una estabilidad elástica, sin pérdida de resistencia, lo que requiere estudios más complejos y específicos.

La deformación unitaria efectiva a tracción alcanzada en la falla en el refuerzo FRCM, ε_{fe} , debe estar limitada por la deformación unitaria a tracción de diseño del material, ε_{fd} . Se debe destacar que la resistencia entregada por el mortero de cemento se desprecia.

$$\varepsilon_{fe} \leq \varepsilon_{fd} \leq 0.012 \quad (4.5.3 - 1)$$

Adicionalmente se restringe la deformación última del hormigón confinado en compresión, ε_{ccu} , a 0.01, para prevenir agrietamiento excesivo y pérdida de la integridad del hormigón.

$$\varepsilon_{ccu} \leq 0.01 \quad (4.5.3 - 2)$$

4.5.3.1 Cálculo de la capacidad nominal axial pura con refuerzo FRCM, P_n

La capacidad nominal axial reducida, $\phi_m P_n$, debe ser mayor a la carga axial solicitante, P_u .

$$\phi_m P_n \geq P_u \quad (4.4.3 - 3)$$

$$\phi_m P_n = \phi_m 0.8 [0.85 f'_{cc} b h (1 - \rho_s) + A_s f_y] \quad (4.4.3 - 4)$$

Donde:

- A_s Área del acero longitudinal, mm^2 .
- f'_{cc} Resistencia máxima a compresión del hormigón confinado, MPa .
- f_y Tensión de fluencia del acero de refuerzo, MPa .
- P_n Resistencia a compresión elemento reforzado con FRCM, N .
- P_u Compresión solicitante, N .
- ϕ_m Factor de reducción.
- ρ_s Cuantía de acero longitudinal.

La resistencia a compresión del hormigón confinado, f'_{cc} , se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$f'_{cc} = f'_c + 3.1 k_a f_l \quad (4.5.3 - 5)$$

$$f_l = \begin{cases} \frac{2nA_f E_f \varepsilon_{fe}}{D} & \text{para secciones circulares} \\ \frac{2nA_f E_f \varepsilon_{fe}}{\sqrt{b^2 + h^2}} & \text{para secciones rectangular} \end{cases} \quad (4.5.3 - 6)$$

Donde:

- A_f Área de la malla de refuerzo por unidad de ancho, mm^2/mm .
- b Lado corto de la sección rectangular del elemento a compresión, mm .
- D Diámetro de la sección circular del elemento a compresión, mm .
- E_f Módulo de elasticidad del refuerzo, MPa .
- f_l Presión de confinamiento máxima, debido al refuerzo FRCM, MPa .
- h Lado largo de la sección rectangular del elemento a compresión, mm .
- k_a Factor de eficiencia.
- n Número de capas de malla de refuerzo.
- ε_{fe} Deformación unitaria efectiva a tracción en el refuerzo, mm/mm .

La curva tensión-deformación del hormigón confinado mediante FRCM se define a continuación. En la Figura 4.12 se muestra una curva idealizada del comportamiento del hormigón confinado mediante FRCM.

$$f_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_c} \varepsilon_c^2 & \text{para } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon'_t \\ f'_c + E_2 \varepsilon_c & \text{para } \varepsilon'_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ccu} \end{cases} \quad (4.5.3 - 7)$$

$$\varepsilon'_t = \frac{2f_c}{E_c - E_2} \quad (4.5.3 - 8)$$

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varepsilon_{ccu}} \quad (4.5.3 - 9)$$

Donde:

- E_c Módulo de elasticidad del hormigón, *MPa*.
- E_2 Pendiente de la sección linear del gráfico tensión versus deformación del hormigón confinado mediante FRM, *MPa*.
- f_c Tensión de compresión del hormigón, *MPa*.
- f'_c Resistencia a compresión del hormigón, *MPa*.
- f'_{cc} Resistencia máxima a compresión del hormigón confinado, *MPa*.
- ε_c Deformación unitaria hormigón en compresión, *mm/mm*.
- ε_{ccu} Deformación unitaria última hormigón confinado en compresión, *mm/mm*.
- ε_t Deformación unitaria de transición del gráfico tensión versus deformación del hormigón confinado mediante FRM, *mm/mm*.

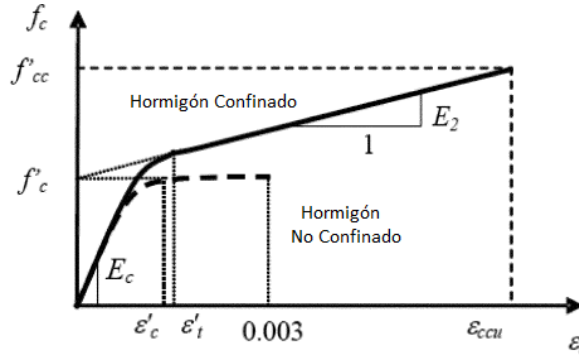


Figura 4.12. Curva Idealizada Tensión-Deformación Hormigón Reforzado mediante FRM.

La deformación última a compresión del hormigón confinado, ε_{ccu} , se define:

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_c \left(1.5 + 1.2k_b \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c} \right)^{0.45} \right) \leq 0.01 \quad (4.5.3 - 10)$$

Donde:

- ε'_c Deformación unitaria hormigón no confinado correspondiente a f'_c en la curva tensión versus deformación, *mm/mm*.
- k_b Factor de eficiencia.

Los factores de eficiencia, k_a , k_b , se definen según la geometría de la sección transversal del elemento:

$$k_a = \begin{cases} 1 & \text{secciones circulares} \\ \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h} \right)^2 & \text{secciones rectangulares} \end{cases} \quad (4.5.3 - 11)$$

$$k_b = \begin{cases} 1 & \text{secciones circulares} \\ \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{h}{b} \right)^2 & \text{secciones rectangulares} \end{cases} \quad (4.5.3 - 12)$$

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \frac{\left[\left(\frac{b}{h}\right)(h - 2r_c)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)(b - 2r_c)^2\right]}{3A_g}}{1 - \rho_g} - \rho_g \quad (4.5.3 - 13)$$

Donde:

- A_c Área de la sección transversal neta del elemento a compresión, mm^2 .
- A_e Área efectiva confinada, mm^2 .
- A_g Área gruesa de la sección transversal del elemento a compresión, mm^2 .
- A_s Área del acero longitudinal, mm^2 .
- ρ_g Cuantía de acero longitudinal.

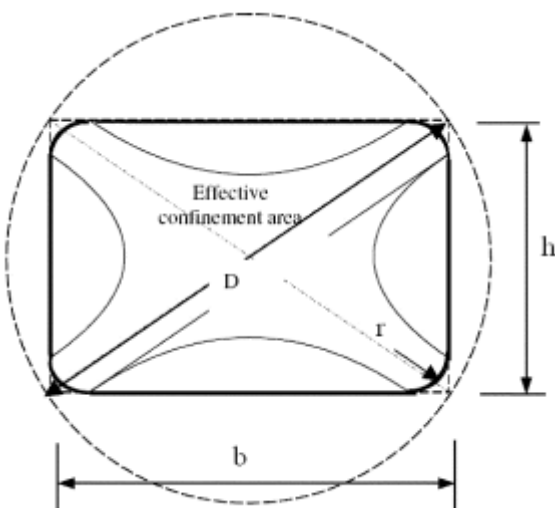


Figura 4.13. Sección Circular Equivalente en Sección Rectangular.

Se deben considerar las siguientes limitaciones de diseño:

1. Límite de diseño con respecto a la resistencia original del elemento.

$$P_f \leq 0.2P_{n \text{ sin refuerzo}} \quad (4.5.3 - 14)$$

2. Cuando se quiere restablecer una resistencia a compresión, ϵ_{ccu} debe estar limitado por el valor correspondiente a $0.85f'_{cc}$.
3. Para columnas con $h/b > 2$ la efectividad del confinamiento estará sujeta a análisis especiales confirmados por ensayos experimentales.
4. El refuerzo debe estar limitado a elementos con secciones transversales de un máximo de 610mm en el lado largo, a no ser que se realicen estudios adicional

5 Resultados Experimentales versus Teóricos

Antes de realizar un diseño de un caso real interesa comparar las expresiones del capítulo anterior, basadas en las disposiciones de la ACI 549 con resultados experimentales de laboratorios obtenidos por diferentes autores, a modo de validar el procedimiento que ésta propone.

Los detalles, resultados y las conclusiones principales de los ensayos utilizados en los *papers* estudiados se encuentran en la revisión bibliográfica (Capítulo 2), mientras que los cálculos realizados para las capacidades teóricas se presentan en el Anexo A.

5.1 Refuerzo a Flexión

Babaeidarabad et al. (2014) realizó ensayos a vigas de hormigón armado reforzadas en la cara a tracción mediante el sistema FRCM, los ensayos se llevaron a cabo hasta la falla por flexión de las probetas. En la Tabla 5-1 se presentan resultados experimentales y los teóricos, obtenidos con las disposiciones del capítulo anterior. En el Anexo A se adjunta el procedimiento de cálculo realizado.

Tabla 5-1. Comparación Resultados Experimentales versus Teóricos, Flexión Viga.

Especimen		Carga máxima [kN]		Factor c/r a carga teórica
		Experimental	Teórica	
Hormigón baja resistencia	L1	677	56.5	1.20
	L4	99.0	80.3	1.23
Hormigón alta resistencia	H1	63.0	56.9	1.11
	H4	96.8	81.0	1.20

Loreto et al. (2014) realizó ensayos en vigas tipo losa de hormigón armado reforzadas en la cara a tracción mediante el sistema FRCM, los ensayos se llevaron a cabo hasta la falla por flexión de las probetas. En la Tabla 5-2 se presentan resultados experimentales y los teóricos, obtenidos con las disposiciones del capítulo anterior. En el Anexo A se adjunta el procedimiento de cálculo realizado.

Tabla 5-2. Comparación Resultados Experimentales versus Teóricos, Flexión Losa.

Especimen		Carga máxima [kN]		Factor c/r a carga teórica
		Experimental	Teórica	
Hormigón baja resistencia	L1	45.0	33.9	1.33
	L4	65.3	44.8	1.46
Hormigón alta resistencia	H1	42.0	32.5	1.29
	H4	65.8	43.7	1.33

Se observa que la norma subestima levemente la capacidad a tracción que es capaz de entregar el refuerzo, siendo mayor en el caso de la sección tipo losas, no obstante esta subestimación es considerada segura y suficientemente cercana al valor experimental, especialmente en las secciones tipo viga.

Es importante destacar que las propiedades mecánicas del refuerzo utilizadas en ambos ensayos fueron obtenidas experimentalmente, según las disposiciones de la AC 434, lo que contribuye a lo acertado de los valores de carga máxima obtenidos, utilizando al módulo de elasticidad fisurado específico para el refuerzo utilizado, en ambos casos, y la deformación última en el caso de la sección tipo losa, no así en el caso de la viga, ya que ésta fue controlada por la deformación efectiva de diseño, lo que sugiere un límite de diseño adecuado para la resistencia nominal a flexión.

Se destaca que los autores del ensayo de sección tipo losa realizaron una comparación con resultados teóricos, según las disposiciones de la ACI 549, llegando a valores sumamente parecidos a los presentados anteriormente.

5.2 Refuerzo a Corte

Triantafillou et al. (2006) realizó ensayos a vigas de hormigón armado con baja resistencia al corte, para estudiar en el sistema de refuerzo FRCM la influencia de la cantidad de capas y de la disposición de las fibras, ya sea de manera vertical o con un ángulo de 10° con respecto a la vertical. Los ensayos se llevaron a cabo hasta la falla de las probetas. En la Tabla 5-3 se presentan los resultados experimentales y los teóricos, obtenidos con las disposiciones del capítulo anterior. En el Anexo A se adjunta el procedimiento de cálculo realizado.

Tabla 5-3. Comparación Resultados Experimentales versus Teóricos, Corte.

Especimen	Capas de fibra	Carga máxima [kN]		Factor c/r a carga teórica
		Experimental	Teórica	
M2	2	243.8	134.9	1.81
M2-s	2- 10°	237.7	141.2	1.68
M1	1	200.1	125.7	1.59

Se observa que la norma subestima notablemente la capacidad a corte que es capaz de entregar el refuerzo. Una causa posible de esta subestimación de capacidad puede estar relacionada con el valor de la deformación que restringe el valor de la deformación efectiva de diseño, el cual al ser muy pequeño limita la tensión que se le asocia a la fibra. En particular en este caso, debido a que no se obtuvieron las propiedades del refuerzo mediante ensayos, se utilizaron las entregadas por el proveedor minoradas por un factor de 0.55, según la AC 434, lo que provocó una disminución considerable en la capacidad de tracción, no obstante, el valor minorado de la deformación seguía siendo mayor al valor efectivo límite de diseño, por lo que éste último controló el diseño.

Los autores del trabajo experimental además definen una metodología de cálculo para la capacidad a corte del refuerzo, la cual coincide con la utilizada por la norma, especificando que los valores para la deformación unitaria efectiva de las fibras es un dato que debe ser obtenido a partir de ensayos.

5.3 Refuerzo Axial

Triantafillou et al. (2006) realizó ensayos a compresión en probetas cilíndricas y rectangulares de hormigón sin armadura, encamisadas mediante el sistema de refuerzo FRCM. Se ensayaron tres series de columnas, A, B y C, en este caso, se comparan los resultados obtenidos para la serie A y C, probetas cilíndricas y rectangulares respectivamente. Los ensayos se llevaron a cabo hasta la falla de las probetas. En la Tabla 5-4 se presentan resultados experimentales y teóricos, obtenidos con las disposiciones del capítulo anterior. En el Anexo A se adjunta el procedimiento de cálculo realizado.

Tabla 5-4. Comparación Resultados Experimentales versus Teóricos, Axial.

Especímen	Capas de fibra	Tensión de Compresión $f'_c [MPa]$		Deformación unitaria última %		Factor c/r a carga teórica
		Experimental	Teórica	Experimental	Teórica	
A Circular	2	23.3	19.6	1.08	0.59	1.19
	3	27.0	22.9	1.22	0.82	1.18
C Cuadrada	2	20.0	13.5	1.18	0.22	1.48
	4	21.6	14.8	1.76	0.32	1.46

Se observa que la norma subestima la capacidad a esfuerzo axial que es capaz de entregar el refuerzo, en casi un 20% en el caso de la secciones circulares y en alrededor de un 50% en las cuadradas. Esto puede estar relacionado con los factores de eficiencia, que vienen determinados por la forma de la sección del elemento, estos factores son iguales a 1 en el caso de las circulares, mientras que en el de las rectangulares son menores a uno, siendo en este caso en particular menos de la mitad. Estos dos factores afectan tanto a la tensión como a la deformación última, valores que son menores que los experimentales.

Se debe destacar que, al igual que en el caso del esfuerzo de corte, no se realizaron ensayos para obtener las propiedades mecánicas del refuerzo, por lo que para el cálculo se utilizaron las entregadas por el proveedor. Al igual que en el caso anterior, la deformación última se minoró con un factor de 0.55, pero en este caso, al contrario que el anterior, la deformación efectiva de diseño no controló el diseño, lo que se tradujo en valores bastantes más cercanos a los experimentales, que en el caso a corte.

6 Conclusiones

A partir de la bibliografía analizada se puede concluir que el sistema de refuerzo FRCM es un método efectivo para incrementar la capacidad portante de estructuras de hormigón armado, ya sea para su rehabilitación por daños o deterioros o para elevar el nivel de seguridad existente. El sistema cuenta con ventajas importantes con respecto al sistema alternativo de refuerzo FRP, que a diferencia del FRCM, utiliza como matriz y adhesivo del refuerzo de fibras productos orgánicos. Las ventajas se deben principalmente a que la matriz inorgánica que adhiere y aglomera al refuerzo de fibras posee características compatibles con el sustrato de hormigón. No obstante, la limitación del sistema de refuerzo también es consecuencia de la matriz, debido a que ésta no posee una buena capacidad para impregnar las fibras individuales de las mallas. Esto significa que la efectividad del sistema refuerzo FRCM, al ser un material compuesto por las mallas de fibras y la matriz cementícea, no depende sólo de las propiedades de los materiales que lo constituyen, sino de la unión entre la malla y la matriz, por lo tanto la eficacia de la matriz para impregnar y mojar las fibras determina la resistencia del refuerzo, debido a que, en general, y el mecanismo de falla viene dado por el deslizamiento de las fibras con respecto a la matriz. En caso de que el deslizamiento sea severo la falla puede ser ocasionada por la deslaminación del refuerzo.

Debido a lo anterior definir con seguridad las propiedades mecánicas del material compuesto es primordial para el correcto diseño y desempeño del refuerzo. Para esto se recurre a la evaluación del comportamiento mecánico mediante un ensayo a tracción, según las especificaciones de la AC 434, reproduciendo de manera fiel las condiciones de trabajo del refuerzo y el ambiente al que se verá sometido. Además, es importante que en el ensayo el sistema de agarre del espécimen transmita los esfuerzos en forma axial, en el mismo sentido en que trabajará el refuerzo, ya que si se introduce momento para efecto de empotramiento en los extremos del refuerzo, se altera la capacidad real, que puede incluso alcanzar la capacidad máxima de la fibra, la cual es mucho mayor a la del compuesto FRCM aplicado. Por otro lado, si la carga se transmite de manera axial se le permite a la muestra el deslizamiento de las fibras con respecto a la matriz, lo que se asemeja al comportamiento del refuerzo instalado y no sobrestima su capacidad.

En relación al número de capas de refuerzo se debe destacar que su determinación no está definida exclusivamente por el incremento de capacidad que se quiera alcanzar. Esto debido a que con el número de capas aplicadas aumenta también la ductilidad del elemento, permitiendo mayores deformaciones e incluso llegando a transformar fallas frágiles por corte, a fallas por flexión. Es importante destacar que la aplicación del refuerzo afecta la ductilidad original de los elementos estructurales de hormigón armado, por lo que la incorporación de un sistema multicapa de refuerzo puede ser importante, en especial en elementos que se hayan

diseñado para trabajar sísmicamente, permitiéndole mayores deformaciones manteniendo su resistencia.

Con respecto a los cálculos realizados en vigas y columnas, reforzados con el sistema FRCM para incrementar la capacidad a esfuerzo de corte, flexión y axial, se observa una buena correlación entre los valores de capacidad última y los correspondientes a la falla, lo que corrobora que la guía de diseño utilizada, ACI 549, entrega criterios de diseño adecuados para este tipo de refuerzos. Como se mencionó anteriormente, la correcta definición de las propiedades mecánicas del sistema de refuerzo a utilizar es fundamental para que el diseño, sin embargo los valores definidos por la norma para la deformación efectiva de diseño del refuerzo, para las diferentes solicitaciones, restringe la capacidad máxima que éste puede alcanzar y genera por sí sola un límite de diseño que contribuye a la seguridad. A partir de los cálculos se observó que éstos llevan la capacidad a valores conservadores, entre un 18% y un 81% por debajo de la tensión de falla observada experimentalmente.

De todo lo anterior se puede concluir que el sistema de refuerzo FRCM provee una solución válida para la reparación y rehabilitación de elementos de hormigón armado, debido a las favorables características que posee. En efecto, con respecto a las soluciones de reparación convencionales este método casi no interviene en la arquitectura original de los elementos y posee una muy favorable relación capacidad peso. No obstante, es importante realizar mayores investigaciones para el desarrollo de una matriz cementícea que logre impregnar mejor los haces de fibras, de manera que se reduzca el deslizamiento de la fibra con respecto a la matriz y se mejore el comportamiento general del refuerzo, favoreciendo un tipo de falla más dúctil y disminuyendo el riesgo de falla por deslaminación.

7 Aplicación del Sistema de Refuerzo FRCM a la Reparación de Chimenea de Hormigón Armado con Deterioro Estructural

Diseño Refuerzo FRCM Chimenea

A modo de ejemplo se realiza la verificación del diseño de un refuerzo FRCM para la chimenea N° 1, de hormigón armado, perteneciente a la Central Termoeléctrica Ventanas, de AES Gener, mediante mallas de fibra de carbono embebida en matriz cementícea, propuesto por *D&T Hormigones Ltda. y Asociados*, como solución para reparar el deterioro por agrietamiento y deslaminación existente en el plano de la armadura. La finalidad de esta chimenea es la extracción de gases calientes, de hasta 132°C, producto de la combustión de carbón. Esta chimenea presenta daño en el manto exterior de hormigón y corrosión de leve a moderada de la armadura. A pesar de que la estructura no ha sufrido daños adicionales con los sismos de los últimos años, lo que permite inferir que posee capacidad suficiente para resistir acciones estáticas y dinámicas, se busca prevenir cualquier efecto adverso que pueda estar ocasionado por su deterioro progresivo.

La verificación estructural de la chimenea se realiza con el manual de diseño ACI 307, “Code Requirements for Reinforced Concrete Chimneys”, mientras que el diseño del refuerzo con el ACI 549, en el cual se basa la metodología del Capítulo 4.

7.1 Descripción del Estado de la Estructura

La chimenea en estudio consiste en una estructura en forma troncocónica hueca de hormigón armado, construida en el año 1964, la cual alcanza una altura total de 60.96m, con diámetro exterior en la base de 7.62m y 4.56m en el extremo superior, con espesor de la pared variable de 30.48 a 15.2cm. La estructura posee dos plataformas metálicas a 34 y 55m de altura, para monitoreo e inspección, las que se encuentran ancladas a la pared. En la Tabla 7-1 se muestran las dimensiones de la chimenea, donde z corresponde a la altura de cada sección, D al diámetro exterior y e al espesor.

Tabla 7-1. Características Geométricas de la Estructura.

Sección	z [m]	D [cm]	e [cm]
0	0.00	762.00	27.94
1	1.14	756.29	28.26
2	2.29	750.57	28.58
3	3.43	744.86	28.89
4	4.57	739.14	29.21
5	5.72	733.43	29.53
6	6.86	727.71	29.85
7	8.00	722.00	30.48
8	9.15	716.28	30.48
9	10.29	710.57	30.48
10	11.43	704.85	30.48
11	12.58	699.14	30.48

12	13.72	693.42	30.48
13	14.86	687.71	30.48
14	16.01	681.99	30.48
15	17.15	676.28	28.42
16	18.29	670.56	26.35
17	19.43	664.84	25.56
18	20.58	659.13	24.77
19	21.72	653.41	23.98
20	22.86	647.70	23.18
21	24.01	641.98	22.55
22	25.15	636.27	21.91
23	26.29	630.55	21.12
24	27.44	624.84	20.32
25	28.58	619.12	19.85
26	29.72	613.41	19.37
27	30.86	607.69	19.05
28	32.01	601.98	18.73
29	33.15	596.26	18.26
30	34.29	590.55	17.78
31	35.44	584.83	17.31
32	36.58	579.12	16.83
33	37.72	573.40	16.51
34	38.86	567.69	16.19
35	40.01	561.97	15.72
36	41.15	556.26	15.24
37	42.29	550.54	15.24
38	43.44	544.83	15.24
39	44.58	539.11	15.24
40	45.72	533.40	15.24
41	46.86	527.68	15.24
42	48.01	521.97	15.24
43	49.15	516.25	15.24
44	50.29	510.54	15.24
45	51.44	504.82	15.24
46	52.58	499.11	15.24
47	53.72	493.39	15.24
48	54.86	487.68	15.24
49	56.01	481.96	15.24
50	57.15	476.25	15.24
51	58.29	470.53	15.24
52	59.44	464.82	15.24
53	60.20	460.25	15.24
54	60.96	455.68	15.24

A partir de ensayos realizados por IDIEM en el año 2007, se definen las propiedades de los materiales constitutivos, hormigón H35, según NCh 170, y acero, tanto longitudinal como transversal, A440-280H.

Resistencia hormigón H35: $f'_c = 31MPa$

Tensión de fluencia acero A440-280H: $f_y = 280MPa$

De acuerdo a la información obtenida de los planos estructurales originales de la chimenea, la armadura a flexión se ubica en la dirección longitudinal, centrada en el manto de hormigón. En la Tabla 7-2 se presenta la información correspondiente en función de la altura. Se debe destacar que, de acuerdo a la práctica, en algunas secciones se ponen dos diámetros de fierros distintos alternados para optimizar el uso del acero.

La armadura a corte se distribuye en la dirección transversal formando una malla ortogonal con la armadura longitudinal, el ACI 318 indica que en el caso de una sección circular se debe considerar como armadura al corte el doble del área de la barra del estribo. En la Tabla 7-3 se presenta la armadura a corte en función de la altura de la chimenea.

Tabla 7-2. Armadura Vertical.

Armadura Vertical (Longitudinal)									
Sección n	z [m]	Fierros alternados						As [cm ²]	Cuantía %
		#	∅ [mm]	Cantidad	#	∅ [mm]	Cantidad		
Base	0	8	25.40	67	8	25.40	67	679.0	1.05
10	11.43	9	28.58	58	9	28.58	58	743.9	1.16
20	22.86	6	19.05	58	6	19.05	58	330.6	0.73
30	34.29	7	22.23	58	7	22.23	58	450.0	1.41
40	45.72	6	19.05	57	7	22.23	58	387.5	1.56
50	57.15	5	15.88	40	4	12.70	35	123.5	0.56

Tabla 7-3. Armadura Transversal.

Armadura Transversal (Estribos)						
Sección	z [m]	#	∅ [mm]	S [cm]	A _{sv} [cm ²]	h [e] [cm]
base	0	4	12.70	15.24	16.62	27.94
10	11.43	4	12.70	15.24	16.62	30.28
20	22.86	4	12.70	15.24	16.62	23.18
30	34.29	3	9.53	15.24	9.35	17.78
40	45.72	3	9.53	15.24	9.35	15.24
50	57.15	3	9.53	15.24	9.35	15.24

Para determinar los esfuerzos a los que se encuentra sometida la chimenea se realiza un modelo en el software de elementos finitos SAP2000. En la Figura 7.1 se adjunta imagen del modelo estructural realizado y de la estructura real.

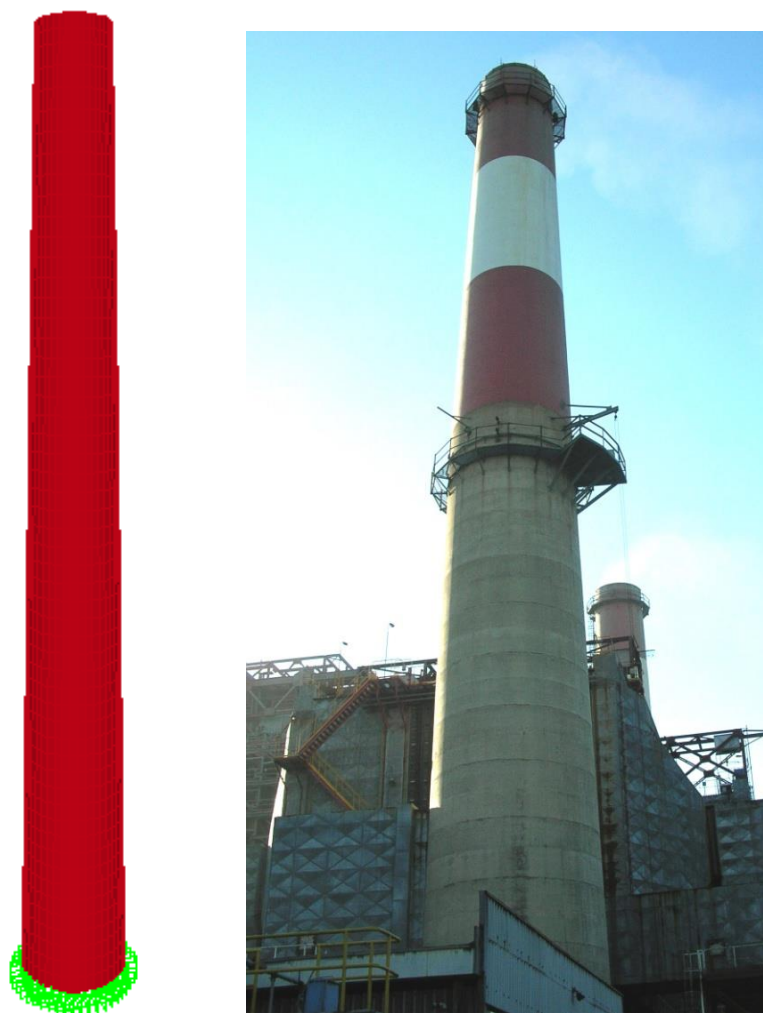


Figura 7.1. Modelación, SAP2000 (izquierda. Chimenea Real (derecha)

7.1.1 Descripción Daño

En el año 2005 AES Gener realizó una inspección a las chimeneas de las unidades N° 1 y 2, a partir de la cual se concluyó que la unidad N° 1 presentaba un estado de agrietamiento avanzado, con pérdida de alcalinidad en el espesor de la pared de hormigón y alta concentración de iones cloruro. Debido a esto la empresa solicitó a IDIEM la realización de un estudio que permitiera determinar el estado de deterioro de la chimenea.

A continuación se detallan las principales conclusiones obtenidas del estudio en terreno realizado por IDIEM en el año 2007.

7.1.1.1 Daño presente en el hormigón

La pared de hormigón se encuentra afectada por la existencia de grietas, fisuras y deslaminación del recubrimiento, que afecta principalmente al sector del tercio central de la estructura de hormigón armado.

Las principales conclusiones con respecto al daño presente en el hormigón son las siguientes:

- El hormigón presenta un nivel de fisuración en todo el manto, con patrón reticulado. En general las fisuras no penetran más allá del nivel de la armadura, alrededor de 10cm, no obstante se encontraron grietas verticales mayores que alcanzan hasta 16cm de profundidad. Se determinó que éstas estarían asociadas a las sollicitaciones por gradiente térmico y a corrosión de la armadura
- Las grietas verticales son de anchos que alcanzan hasta 20 mm en la zona que rodea la primera plataforma, a unos 22 a 34m. de altura estas fisuras tienen su origen en la corrosión de la armadura de refuerzo.
- Se observa, además, que el hormigón presenta deslaminación a nivel de la armadura, en la zona que rodea la primera plataforma, a unos 32m, y en otras zonas de la chimenea, generalmente cercanas a la escalera, que está asociada a la corrosión de la armadura y, probablemente, al anclado de la plataforma y la escalera al manto. Se destaca que la deslaminación implica una pérdida de continuidad de la sección de hormigón que se desarrolla por sobre las barras longitudinales de la armadura, lo que puede provocar desadherencia y desprendimiento del recubrimiento.
- Las juntas transversales de construcción presentan discontinuidades del manto de hormigón.

7.1.1.2 Daño presente en el acero de refuerzo

El daño en el acero no es generalizado, y está determinado principalmente por la corrosión originado por la presencia de carbonatación e iones de cloruro en el hormigón. Con respecto a esto el informe de IDIEM indica que:

- El hormigón se encuentra carbonatado en toda su altura y espesor, a excepción de algunas zonas a media altura. La carbonatación del hormigón se provoca por la presencia de humedad en los poros del hormigón, con la entrada de dióxido de carbono, convirtiendo la cal apagada del cemento en carbonato de calcio, lo que conlleva una disminución en el pH del hormigón, llegando a pH 10-11, lo que, en presencia de humedad y oxígeno, reduce la capacidad del hormigón de proteger la armadura contra la corrosión.
- El contenido de cloruros no supera el límite indicado por la norma, pero aun así se observaron niveles altos de este agente agresivo. Una alta cantidad de cloruros puede

ser inofensivo para el acero cuando el hormigón posee un pH alcalino, de 12-13, pero cuando éste disminuye su pH, como en este caso, incluso una baja cantidad de cloruros puede destruir la capa de óxido pasivo que existe sobre la armadura como protección.

- Los ensayos de potencial de corrosión indicaron que actualmente existe una baja probabilidad de corrosión, lo mismo que los ensayos de resistividad eléctrica. Lo que se atribuye a una baja humedad y oxígeno en el hormigón. No obstante, por el nivel de corrosión observado en la armadura, esta ausencia de humedad y oxígeno se puede atribuir a una condición estacional que varía a lo largo del año.

7.1.2 Descripción Metodología de Reparación.

El proyecto de refuerzo de la chimenea considera la realización de una consolidación del manto de hormigón, que presenta deslaminación entre la capa interna, que contiene el acero de refuerzo y la capa externa de recubrimiento. El fin de consolidar las capas es restituir la condición inicial de la sección de hormigón armado, para que se comporte monolíticamente.

Para consolidar la chimenea se propone confinar la chimenea mediante material compuesto FRCM, con fibras de carbono, en los sectores que presenten grietas y/o deslaminación. Antes de confinar se dejarán uniformemente distribuidas boquillas que conecten el exterior con la zona deslaminada. A través de estas boquillas, una vez encamisada la chimenea mediante FRCM se inyectará un *grout* cementíceo, para restituir la continuidad y monolitismo del manto de hormigón. El *grout* se inyectará con una presión de aproximadamente 1kgf/cm^2 , conforme a las recomendaciones, para evitar generar presión excesiva, que puede provocar que el hormigón deslaminado se desprenda, pero para asegurar que llegue a todos los espacios. El tipo de *grout* especificado es un mortero de cemento de baja viscosidad, lo que lo hace un candidato ideal para que fluya en espacios reducidos, como es la zona deslaminada, restituyendo el monolitismo de la sección.

La distribución y cuantía del refuerzo especificado es de una capa desde la base a los 30m y dos de los 30 a 45m de altura.

7.1.2.1 Descripción Material de Refuerzo FRCM

El refuerzo propuesto corresponde al sistema FRCM, que contempla mallas de fibras de carbono, embebidas en una matriz cementícea. En la Tabla 7-4 se adjuntan las propiedades mecánicas de ambos materiales entregadas por el proveedor.

Tabla 7-4. Propiedades FRCM Chimenea (Datos del proveedor)

Propiedades Malla de Fibra de Carbono		
Módulo Elástico	[GPa]	240
Resistencia a la Rotura	[MPa]	>4.500
Deformación	[mm/mm]	>1.5%
Área por unidad de ancho	[mm ² /mm]	47
Masa	[g/m ²]	170
Propiedades Mortero Cementíceo		
Resistencia a Compresión	[MPa]	>50
Resistencia a Flexión	[MPa]	>7
Módulo Elástico	[MPa]	>26.000
Densidad	[g/cm ³]	2.05

No obstante, para los cálculos se utilizarán las propiedades del material compuesto, obtenidos por Pablo Sandoval (2014), en un trabajo realizado en el IDIEM, utilizando los mismos materiales que se especifican para el refuerzo estructural de la chimenea en estudio, los resultados del ensayo a tracción se presentan en el Gráfico 7-1 y Tabla 7-5, donde se entregan los valores de resistencia y deformación medidas, considerando que el ancho del espécimen ensayado es 5cm y el área por unidad de ancho de la fibra 47mm²/m. En este ensayo se utilizó la configuración de agarre tipo horquilla, que sugiere Arboleda (2014) como representativa de las condiciones reales de un refuerzo, al transferir la carga de manera axial al espécimen ensayado.

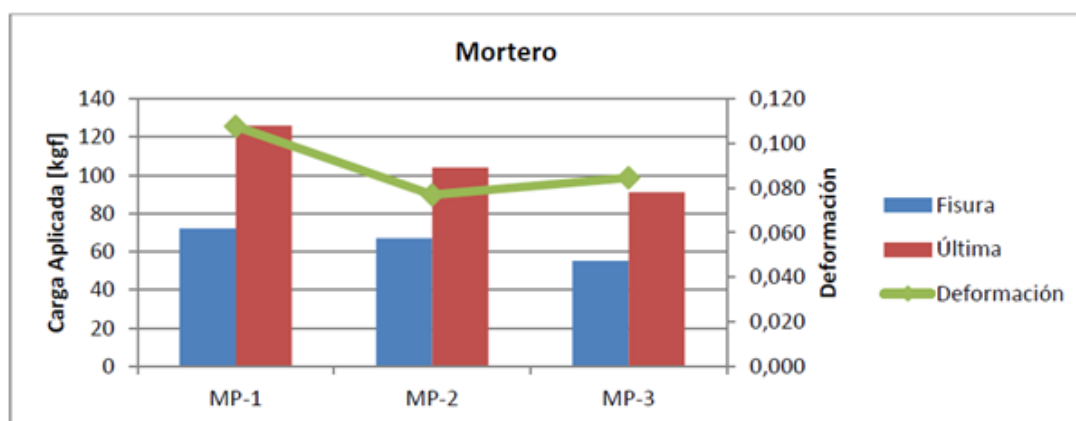


Gráfico 7-1. Carga Máxima- Deformación Mortero, Sandoval (2014).

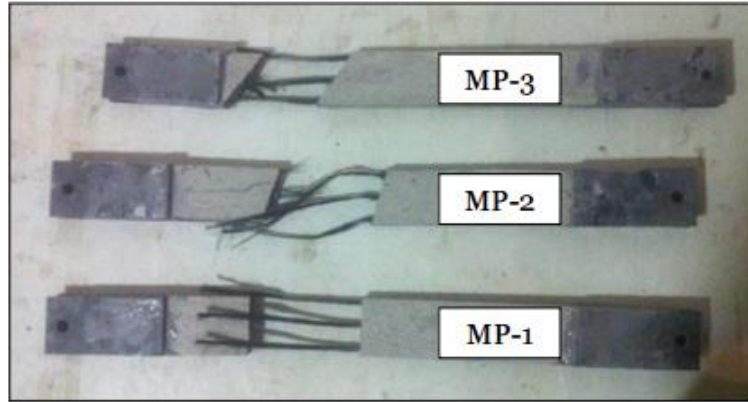


Figura 7.2. Especímenes Ensayados a Tracción, Sandoval (2014).

Tabla 7-5. Datos Ensayo a Tracción FRCM, Sandoval (2014).

	Promedio
Tensión Máxima Última [MPa]	445.1
Tensión Máxima Fisuración [MPa]	271.3
Deformación Unitaria Última [mm/mm]	0.091

Se debe destacar que estos datos no son suficientes para obtener las propiedades mecánicas del FRCM, ya que no se tiene el valor de la deformación unitaria al momento de la fisuración, debido a que la máquina utilizada en el ensayo sólo registraba la carga última y de fisuración y la deformación final.

Debido a lo anterior se procedió a estimar la carga de fisuración, considerando que la primera parte de la curva tensión deformación depende primordialmente de la capacidad de la matriz de resistir la tracción sin fisurarse, se asume, a modo conservador, que su pendiente es igual al módulo de elástico de la matriz cementícea. Con la pendiente de la primera parte de la curva y la tensión de fisuración, se calcula la deformación de fisuración, que es un punto común para las curvas del espécimen no fisurado y fisurado, obteniéndose la siguiente curva tensión-deformación (Gráfico 7-2):

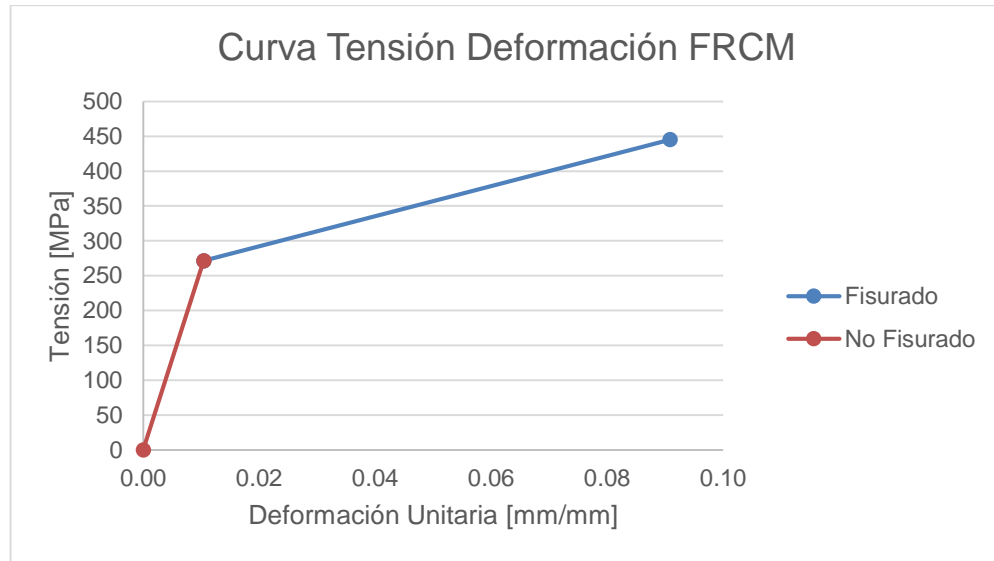


Gráfico 7-2. Curva Tensión-Deformación FRCM.

Finalmente, con la pendiente de la parte fisurada de la curva se obtiene el módulo de elasticidad fisurado del espécimen, y en función de él y de la tensión última se calcula la deformación unitaria última que se utilizará para el diseño, según las disposiciones presentadas en el Capítulo 4.1.

En la Tabla 7-6 se presentan las propiedades mecánicas del refuerzo, utilizadas para su diseño.

Tabla 7-6. Propiedades Mecánicas FRCM.

Propiedades Refuerzo FRCM, con Fibra de Carbono				STD
Módulo Elástico Fisurado:	[MPa]	E_f	2162.7	
Tensión de Fisuración:	[MPa]	f_{ft}	271.3	31.3
Tensión Última:	[MPa]	f_{fu}	445.1	73.3
Deformación de Fisuración:	[mm/mm]	ϵ_{ft}	0.0104	
Deformación Última:	[mm/mm]	ϵ_{fu}	0.091	0.015
Área Fibra por unidad de ancho:	[mm ² /mm]	A_f	47	

7.2 Combinaciones de Cargas

A partir de las disposiciones del ACI 307, específico para el diseño de chimeneas, y de la NCh 3171, norma chilena de diseño estructural, se definen las principales combinaciones de carga para la verificación de la capacidad vertical de la chimenea, las que se encuentran en concordancia con las que establece la norma de diseño ACI 549.

$$U_v = 1.4D \quad (6.2 - 1)$$

$$U_v = 0.9D + 1.2T + 1.6W_{along} \quad (6.2 - 2)$$

$$U_v = 1.2D + 1.2T + 1.6W_{along} \quad (6.2 - 3)$$

$$U_v = 0.9D + 1.2T + 1.4W_{comb\ along+across} \quad (6.2 - 4)$$

$$U_v = 1.2D + 1.2T + 1.4W_{comb\ along+across} \quad (6.2 - 5)$$

$$U_v = 0.9D + 1.2T \pm 1.0E \quad (6.2 - 6)$$

$$U_v = 1.2D + 1.2T \pm 1.0E \quad (6.2 - 7)$$

$$U_v = 0.9D \pm 1.4E \quad (6.2 - 8)$$

$$U_v = 1.2D \pm 1.4E \quad (6.2 - 9)$$

Donde:

U_v Capacidad vertical.

D Carga muerta.

T Efecto temperatura normal.

E Carga Sísmica.

W_{along} Carga de viento en la dirección longitudinal (*along-wind*).

$W_{comb\ along+across}$ Carga de viento combinada en la dirección longitudinal y transversal (*along-wind+across wind*).

La capacidad circunferencial es específica para el cálculo de chimeneas y debe ser tal de resistir los efectos producto del viento y del gradiente de temperatura. Debido a esto se considera sólo la combinación proveniente de la ACI 307.

$$U_c = 1.2T + 1.4W \quad (6.2 - 10)$$

Donde:

U_c Capacidad circunferencial.

7.3 Cargas y Esfuerzos

A continuación se presentan las cargas y esfuerzos aplicados a la chimenea, según las combinaciones de carga antes señaladas.

7.3.1 Carga: Peso Muerto (D)

El peso muerto presente en la chimenea proviene del hormigón armado que constituye la chimenea y de un *liner* de aislación térmica, que consiste en una capa de mortero de cemento (*shotcrete*) con una malla de acero de refuerzo de espesor 7.5 o 10cm según la altura.

El peso propio del hormigón lo calcula el programa, considerando la densidad del hormigón igual a 2.5tonf/m³. Por otro lado, la carga debido al *liner* de aislación se aplica directamente al manto, como carga por unidad de área en dirección de la gravedad, en función del espesor según la altura, considerando la densidad igual a 2.4tonf/m³.

Adicionalmente, para la verificación de la chimenea reforzada, se debe tener en consideración el peso debido al refuerzo FRCM, en función de la cantidad de capas, considerando un espesor de la matriz de 1.2cm sobre el sustrato, entre capas de fibras y como recubrimiento, con una densidad de 2.05tonf/ m³.

7.3.2 Carga: Sismo (E)

La carga sísmica se obtiene a partir de un análisis modal espectral, del cual se obtiene el espectro de diseño sísmico. Generalmente para instalaciones industriales se utilizan la norma chilena NCh 2369, específica para el diseño sísmico de este tipo de estructuras. No obstante, esta norma no aplica para centrales de energía eléctrica, como es la central a la que pertenece la chimenea. Debido a lo anterior se utiliza el espectro de diseño entregado en las bases de diseño de la chimenea, el cual fue obtenido a partir de un estudio de terreno. Se destaca que este espectro de diseño utiliza las mismas variables definidas por la NCh 2369.

A modo de comparación en el Gráfico 7-3 se presenta el espectro de la NCh 2369 y el obtenido a partir de las bases de diseño, se adjuntan los valores utilizados para su cálculo.

Clasificación estructura:	$C1$	
Coefficiente de importancia:	I	1.2
Aceleración efectiva máxima suelo [g]:	A_o (Zona 3)	0.4
Parámetro según tipo de suelo:	T' (Suelo II)	0.35
Parámetro según tipo de suelo:	n (Suelo II)	1.33
Razón de amortiguamiento:	ξ	0.05
Factor de modificación de la respuesta:	R	3
Máximo coeficiente sísmico	C_{max}	0.28
Aceleración máxima [g]:	$S_{a_{max}}$	0.336

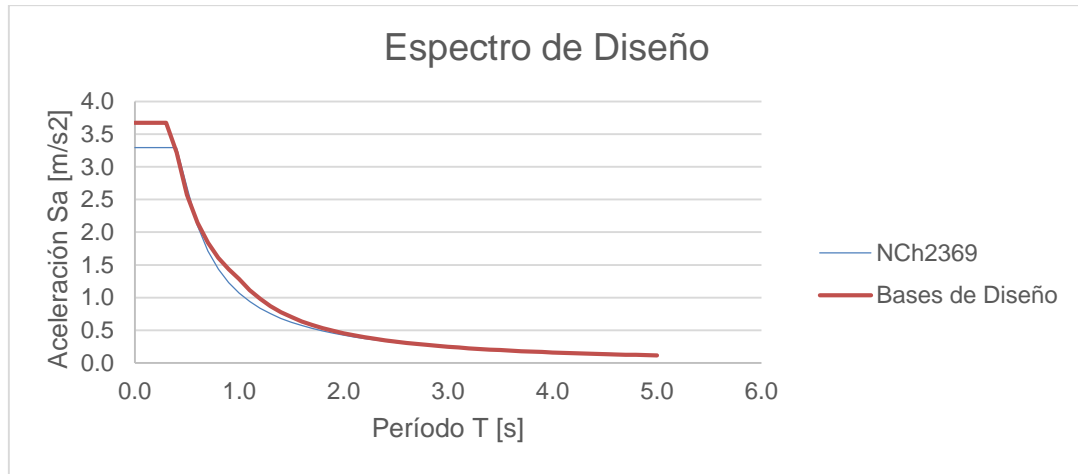


Gráfico 7-3. Espectro de Diseño NCh2369 (azul), Bases de Diseño (burdeo).

A partir del Gráfico 7-3 se observa que el espectro de la NCh 2369 es más conservador que el obtenido de las bases de diseño, por lo que la utilización de éste último conlleva mayores solicitaciones y permite un diseño más seguro.

7.3.3 Carga: Viento (W)

Para la definición de las cargas de vientos se utiliza la norma ACI 307, código específico para chimeneas, éste considera los efectos debido al viento en la dirección longitudinal (*along-wind*), a los efectos dinámicos debido a posibles vórtices en la dirección transversal (*across-wind*) y a la distribución de presiones circunferenciales.

En el Anexo B se adjunta el cálculo realizado para la obtención de la carga distribuida producto del viento utilizada en el diseño.

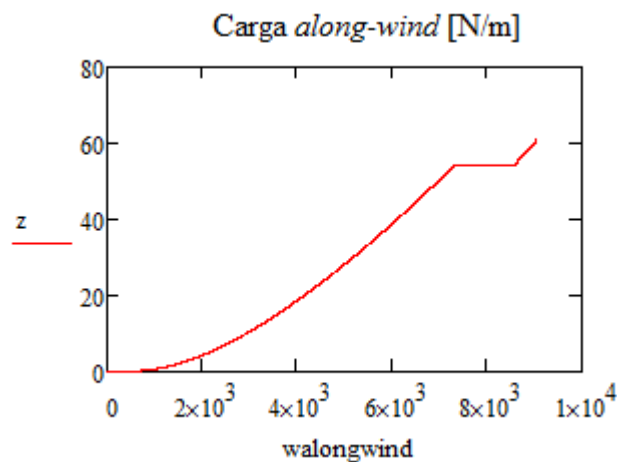


Gráfico 7-4. Carga Distribuida de Viento según altura.

7.3.4 Esfuerzo Térmico (T), Temperatura

La temperatura (T), que se incluye en las combinaciones de cargas, según la ACI 307, no es una carga en sí misma, sino un efecto sobre la chimenea, definido como una modificación de las resistencia de sus materiales constituyentes, que corresponde a una disminución de la resistencia a compresión en del hormigón y de la fluencia del acero. Esto se debe a que, debido a la temperatura interior, esa porción del manto tiende a dilatarse, pero el manto exterior no se lo permite, lo que genera esfuerzos de compresión en la cara interior y de tracción en la exterior.

Los valores modificados de las resistencias se calculan en función de la altura, diámetro, cuantía de acero y del gradiente de temperatura entre el exterior y el interior del manto. En el Anexo B se presenta el cálculo realizado para la obtención de las resistencias modificadas debido a la temperatura.

Adicionalmente, la disminución de las capacidades de los materiales dependen del tipo flexión estudiada, ya sea el momento nominal de la sección anular, donde se toma toda la sección para el cálculo de la capacidad de la estructura, o el momento circunferencial, producido en el manto de la chimenea, donde la compresión se localiza en la cara interior, en este caso se considera como una viga de ancho igual espesor del manto y altura 1m.

En la Tabla 7-7 se muestran los valores de temperatura medidos a nivel de la base para distintas profundidades. A partir de ellos, suponiendo una variación homogénea de la temperatura y de manera conservadora, se obtiene un gradiente térmico de 15°C.

Tabla 7-7. Mediciones Temperatura, informe IDIEM.

Altura [m]	Profundidad 5 cm [° C]	Profundidad 10 cm [° C]	Profundidad 20 cm [° C]
1.2	45.8	51.3	52.8
1.2	49.1	53	54.8

Adicionalmente se cuenta con análisis termográfico (Figura 7.3) del manto exterior de la Chimenea N°2, perteneciente a la misma central, del sector con menores temperaturas, y por lo tanto mayor gradiente. Debido a que la Chimenea N° 1 posee características similares, se puede considerar como un dato certero. Debido a que los gases tienen una temperatura máxima de 132°C, y que la temperatura varía de manera homogénea en todo el espesor, se obtiene un gradiente térmico en el hormigón de 72.4°C. Debido a que se trata de un *liner* de aislación térmica su capacidad de transmitir calor debería ser menor al del hormigón, por lo que considerar que la temperatura varía de manera lineal es conservador.

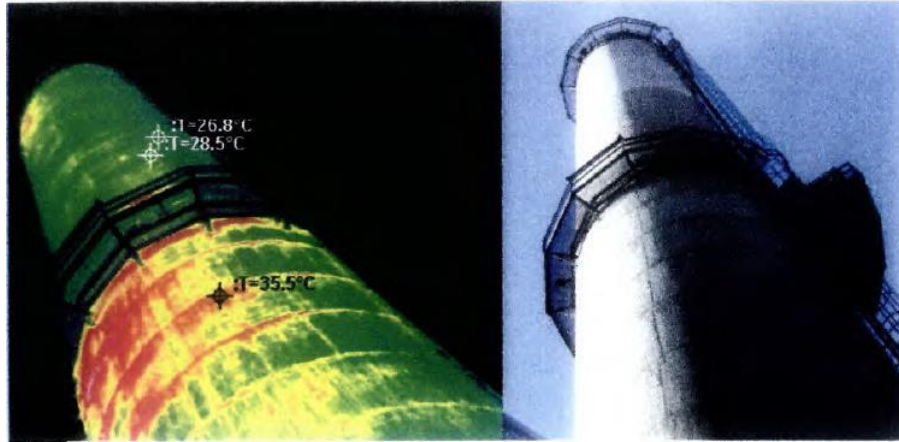


Figura 7.3. Imagen Termográfica Chimenea N° 2, informe IDIEM.

A modo conservador, para el cálculo de los valores de resistencia modificados por efecto de la temperatura se utiliza el mayor de los gradientes antes calculados, $T_x = 72.4^\circ\text{C}$.

Finalmente, debido a que la disminución de las resistencias depende del diámetro, el espesor y la cuantía de acero longitudinal o transversal de la sección, éstas se calculan según la altura, y se escoge el menor valor de resistencia del hormigón y del acero de todas las secciones. Estos valores se presentan en la Tabla 7-8.

Tabla 7-8. Resistencia Hormigón y Acero, Efecto Temperatura.

	Resistencia a Compresión f'_c [MPa]	Tensión de Fluencia f_y [MPa]
Momento Longitudinal	22.8	207.7
Momento Circunferencial	26.1	199.0

7.4 Capacidad Nominal

El cálculo de la capacidad nominal de la chimenea se realiza mediante el método de resistencia, según las disposiciones del ACI 307, manual de diseño estadounidense específico para chimeneas pertenecientes a centrales termoeléctricas, las cuales son derivadas de la ACI 318, a excepción de la deformación unitaria de la fibra externa del hormigón a compresión, la cual en el caso de chimeneas puede ser menor a la máxima del hormigón, 0.003. Esto puede suceder si el acero se fractura antes de que el hormigón alcance su deformación última. Por otro lado la capacidad del sistema de refuerzo FRCM y sus condiciones de diseño provienen del código ACI 549, cuyo procedimiento se detalla en el Capítulo 4.

Para el cálculo de la capacidad nominal a flexión se hacen las siguientes suposiciones:

- La deformación del acero y del hormigón se asumen directamente proporcional a la distancia al eje neutro; compatibilidad de deformaciones.
- Para la capacidad vertical, la deformación máxima del hormigón se asume igual a 0.003 y el del acero igual a 0.07. El valor que se alcance primero es el que limita el diseño.
- La tensión del acero se calcula a partir de la ley constitutiva, donde la tensión de fluencia la limita.
- La capacidad a tracción del hormigón es despreciada.
- La curva tensión-deformación del hormigón se asume con la siguiente forma:

$$f_c = \begin{cases} 850f'_c \varepsilon_c (1 - 250\varepsilon_c) & \text{para } \varepsilon_c < 0.002 \\ 0.85f'_c (1.30 - 150\varepsilon_c) & \text{para } 0.002 \leq \varepsilon_c < 0.003 \end{cases} \quad (6.4 - 1)$$

Debido a que la sección transversal de la chimenea es circular se utilizan coordenadas polares, a modo de simplificar los cálculos.

7.4.1 Cálculo Capacidad a Flexo-Compresión Estructura Estado Actual

El cálculo de la capacidad a flexo-compresión de una chimenea de sección circular con refuerzo vertical en el centro se realiza considerando el equilibrio de las fuerzas presentes en el acero a compresión y tracción, en el hormigón y debido a la carga a compresión solicitante. Para determinar las fuerzas debido a la tracción y compresión se debe encontrar la ubicación del eje neutro, mediante la ecuación que se muestra a continuación:

$$P_u = P + S_3 + S_4 - S_1 - S_2 \quad (7.4.1 - 1)$$

Donde:

- P_u Carga axial a compresión solicitante, N .
- P Fuerza de compresión del hormigón, N .
- S_1 Fuerza de compresión del acero, en tensión de fluencia, N .
- S_2 Fuerza de compresión del acero, bajo la tensión de fluencia, N .
- S_3 Fuerza de tracción del acero, bajo la tensión de fluencia, N .
- S_4 Fuerza de tracción del acero, en tensión de fluencia, N .

En la Figura 7.4 se muestra la sección transversal de la chimenea, con los respectivos diagramas de deformación y tensión. En la figura se observa que el eje neutro se encuentra a partir del ángulo α , el cual se obtiene del equilibrio de fuerzas.

Como se muestra en la ecuación 6.4.1-1 las fuerzas presentes en el análisis, para el caso del acero, se dividen en dos categorías, en tensión de fluencia o bajo ella. En la Figura 7.4 se

muestra en color celeste la sección de acero en compresión en fluencia (S_1), en color morado la sección de acero en compresión bajo la tensión de fluencia (S_2), en color verde la sección de acero en tracción bajo la tensión de fluencia (S_3) y en color rosado la sección de acero en tracción en fluencia (S_4). A continuación se definen las fuerzas presentes, donde las fuerzas provenientes del acero se calculan en función de la compatibilidad de deformaciones con respecto a la deformación máxima del hormigón, y los ángulos que determinan los rangos de cada fuerza.

$$P = Q2\tau r t 0.85f'_c \quad (7.4.1 - 2)$$

$$S_1 = 2\mu\rho_t r t f_y \quad (7.4.1 - 3)$$

$$7.4.1 - 4)$$

$$S_2 = 2 \int_{\mu}^{\alpha} \frac{r(\cos \theta - \cos \alpha)}{r(1 - \cos \alpha)} \varepsilon_m E_s \rho_t r t d\theta$$

$$S_3 = 2 \int_{\alpha}^{\psi} \frac{r(\cos \alpha - \cos \theta)}{r(1 - \cos \alpha)} \varepsilon_m E_s \rho_t r t d\theta \quad (7.4.1 - 5)$$

$$S_4 = 2(\pi - \psi)\rho_t r t f_y \quad (7.4.1 - 6)$$

$$Q = \begin{cases} -0.523 + 0.181\alpha - 0.0154\alpha^2 + (41.3 - 13.2\alpha + 1.32\alpha^2)\left(\frac{r}{t}\right) \\ -0.154 + 0.01773\alpha - 0.00249\alpha^2 + (16.42 - 1.98\alpha + 0.0674\alpha^2)\left(\frac{r}{t}\right) \\ -0.488 + 0.076\alpha + (9.758 - 0.64\alpha)\left(\frac{r}{t}\right) \\ -1.345 + 0.2018\alpha - 0.004434\alpha^2 + (15.83 - 1.676\alpha + 0.03994\alpha^2)\left(\frac{r}{t}\right) \\ 0.993 - 0.00258\alpha + (-3.27 + 0.0862\alpha)\left(\frac{r}{t}\right) \\ 0.89 \end{cases} \quad (7.4.1 - 7)$$

$$\cos \tau = 1 - 0.85(1 - \cos \alpha) \quad (7.4.1 - 8)$$

$$\cos \psi = \cos \alpha - \left(\frac{1 - \cos \alpha}{\varepsilon_m}\right) \frac{f_y}{E_s} \geq -1 \quad (7.4.1 - 9)$$

$$\cos \mu = \cos \alpha + \left(\frac{1 - \cos \alpha}{\varepsilon_m}\right) \frac{f_y}{E_s} < 1 \quad (7.4.1 - 10)$$

Donde:

- E_s Módulo de elasticidad del acero, *MPa*.
- f'_c Resistencia a compresión del hormigón, *MPa*.
- f_y Tensión de fluencia del acero, *MPa*.
- Q Parámetro de corrección del esfuerzo del hormigón.
- r Radio promedio de la sección, *mm*.
- t Espesor manto de hormigón, *mm*.

α	Mitad del ángulo subtendido por el eje neutro, <i>radianes</i> .
ε_m	Deformación unitaria del extremo a compresión del hormigón, <i>mm/mm</i> .
ρ_t	Cuantía de acero, <i>mm²/mm²</i> .
τ	Ángulo, ver Figura 7.4 , <i>radianes</i> .
μ	Ángulo, ver Figura 7.4 , <i>radianes</i> .
ψ	Ángulo, ver Figura 7.4 , <i>radianes</i> .

El procedimiento de cálculo para la capacidad de la chimenea se basa en que, dado el radio de la sección transversal, el espesor, la cuantía de acero vertical, la fuerza axial y momento solicitante, se ubique la posición del eje neutro. Una vez con la posición del eje de neutro se calcula el momento nominal a partir del equilibrio de momento con respecto al eje neutro.

$$M_n = P_u r \cos \alpha + P' + S'_1 + S'_2 + S'_3 + S'_4 \quad (7.4.1 - 11)$$

Donde:

M_n	Momento nominal a flexión, <i>Nmm</i> .
P'	Momento debido al hormigón en compresión, <i>Nmm</i> .
S'_1	Momento debido a la compresión del acero, en tensión de fluencia, <i>Nmm</i> .
S'_2	Momento debido a la compresión del acero, bajo la tensión de fluencia, <i>Nmm</i> .
S'_3	Momento debido a la tracción del acero, bajo la tensión de fluencia, <i>Nmm</i> .
S'_4	Momento debido a la tracción del acero, en tensión de fluencia, <i>Nmm</i> .

Los momentos debido a las fuerzas presenten en el análisis se definen en función de su distancia al eje neutro, ubicado mediante el ángulo α . En particular, para el caso del momento producido por el hormigón a compresión, el brazo utilizado para el cálculo del momento depende, además, de la posición del centro de gravedad del arco que aporta capacidad a compresión con respecto al eje neutro.

A continuación se definen las ecuaciones utilizadas para el cálculo de los momentos.

$$P' = Q 2 \tau r t 0.85 f'_c \left(\frac{r s e n \tau}{\tau} - r \cos \alpha \right) \quad (7.4.1 - 12)$$

$$S_1 = 2 \int_0^\mu \rho_t r t f_y r (\cos \theta - \cos \alpha) d\theta \quad (7.4.1 - 13)$$

$$S'_2 = 2 \int_\mu^\alpha \frac{r^2 (\cos \theta - \cos \alpha)^2}{r (1 - \cos \alpha)} \varepsilon_m E_s \rho_t r t d\theta \quad (7.4.1 - 14)$$

$$S'_3 = 2 \int_\alpha^\psi \frac{r^2 (\cos \alpha - \cos \theta)^2}{r (1 - \cos \alpha)} \varepsilon_m E_s \rho_t r t d\theta \quad (7.4.1 - 15)$$

$$S'_4 = 2 \int_\psi^\pi \rho_t r t f_y r (\cos \alpha - \cos \theta) d\theta \quad (7.4.1 - 16)$$

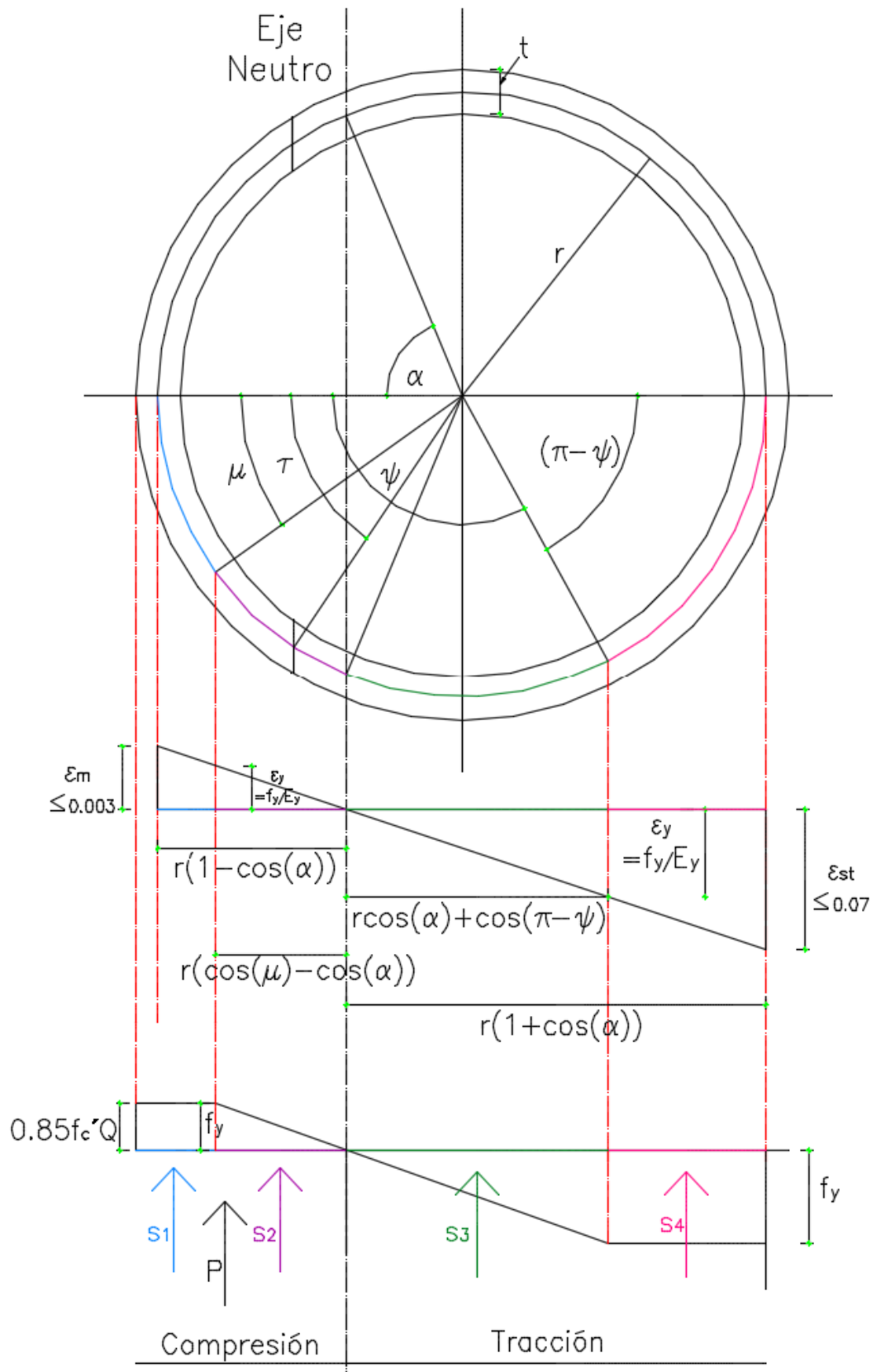


Figura 7.4. Diagrama deformación unitaria y tensión sección circular.

7.4.2 Cálculo Capacidad Flexo-Compresión Estructura Reforzada

La chimenea se refuerza mediante el sistema FRCM, con mallas de fibra de carbono embebidas en matriz cementícea, en la cara exterior del manto, de manera que el refuerzo actúe a tracción y confine la estructura. El diseño del refuerzo se realiza según las disposiciones del capítulo 4, las cuales provienen de la guía de diseño ACI 549. Además, debido a que la estructura a reparar es una chimenea, se respetan las disposiciones del ACI 307.

Para el cálculo de la capacidad de la chimenea reforzada se hacen las siguientes suposiciones:

- Las secciones, tanto del hormigón como del refuerzo, permanecen planas.
- La unión entre el refuerzo FRCM y el manto permanece efectiva en todo momento.
- El refuerzo FRCM posee una deformación unitaria efectiva de diseño máxima de 0.012 y ésta controla el diseño.
- La máxima deformación unitaria a compresión en el hormigón es 0.003.
- La máxima deformación unitaria en el acero es 0.07.
- Existe compatibilidad de deformaciones.
- El acero cumple con la ley constitutiva, con un valor igual o menor a la tensión de fluencia.
- El refuerzo FRCM cumple con la ley constitutiva.
- El refuerzo FRCM posee un comportamiento bilinear hasta la falla, como el presentando en la Figura 4.2.
- Se desprecia la capacidad del hormigón a tracción.
- Se desprecia la capacidad del FRCM a compresión.

De la misma manera que en el caso de una sección anular no reforzada, en primer lugar se debe encontrar la ubicación del eje neutro, mediante el ángulo α (ver Figura 7.5), el cual se obtiene a partir del equilibrio de fuerzas presentes, que se muestra a continuación. Debido a que la sección se encuentra reforzada se incluye la fuerza proveniente del FRCM a tracción, bajo y en su tensión máxima de diseño.

$$P_u = P + S_1 + S_2 - S_3 - S_4 - FRCM_1 - FRCM_2 \quad (7.4.2 - 1)$$

$$FRCM_1 = 2 \int_{\alpha}^{\gamma} \frac{\left(r + \frac{t}{2}\right) (\cos \alpha - \cos \theta)}{r(1 - \cos \alpha)} \varepsilon_{cu} E_f n \rho_f r t d\theta \quad (7.4.2 - 2)$$

$$FRCM_2 = 2(\pi - \gamma) n \rho_f r t f_e \quad (7.4.2 - 3)$$

Donde:

E_f Módulo de elasticidad FRCM, MPa.

- $FRCM_1$ Capacidad a tracción proporcionada por el sistema de refuerzo FRCM, bajo la tensión efectiva de diseño, N .
- $FRCM_2$ Capacidad a tracción proporcionada por el sistema de refuerzo FRCM, en la tensión efectiva de diseño, N .
- n Número de capas de fibra.
- ε_m Deformación unitaria hormigón extremo a compresión, mm/mm .
- ρ_f Cuantía de fibra mm^2/mm^2 .
- γ Ángulo, ver Figura 7.5 , *radianes*.

El refuerzo FRCM controla el diseño mediante su deformación unitaria máxima, la cual se define en función del ángulo α , y de la deformación última del hormigón, según la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{fe} = \frac{\varepsilon_{cu}(r + \frac{t}{2})(1 + \cos(\alpha))}{r(1 - \cos(\alpha))} \leq \varepsilon_{fe_u} = 0.012 \quad (7.4.2 - 4)$$

Donde:

- ε_{cu} Deformación unitaria máxima del hormigón a compresión, mm/mm .
- ε_{fe} Deformación unitaria refuerzo FRCM extremo traccionado, mm/mm .
- ε_{fe_u} Deformación unitaria efectiva máxima del refuerzo, mm/mm .

A partir de la deformación unitaria del extremo traccionado del refuerzo se define la deformación unitaria del hormigón en su extremo comprimido, mediante compatibilidad de deformaciones. De la misma manera se obtiene la deformación unitaria del acero de refuerzo.

$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_{fe}r(1 - \cos(\alpha))}{(r + \frac{t}{2})(1 + \cos(\alpha))} \leq \varepsilon_{cu} = 0.003 \quad (7.4.2 - 5)$$

Es importante destacar que para el cálculo de las fuerzas proporcionadas por el refuerzo se debe ubicar el ángulo γ , que determina la posición donde se alcanza la deformación efectiva de diseño máxima del refuerzo, 0.012.

$$\cos(\gamma) = \cos(\alpha) - \varepsilon_{fe_u} \frac{1 - \cos(\alpha)}{\varepsilon_{cu}} \geq -1 \quad (7.4.2 - 5)$$

El momento nominal se calcula de manera análoga al caso sin refuerzo, como se muestra a continuación:

$$M_n = P_u r \cos \alpha + P' + S'_1 + S'_2 + S'_3 + S'_4 + FRCM'_1 - FRCM'_2 \quad (7.4.2 - 6)$$

$$FRCM'_1 = 2 \int_{\alpha}^{\gamma} \frac{(r + \frac{t}{2})^2 (\cos \alpha - \cos \theta)^2}{r(1 - \cos \alpha)} \varepsilon_{cu} E_f n \rho_f r t d\theta \quad (7.4.2 - 7)$$

$$FRCM'_2 = 2 \int_{\alpha}^{\gamma} \left(r + \frac{t}{2} \right) (\cos \alpha - \cos \theta) f_{fe} n \rho_f r t d\theta \quad (7.4.2 - 8)$$

Donde:

$FRCM_1$ Momento debido a la capacidad a tracción proporcionada por el sistema de refuerzo FRCM, bajo la tensión efectiva de diseño, Nmm .

$FRCM_2$ Momento debido a la capacidad a tracción proporcionada por el sistema de refuerzo FRCM, en la tensión efectiva de diseño, Nmm .

Según el código de diseño utilizado para el refuerzo FRCM, ACI 549, se deben considerar las siguientes limitaciones para el diseño del refuerzo FRCM dispuesto a flexión.

1. Límite de diseño con respecto a la resistencia original del elemento.

$$M_f \leq 0.5 M_{n \text{ sin refuerzo}} \quad (7.4.2 - 9)$$

2. Límite de tensiones de servicio del acero traccionado, f_{ss} :

Para verificar el límite de tensiones de servicio del elemento se considera que el hormigón a tracción se encuentra fisurado, por lo que no aporta capacidad, y que las tensiones a compresión tienen una distribución triangular hasta el eje neutro, con una deformación unitaria menor a la máxima del hormigón. El límite que se debe cumplir es el siguiente:

$$f_{ss} \leq 0.80 f_y \quad (7.4.2 - 10)$$

Donde:

f_{ss} Tensión de tracción en el acero de refuerzo bajo cargas de servicio, MPa .

Para el cálculo de la tensión a tracción máxima en el acero se debe encontrar la ubicación del eje neutro, de manera análoga al cálculo de capacidad, pero con una distribución triangular para las tensiones a compresión del hormigón y con el acero bajo la tensión de fluencia. A continuación se presenta el equilibrio de fuerzas que define la ubicación del eje neutro:

$$P_{su} = P_s + S_{s1} - S_{s2} - FRCM_{s1} - FRCM_{s2} \quad (7.4.2 - 11)$$

$$P_s = 2 \frac{\alpha_{crf} r t \varepsilon_{cc} E_c}{2} \quad (7.4.2 - 12)$$

$$S_{s1} = 2 \int_0^{\alpha_{crf}} \frac{r(\cos \theta - \cos \alpha_{crf})}{r(1 - \cos \alpha_{crf})} \varepsilon_{cc} E_s \rho_t r t d\theta \quad (7.4.2 - 13)$$

$$S_{s2} = 2 \int_{\alpha_{crf}}^{\pi} \frac{r(\cos \alpha - \cos \theta)}{r(1 - \cos \alpha)} \varepsilon_{cc} E_s \rho_t r t d\theta \quad (7.4.2 - 14)$$

$$FRCM_{s1} = 2 \int_{\alpha_{crf}}^{\gamma} \frac{\left(r + \frac{t}{2}\right) (\cos \alpha_{crf} - \cos \theta)}{r(1 - \cos \alpha_{crf})} \varepsilon_{cc} E_f n \rho_f r t d\theta \quad (7.4.2 - 15)$$

$$FRCM_{s2} = 2(\pi - \gamma) n \rho_f r t f_{fe} \quad (7.4.2 - 16)$$

Donde:

$FRCM_{s1}$ Carga a tracción proporcionada por el sistema de refuerzo FRCM, bajo la tensión efectiva de diseño, N .

$FRCM_{s2}$ Carga a tracción proporcionada por el sistema de refuerzo FRCM, en la tensión efectiva de diseño, N .

P_{su} Carga axial a compresión solicitante, bajo cargas de servicio N .

P_s Fuerza de compresión del hormigón fisurado, N .

S_{s1} Fuerza de compresión del acero, bajo la tensión de fluencia, calculado para condición fisurado, N .

S_{s2} Fuerza de tracción del acero, bajo la tensión de fluencia, calculado para condición fisurado, N .

α_{crf} Mitad del ángulo subtendido por el eje neutro obtenido para la sección fisurada, *radianes*.

ε_{cc} Deformación unitaria del hormigón, en el extremo comprimido, calculado para sección fisurada, *mm/mm*.

$$\varepsilon_{cc} = \frac{\varepsilon_{st} r (1 - \cos \alpha_{crf})}{r(1 + \cos \alpha_{crf})} < 0.003 \quad (7.4.2 - 17)$$

Donde:

ε_{st} Deformación unitaria del acero, en el extremo traccionado, calculado para sección fisurada, *mm/mm*.

Para la ubicación del eje neutro se utiliza la compatibilidad de deformaciones de la sección, en este caso, al igual que los anteriores, se deja las deformaciones en función de la deformación del extremo comprimido del hormigón. No obstante, para la condición de servicio no se tiene ni la deformación del acero ni del hormigón, por lo que se hace un supuesto para la deformación del acero a tracción, ε_{st} , el cual se debe variar hasta converger. La convergencia se verifica mediante el equilibrio de momento, considerando que el momento solicitante de servicio es igual al momento nominal calculado. A partir de esta igualdad se puede despejar la deformación unitaria del hormigón, ε_{cc} , y en función de ella la del acero a tracción.

$$M_{su} = P_{su} \cos \alpha_{crf} + P'_s + S'_{s1} + S'_{s2} + FRCM'_{s1} + FRCM'_{s2} \quad (7.4.2 - 18)$$

$$\varepsilon_{ccn} = \frac{M_{su} - P_{su} \cos \alpha_{crf} - FRCM'_{s1} - FRCM'_{s2}}{(P'_s + S'_{s1} + S'_{s2}) / \varepsilon_{ccn-1}} \quad (7.4.2 - 19)$$

$$\varepsilon_{st_n} = \frac{\varepsilon_{cc_n} r(1 + \cos \alpha_{crf})}{r(1 - \cos \alpha_{crf})} \quad (7.4.2 - 20)$$

$$f_{ss} = f_{st} = E_s \varepsilon_{st_n} \quad (7.4.2 - 21)$$

Donde:

M_{su} Momento solicitante, bajo cargas de servicio Nmm .

n N-ésima iteración, donde los valores de las deformaciones convergen.

3. Límites de rotura por fluencia y fatiga del refuerzo bajo condiciones de servicio, f_{fs} .

El límite para el refuerzo, bajo condiciones de servicio, depende del tipo de fibras que lo componen. La tensión en el refuerzo se calcula por compatibilidad de deformaciones, en función de la tensión del acero a tracción.

$$f_{fs} \leq 0.55 f_{fd} \text{ para fibras de Carbono} \quad (7.4.2 - 21)$$

$$f_{fs} = f_{ss} \frac{E_f}{E_s} \frac{\left(r + \frac{t}{2}\right) (1 + \cos \alpha_{crf})}{r(1 + \cos \alpha_{crf})} \quad (7.4.2 - 22)$$

Donde:

f_{fs} Momento solicitante, bajo cargas de servicio, Nmm .

f_{fd} Tensión de diseño efectiva, $E_f \varepsilon_{fd}$, MPa .

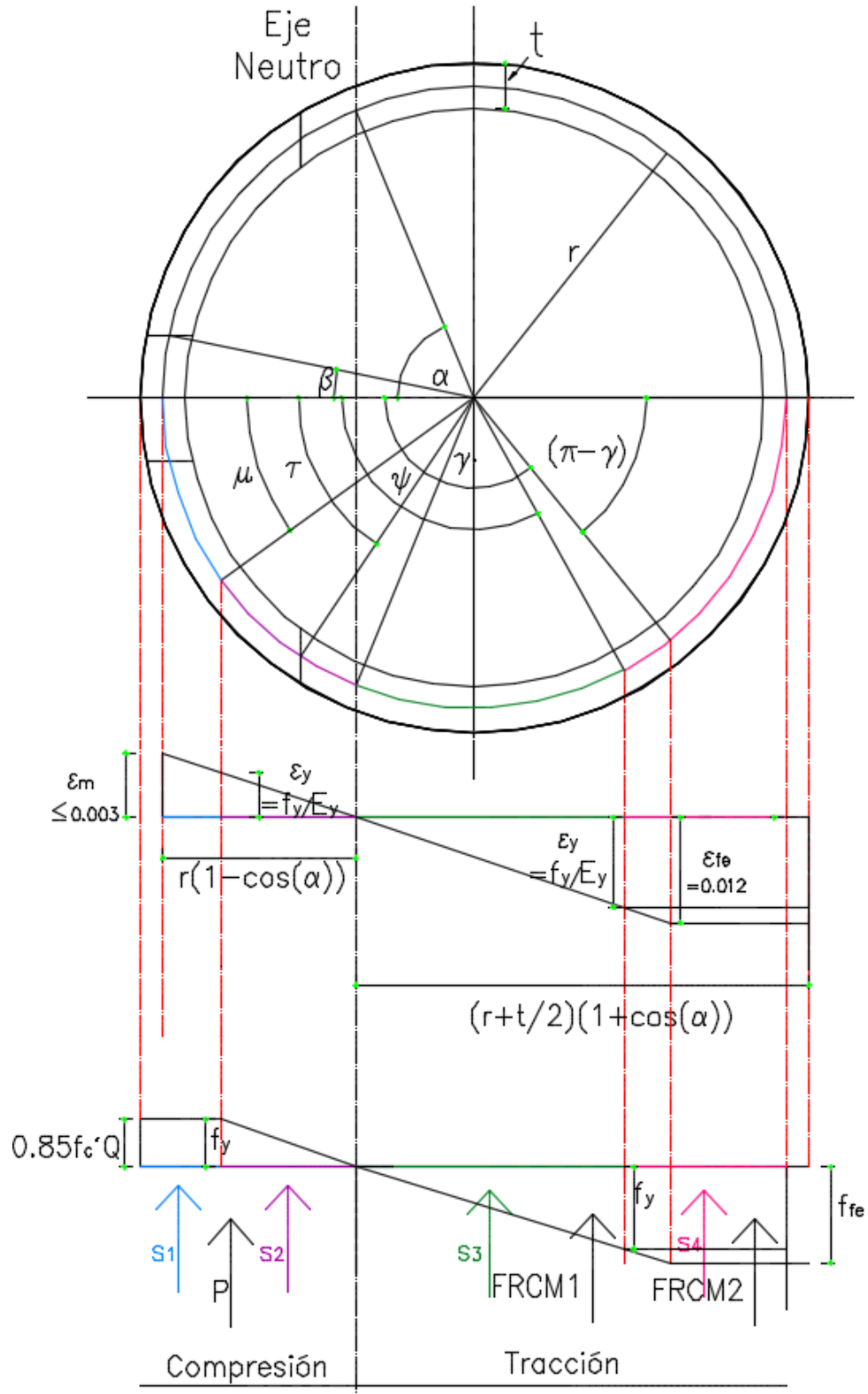


Figura 7.5. Diagrama deformación unitaria y tensión sección circular reforzada con FRCM.

7.5 Capacidad Circunferencial a Flexión

El cálculo de la capacidad circunferencial del estado actual de la chimenea se realiza mediante el método de resistencia, según las disposiciones del ACI 307, derivadas del ACI 318. En el caso de la capacidad de la sección reforzada se utiliza el ACI 549, en el cual se basa el Capítulo 4.

7.5.1 Cálculo Capacidad Circunferencial a Flexión Estructura Estado Actual

Para el cálculo de la capacidad circunferencial se considera que cualquier franja horizontal en la chimenea debe resistir los momentos de flexión circunferenciales debido al viento y a los efectos térmicos. Por lo que el diseño se realiza considerando una viga horizontal con ancho igual al espesor del muro y altura unitaria, como se muestra en la Figura 7.6. En la Tabla 7-9, se adjunta la cuantía de acero a flexión circunferencial, por unidad de alto.

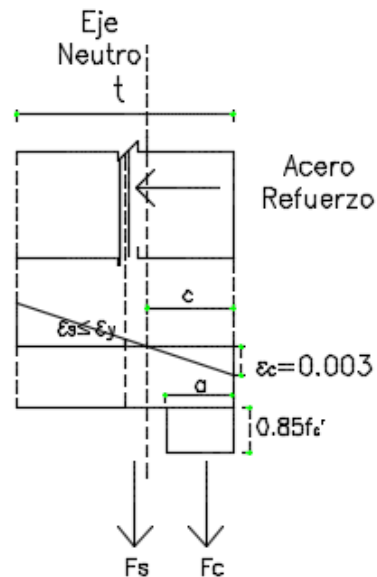


Figura 7.6. Viga Horizontal Representativa Capacidad a Flexión Circunferencial.

Tabla 7-9. Armadura a Flexión Circunferencial (por unidad de alto).

Armadura para Flexión Circunferencial (por unidad de alto)							
Sección	z [m]	Fierros			As prom. [cm ² /m]	Ac [cm ² /m]	Cuantía %
		#	\varnothing_{menor} [mm]	Cantidad			
Base	0	8	25.40	134	17.76	2794	0.53
10	11.43	9	28.58	116	15.64	3048	0.52
20	22.86	6	19.05	116	11.26	2318	0.49
30	34.29	7	22.23	116	14.33	1778	0.81
40	45.72	7	22.23	115	14.59	1524	0.96
50	57.15	4	12.70	75	7.45	1524	0.49

Debido a que la sección se considera como una viga horizontal, se calcula la capacidad según las indicaciones de la ACI 308, donde se debe cumplir que la capacidad nominal reducida, $\phi_m M_{nsr}$, sea mayor al momento solicitante, M_u . Se hacen las mismas suposiciones que para la flexo-compresión.

$$\phi_m M_{nsr} \geq M_u \quad (7.5.1 - 1)$$

$$M_n = M_{FS} \quad (7.5.1 - 2)$$

$$M_s = F_s \left(\frac{t}{2} - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (7.5.1 - 3)$$

Donde:

- c Distancia desde el extremo a compresión hasta el eje neutro, mm .
- F_s Fuerza debido al acero de refuerzo, N .
- M_{nsr} Capacidad nominal a flexión circunferencial del elemento sin refuerzo, Nmm .
- M_{FS} Capacidad a flexión circunferencial, debida al acero de refuerzo, Nmm .
- t Espesor del muro, mm .
- β_1 Coeficiente Bloque de Whitney.
- ϕ_m Factor de reducción FRCM a flexión.
- a $\beta_1 c$, mm (ver Figura 7.6).

La ubicación de eje neutro se encuentra mediante el equilibrio de fuerzas siguiente.

$$F_c + F_s = 0 \quad (7.5.1 - 4)$$

$$F_c = 0.85 f'_c \beta_1 c h \quad (7.5.1 - 5)$$

$$F_s = \rho' t H f_s \quad (7.5.1 - 6)$$

Donde:

- F_c Fuerzo debido al hormigón a compresión, N .
- f_s Tensión en el acero de refuerzo longitudinal, MPa .
- f'_c Resistencia a compresión del hormigón, MPa .
- H Altura de la viga considerada, $1m$, mm .
- ρ' Cuantía de acero a flexión circunferencial por unidad de alto, mm^2/mm .

La tensión se define a partir de la ley constitutiva y las deformaciones mediante compatibilidad de deformaciones. Debido a que el diseño es de estado último se considera que la deformación del hormigón a compresión es la máxima, $\varepsilon_c = \varepsilon_u = 0.003$, y controla el diseño.

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (7.5.1 - 7)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_c \frac{t/2 - c}{c} \quad (7.5.1 - 8)$$

Donde:

- E_s Módulo de elasticidad del acero longitudinal, MPa .
- ε_s Deformación unitaria en el acero de refuerzo, MPa .

7.5.2 Cálculo Capacidad Circunferencial a Flexión Estructura Reforzada

El cálculo de la capacidad circunferencial de la estructura reforzada considera, de igual manera que en el caso no reforzado, una viga horizontal con ancho igual al espesor del muro y altura unitaria (Figura 7.7)

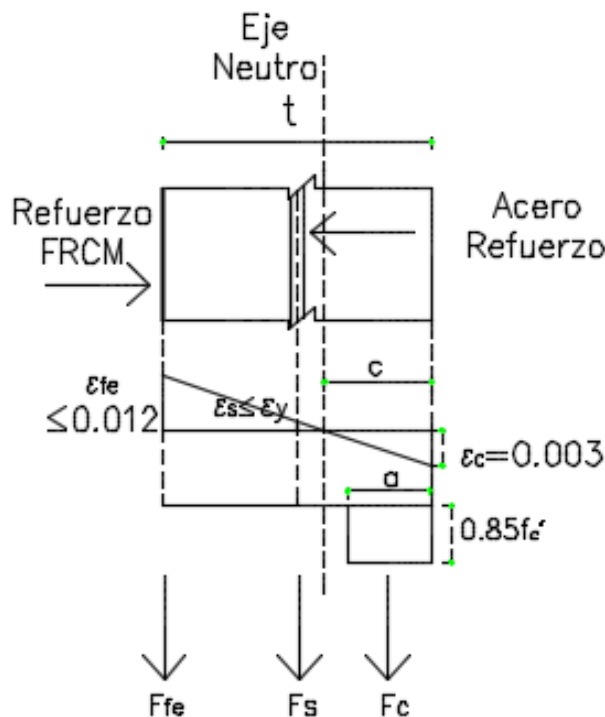


Figura 7.7. Sección Reforzada Representativa Capacidad Circunferencial a Flexión, Mo (tracción en el exterior).

De la misma manera que en el caso no reforzado, se debe cumplir que la capacidad nominal reducida, $\Phi_m M_n$, sea mayor al momento solicitante, M_u .

$$\Phi_m M_n \geq M_u \quad (7.5.2 - 1)$$

$$M_n = (M_{Fs} + M_{Ffe}) \quad (7.5.2 - 2)$$

$$M_f = F_{fe} \left(t - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (7.5.2 - 3)$$

Donde:

F_{fe} Fuerza debido al refuerzo FRCM, N.

M_n Capacidad nominal a flexión del elemento reforzado, Nmm.

M_f Capacidad a flexión, debida al refuerzo FRCM, Nmm.

Se ubica el eje neutro mediante equilibrio de fuerzas.

$$F_c + F_s + F_{fe} = 0 \quad (7.5.2 - 4)$$

$$F_{fe} = n A_f w_f f_{fe} \quad (7.5.2 - 5)$$

Donde:

- A_f Área de refuerzo FRCM por unidad de ancho, mm^2/mm .
- n Número de capas de fibra de FRCM.
- f_{fe} Tensión, MPa .
- w_f Ancho refuerzo FRCM, mm .

Debido a la existencia del refuerzo, ahora es éste el que controla el diseño, mediante la deformación unitaria, como se muestra a continuación, considerando para su cálculo que el hormigón ya alcanzó su máxima deformación.

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (7.5.2 - 6)$$

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \frac{(t - c)}{c} \leq \varepsilon_{fd} = 0.012 \quad (7.5.2 - 7)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{fe} \frac{c}{(t - c)} \quad (7.5.2 - 8)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{fe} \frac{(t/2 - c)}{(t - c)} \quad (7.5.2 - 9)$$

Donde:

- ε_{cu} Deformación unitaria en el hormigón, mm/mm .
- ε_{fe} Deformación unitaria efectiva de diseño en el FRCM en la falla, mm/mm .
- ε_{fe} Deformación unitaria efectiva en el FRCM en la falla, mm/mm .
- ε_c Deformación unitaria a compresión en el hormigón, mm/mm .
- E_f Módulo de elasticidad del refuerzo FRCM, MPa .

7.6 Capacidad a Corte Chimenea

El cálculo de la capacidad a corte de la chimenea se realiza mediante el método de resistencia, según las disposiciones de la ACI 318.

7.6.1 Cálculo Capacidad a Corte Estructura Estado Actual

La capacidad a corte de la chimenea se calcula considerando las fuerzas por unidad de ancho el manto de la chimenea, por lo que las ecuaciones provenientes de ACI 308 se aplican de manera directa.

$$\phi V_n \geq V_u \quad (7.6.1 - 1)$$

$$V_n = V_c + V_s \quad (7.6.1 - 2)$$

$$V_c = 0.17 \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \sqrt{f'_c} b_w d \quad (7.6.1 - 3)$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (7.6.1 - 4)$$

Donde:

A_g	Sección área bruta, mm^2 .
A_v	Sección área de acero de refuerzo transversal, mm^2 .
b_w	Ancho, mm .
d	Alto, mm .
f'_c	Resistencia a compresión hormigón, MPa .
f_y	Tensión de fluencia acero, MPa .
N_u	Compresión solicitante, N .
$\frac{N_u}{A_g}$	Debe estar expresado en unidades de MPa .
s	Espaciamiento acero transversal, mm
V_c	Capacidad hormigón a corte, N .
V_n	Capacidad nominal a corte, N .
V_s	Capacidad acero a corte, N .
V_u	Solicitación a corte, N .
ϕ	Factor de reducción, 0.75.

7.6.2 Cálculo Capacidad a Corte Estructura con Refuerzo

La capacidad a corte proporcionada por el refuerzo FRCM se calcula de la misma manera que en el caso anterior, considerando las solicitaciones y fuerzas por unidad de ancho en el manto de la chimenea (Figura 7.8), para alturas representativas. La resistencia a corte del refuerzo se calcula según las disposiciones de la ACI 549, las cuales se detallan en el Capítulo 4.

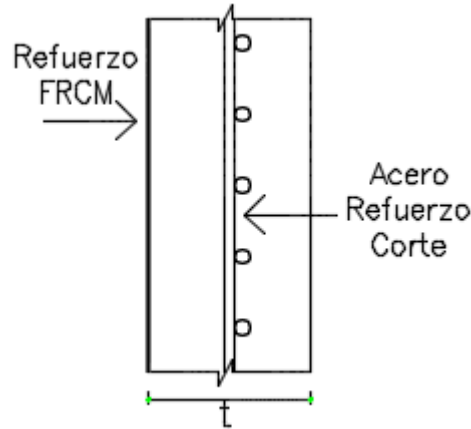


Figura 7.8. Sección Representativa Capacidad a Corte.

$$V_n = V_c + V_s + V_f \quad (7.6.2 - 1)$$

$$V_f = n \sum_{i=1}^2 A_{fv_i} f_{fv} d_f (\text{sen} \beta_i + \text{cos} \beta_i) \quad (7.6.2 - 2)$$

$$A_{fv_i} = \frac{w_f t_f}{s_i} \quad (7.6.2 - 3)$$

$$s_i = \frac{S}{\text{sen}(\beta_i)} \quad (7.6.2 - 4)$$

$$\varepsilon_{fv} = \varepsilon_{fu} \leq 0.004 \quad (7.6.2 - 5)$$

$$f_{fv} = E_f \varepsilon_{fv} \quad (7.6.2 - 6)$$

Donde:

- A_{fv_i} Área efectiva a corte fibras, mm^2 .
- d_f Ver Figura 4.11, mm .
- E_f Módulo de elasticidad de tracción del FRCM fisurado, MPa .
- f_v Tensión de diseño a tracción, MPa .
- n Número de capas de refuerzo.
- S Espaciamiento entre fibras, mm .
- s_i Espaciamiento entre fibras con respecto a la horizontal, mm .
- t_f Espesor fibras, mm .
- V_f Capacidad refuerzo FRCM a corte, N .
- w_f Ancho de la sección, mm .
- β_i Ángulo formado entre la horizontal la fibra, $radianes$.
- ε_{fu} Deformación unitaria última a tracción, mm/mm , mm/mm .

Según la ACI 549, el refuerzo a corte debe cumplir con la siguiente condición de diseño, con respecto a la capacidad entregada tanto por el acero como por el refuerzo:

$$V_s + V_f \leq 0.66 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (7.6.2 - 7)$$

7.7 Verificación Capacidad Estructural

Las verificaciones de capacidad presentadas a continuación se realizan para secciones representativas en cuanto a cuantía de acero. Como se mencionó anteriormente, el diseño de la chimenea y del refuerzo FRCM se realiza según disposiciones del ACI 307 y ACI 549, respectivamente.

A continuación se presenta la verificación de capacidad para flexo-compresión y flexión circunferencial y corte.

7.7.1 Solicitaciones

Las solicitaciones a las que se está sometida la chimenea se determinan a partir del modelo realizado en el software de elementos finitos SAP2000. A partir de él se define la combinación que controla el diseño para el momento nominal y el corte, y para la flexión circunferencial.

La combinación que produce los mayores esfuerzos verticales en la chimenea corresponde a la definida por la normativa Chilena, la cual se presenta a continuación.

$$U_v = 1.2D \pm 1.4E \quad (7.7.1 - 1)$$

No obstante, a modo conservador, se incorpora en el diseño el efecto producido por el gradiente de temperatura que presentan las combinaciones de la ACI 307, ya que éstas son específicas para el diseño de chimeneas. Por lo tanto la combinación que define los esfuerzos de diseño para la capacidad vertical de la chimenea es la siguiente:

$$U_v = 1.2D + 1.2T \pm 1.4E \quad (7.7.1 - 2)$$

En la Tabla 7-10 y Tabla 7-11 se presentan las solicitaciones verticales de la chimenea para la condición actual y en la condición reforzada respectivamente, resultante de la aplicación de la combinación anterior. Adicionalmente, en la Tabla 7-12 se presentan las solicitaciones de servicio, para la verificación de las condiciones de diseño del refuerzo.

Tabla 7-10. Solicitaciones Verticales, Estructura Estado Actual.

Solicitaciones Estructura, Estado Actual				
Sección	Altura [m]	Compresión [tonf]	Corte [tonf]	Momento [tonfm]
S0	0	1009.5	159.3	4623.6
S5	5.72	860.5	155.3	3867.1
S10	11.43	712.4	141.5	3189.6
S15	17.15	574.7	123.2	2606.2
S20	22.86	465.2	106.0	2108.9
S25	28.58	371.8	90.8	1676.9
S30	34.29	290.3	78.6	1288.0
S35	40.01	218.8	69.3	925.2
S40	45.72	154.5	60.9	584.2
S45	51.44	93.7	49.1	280.6
S50	57.15	36.3	28.2	58.7
S54	60.96	0	0	0

Tabla 7-11. Solicitaciones Verticales, Estructura Reforzada.

Solicitaciones Estructura, Reforzada				
Sección	Altura [m]	Compresión [tonf]	Corte [tonf]	Momento [tonfm]
S0	0	1073.4	167.4	4828.7
S5	5.72	916.6	163.2	4032.3
S10	11.43	761.1	148.8	3318.9
S15	17.15	616.3	129.8	2704.5
S20	22.86	499.9	111.8	2181.7
S25	28.58	399.9	95.8	1729.8
S30	34.29	309.1	82.5	1326.0
S35	40.01	228.0	72.0	951.0
S40	45.72	154.5	62.4	599.3
S45	51.44	93.7	50.4	287.0
S50	57.15	36.3	28.8	59.7
S54	60.96	0	0	0

Tabla 7-12. Solicitaciones Verticales de Servicio, Estructura Reforzada.

Solicitaciones de Servicio Estructura, Reforzada				
Sección	Altura [m]	Compresión [tonf]	Corte [tonf]	Momento [tonfm]
S0	0	894.5	119.6	3449.1
S5	5.72	763.9	116.6	2880,0
S10	11.43	634.2	106.3	2370.6
S15	17.15	513.6	92.7	1931.8
S20	22.86	416.6	79.9	1558.4
S25	28.58	333.2	68.5	1235.6
S30	34.29	257.5	58.9	947.2
S35	40.01	190.0	51.4	679.3
S40	45.72	128.8	44.6	428.1
S45	51.44	78.1	36.0	205.0
S50	57.15	30.3	20.6	42.6
S54	60.96	0	0	0

La sollicitación debido a los esfuerzos circunferenciales en la chimenea corresponde a la especificada para estos efectos por la ACI 307, la cual involucra los efectos de la temperatura por un factor de 1.2 y el viento.

El momento circunferencial máximo sollicitante, debido a la presión radial del viento, se calcula según las siguientes ecuaciones, dependiendo de si la tensión se encuentra en el interior o exterior del manto. En caso de que la altura, z , supere $1.5d(h)$, la presión $p_r(z)$ se debe aumentar un 50%.

$$M_i(z) = 0.31p_r(z)r(z)^2 \tag{7.7.1 - 3}$$

$$M_0(z) = 0.27p_r(z)r(z)^2 \tag{7.7.1 - 4}$$

$$p_r(z) = \bar{p}(z)G_r(z) \tag{7.7.1 - 5}$$

$$G_r(z) = 4.0 - 0.8 \log_{10} z \tag{7.7.1 - 6}$$

$$G_r(z) = 4, \text{ para } z \leq 30.5\text{cm} \tag{7.7.1 - 7}$$

Donde:

$G_r(z)$ Factor de Gust para presión radial del viento, según altura z .

M_i Momento circunferencial máximo sollicitante, con tracción en el interior del manto Nmm .

M_0 Momento circunferencial máximo sollicitante, con tracción en el exterior del manto Nmm .

$p_r(z)$ Presión radial de viento, según altura z , MPa .

$\bar{p}(z)$ Presión debido a la velocidad media de diseño del viento, según altura z , MPa .

$r(z)$ Radio de la sección circular, mm .

En el Gráfico 7-5 se presentan las solicitaciones circunferenciales.

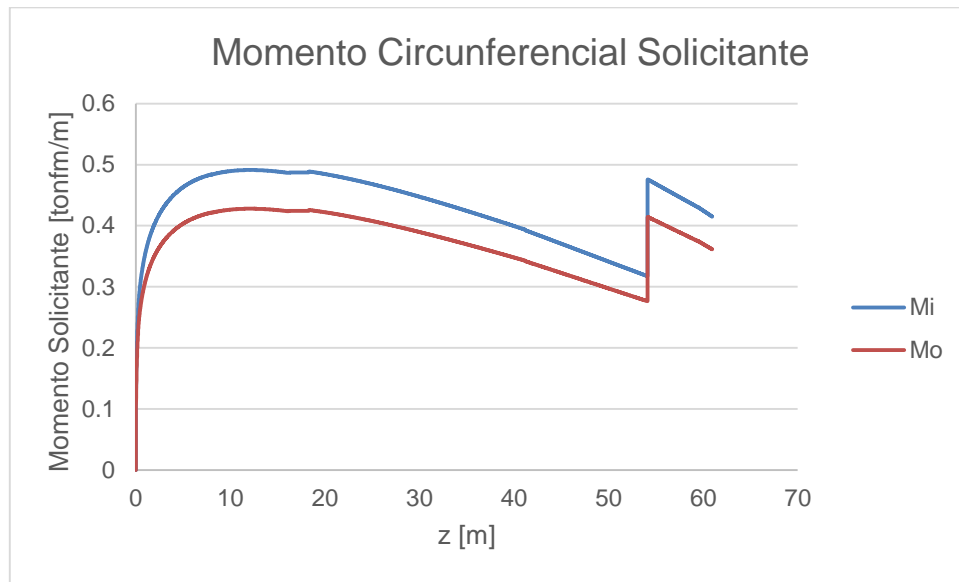


Gráfico 7-5. Momento Circunferencial Solicitante.

7.7.2 Verificación Flexo-Compresión

La verificación de la capacidad de la chimenea sin refuerzo se realiza según las disposiciones de código ACI 307. Se destaca que debido a la deslaminación existente, razón por la cual no hay continuidad en el hormigón, se considera que sólo la mitad interior del manto trabaja a compresión, ya que al estar separado de la estructura el hormigón exterior no aporta capacidad.

Es importante señalar que debido a que la chimenea cumple con las combinaciones de carga específicas para su desempeño, no es necesario verificar la combinación para la realización del refuerzo, que es menos exigente.

Tabla 7-13. Capacidad a Flexión Sección, Estado Actual.

Verificación a Flexión Sección					
Sección	Altura [m]	Compresión Solicitante [tonf]	Momento Solicitante [tonfm]	Capacidad Nominal [tonfm]	Factor de Seguridad (F.S.)
Base	0	1009.54	4623.6	6199.7	1.3
10	11.43	712.37	3189.68	5516.8	1.7
20	22.86	465.17	2108.9	2688.5	1.3
30	34.29	290.25	1288.0	2527.2	2.0
40	45.72	154.54	584.2	1671.9	2.9
50	57.15	36.29	58.7	533.2	9.1

La verificación de la capacidad de la chimenea con refuerzo se realiza según las disposiciones de código ACI 307 y ACI 549. Debido a que la reparación propuesta consiste en una consolidación del hormigón, recuperando el monolitismo de la sección, en este caso se considera la totalidad del hormigón aportando capacidad a compresión. Se destaca que el refuerzo FRCM se dispone en forma de una capa desde la base hasta los 30m de altura, mientras que de los 30 a los 45m se disponen dos capas. En la Tabla 7-14 se presentan los resultados obtenidos para la capacidad nominal de la sección reforzada.

Tabla 7-14. Capacidad a Flexión Sección Reforzada Mediante Confinamiento con FRCM.

Verificación a Flexo-Compresión Sección Reforzada					
Sección	Altura [m]	Compresión Solicitante [tonfm]	Momento Solicitante [tonfm]	Capacidad Nominal [tonfm]	Factor de Seguridad (F.S)
Base	0	1073.4	4828.7	6957.1	1.44
10	11.43	761.1	3318.9	5925.6	1.79
20	22.86	499.9	2181.7	2890.7	1.32
30	34.29	309.1	1326.0	2734.2	2.06
40	45.72	154.5	599.3	1920.7	3.20

En la Tabla 7-15 se presentan los resultados obtenidos para la verificación de las condiciones de diseño del refuerzo.

Tabla 7-15. Condiciones de Diseño Refuerzo FRCM

Verificación a Flexo-Compresión Sección Reforzada					
Sección	Altura [m]	$M_f \leq 0.5M_{ns/FRCM}$	$f_{ss} \leq 0.80f_y$	$f_{fs} \leq 0.55f_{fd}$	
Base	0	OK	OK	OK	
10	11.43	OK	OK	OK	
20	22.86	OK	OK	OK	
30	34.29	OK	OK	OK	
40	45.72	OK	OK	OK	

7.7.3 Verificación Flexión Circunferencial

Para la verificación de la flexión circunferencial de la sección en su estado actual se asume que la capa de hormigón entre el acero y el exterior no trabaja en la zona que se encuentra deslaminada, por lo que se considera la mitad del espesor del manto.

En el caso de tracción en el exterior este supuesto no ocasiona problemas para la verificación en estado último, debido a que no se considera la capacidad del hormigón a tracción, siendo

la chimenea capaz de resistir el momento circunferencial en toda su altura. No obstante, al considerar la tracción en el interior, la sección no posee acero que resista la tracción, ya que el acero de refuerzo se encuentra trabajando a compresión. Debido a esto se calcula el momento de fisuración, a partir del cual se verifica que el momento solicitante no alcanza a fisurar la sección, por lo que se puede considerar que el hormigón sí trabaja a tracción.

La verificación de la sección reforzada del momento circunferencial, con la tracción en el exterior, se realiza según las disposiciones de código ACI 307 y ACI 549. Del mismo modo que en el caso de la flexo-compresión, se considera la totalidad del hormigón aportando capacidad a compresión, ya que se asume que se recuperó el monolitismo del hormigón. No obstante, en el caso de la tracción en el interior el refuerzo no aporta capacidad, ya que no trabaja a compresión, por lo que en ese caso sólo se asume recuperada la sección del hormigón.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para la verificación de momento circunferencial, para la sección en estado actual y reforzada, según la ubicación de la tracción.

Tabla 7-16. Capacidad a Flexión Circunferencial Tracción en el Exterior.

Verificación Momento Circunferencial Mo						
Sección	Altura [m]	Mo Solicitante [tonfm/m]	Momento Circ. Cond. Actual [tonfm/m]	Momento Circ. Cond. Reforzada [tonfm/m]	F.S Cond. Actual	F.S Cond. Reforzada
Base	0	0.31	3.6	4.0	11.6	12.9
10	11.43	0.43	4.3	4.6	10.1	10.8
20	22.86	0.41	2.4	2.5	5.8	6.0
30	34.29	0.37	1.7	2.4	4.6	6.5
40	45.72	0.32	1.3	2.1	4.1	6.6
50	57.15	0.43	1.1	-	2.6	-

Tabla 7-17. Capacidad a Flexión Circunferencial Tracción en el Interior.

Verificación Momento Circunferencial Mi						
Sección	Altura [m]	Mo Solicitante [tonfm/m]	Momento Fisuración Cond. Actual [tonfm/m]	Momento Circ. Cond. Reforzada [tonfm/m]	F.S Cond. Actual	F.S Cond. Reforzada
Base	0	0.36	1.2	3.9	3.2	10.8
10	11.43	0.49	1.4	4.6	2.8	9.3
20	22.86	0.48	0.8	2.5	1.7	5.2
30	34.29	0.43	0.5	2.3	1.1	5.4
40	45.72	0.37	1.4	2.0	3.8	5.4
50	57.15	0.49	1.4	-	2.8	-

7.7.4 Verificación Corte

La verificación de la capacidad a corte de la chimenea sin refuerzo se realiza según las disposiciones de código ACI 308. Se destaca que debido a la deslaminación existente, se considera que sólo la mitad interior del manto trabaja a corte, ya que al no haber continuidad entre la capa interior y exterior del manto no se tiene seguridad que el acero esté aportando capacidad.

Tabla 7-18. Capacidad a Corte, Estado Actual.

Verificación Corte sin Refuerzo				
Sección	Altura [m]	Corte Solicitante [tonf]	Resistencia Corte [tonf]	Factor de Seguridad (F.S)
Base	0	12.6	13.3	1.1
10	11.43	11.5	13.7	1.2
20	22.86	9.2	10.6	1.2
30	34.29	7.5	8.1	1.1
40	45.72	6.6	6.5	1.0
50	57.15	3.9	5.7	1.5

La verificación de la capacidad a corte de la chimenea reforzada se realiza según las disposiciones de código ACI 308 y ACI 549. Debido a que la reparación de la chimenea considera devolverle el monolitismo al hormigón sí se considera que toda la sección de hormigón del manto trabaja a corte, por lo que también se considera la capacidad a corte del acero. De la misma manera que en el caso a flexión, se considera una capa de refuerzo FRM desde la base hasta los 30m de altura, y dos de los 30 a los 45m.

Tabla 7-19. Capacidad a Corte, Reforzada FRM.

Verificación Corte con Refuerzo					
Sección	Altura [m]	Corte Solicitante [tonf]	Resistencia Corte [tonf]	Factor de Seguridad (F.S)	Condición de Diseño FRM
Base	0	13.6	41.3	3.0	OK
10	11.43	11.9	42.7	3.6	OK
20	22.86	9.9	36.8	3.7	OK
30	34.29	7.9	24.6	3.1	OK
40	45.72	6.8	22.0	3.3	OK

7.8 Conclusiones

A partir de las evaluaciones estructurales realizadas por IDIEM se determinó que la estructura presenta actualmente un estado de deterioro, debido principalmente al agrietamiento y la deslaminación en el hormigón a distintas alturas de la chimenea, no obstante, se debe destacar que la chimenea aún posee la capacidad suficiente para resistir los efectos sísmicos y estáticos debido a corte, flexo-compresión y flexión circunferencial exigidos por la guía de diseño utilizada, específica para chimeneas, ACI 307. Sin embargo, debido a la importancia de la estructura en la central termoeléctrica, la reparación de la chimenea es necesaria para evitar un posible avance en el daño, ya que la entrada de oxígeno y humedad a través de las fisuras presentes en el hormigón promueven la carbonatación de éste y por lo tanto un deterioro continuo, que puede significar una pérdida resistente en el nivel de seguridad mínima de la estructura, llevándola por debajo de su capacidad necesaria.

El refuerzo propuesto, mediante encamisado con FRCM, utilizando mallas de fibra de carbono, corresponde a una solución de rehabilitación adecuada, ya que involucra una consolidación del manto de hormigón, llevándolo a su estado original y recuperando la capacidad resistente de la estructura. Se debe destacar que el significativo aumento en la capacidad no se debe exclusivamente al refuerzo, sino a la recuperación del hormigón del manto exterior y, en el caso del corte, también al acero transversal, ya que debido al estado de deslaminación de la chimenea, no se considera que aporta resistencia ni el manto exterior del hormigón ni el acero a corte, éste último no se considera debido a que no se tiene certeza de si éste se encuentra adherido al hormigón.

Adicionalmente, el refuerzo corresponde a una solución poco invasiva y de rápida instalación, lo que es necesario debido a la imposibilidad de detener el funcionamiento de la chimenea para efectuar el refuerzo estructural. Otra de las ventajas de este refuerzo es su bajo peso, lo que, permite mantener las fundaciones originales de la estructura, lo anterior convierte a este refuerzo en un excelente alternativa, con respecto a otras soluciones de reparación estructural, debido a que la densidad de las instalaciones en la central impiden aumentar el tamaño de la fundaciones.

Es importante destacar que las propiedades mecánicas del refuerzo fueron obtenidas a partir de un ensayo a tracción donde no se obtuvo todas las variables necesarias para su correcto cálculo, y el ensayo sólo tuvo en consideración especímenes con una capa de fibra, y no con de dos. Por lo que, en caso de realizar la reparación de la estructura mediante este sistema de refuerzo sería necesario realizar nuevamente el ensayo tracción, cumpliendo con la normativa de la AC 434 y reproduciendo lo mejor posible las condiciones reales a las que se verá sometido, tanto las condiciones de borde y como cantidad de capas de fibras que se utilicen

8 Bibliografía

- [1] AC 434, “Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening Using Fiber-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Systems”, 2011.
- [2] ACI 549.4R-13, “Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) System for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures”, American Concrete Institute, 2013.
- [3] ACI 440.2R-08 “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures”, American Concrete Institute, 2008.
- [4] ACI 562-13, “Code Requirements for Evaluation, Repair, and Rehabilitation of Concrete Buildings”, American Concrete Institute, 2013.
- [5] ACI 318-08, “Building Code Requirements of Structural Concrete and Commentary”, American Concrete Institute, 2008.
- [6] ACI 307-08, “Code Requirements for Reinforced Concrete Chimneys”, American Concrete Institute, 2008.
- [7] Araneda, P.; Silva, D.; (2008), “Evaluación del Estado Estructural Chimenea N°1 Central Ventanas, AES Gener”, IDIEM.
- [8] Arboleda D., (2014) “Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites for Infrastructure Strengthening and Rehabilitation: Characterization Methods”, Open Access Dissertations, Paper 1282.
- [9] Arboleda, D.; Babaeidarabad, S.; Hays, C.; Nanni, A.; (2014), “Durability of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites”, 7th. International Conference of FRP Composites in Civil Engineering, International Institute for FRP in Construction, pp. 1-6.
- [10] Babaeidarabad, S.; Loreto, G.; Arboleda, D.; Nanni, A.; (2014), “Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite”, The 7th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering.
- [11] Bianchi, G.; Arboleda, D.; Carozzi, G.; Poggi, C.; Nanni, A.; (2013), “Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Material for Structural Rehabilitation, Material Characterization”, IAHS 2013: 39th World Congress on Housing Science, Milano, Italy.
- [12] Bournas, D.; Triantafillou, T.; Papanicolaou, C.; (2015), “Retrofit of Seismically Deficient RC Columns with Textile Reinforced Mortar (TRM) Jackets”, 4th. Colloquium on Textile Reinforced Structures, CTRS 4, pp. 471 – 490.
- [13] Bucker, A.; Ortlepp, R.; Curbach, M.; (2006), “Textile Reinforced Concrete for Strengthening in Bending and Shear” Materials and Structures, V. 39, pp. 741-748.

- [14] D'Ambrisi, A.; Focacci, F.; (2011), "Flexural Strengthening of RC Beams with Cement-Based Composites", *Journal of Composites and Construction*, V. 15, No. 5, pp. 707-720.
- [15] Nanni, A.; (1995), "Concrete Repair with Externally Bonded FRP Reinforcement", *Concrete International*, V17, No 6, pp. 22-26.
- [16] Nanni, A.; (1997), "Carbon FRP Strengthening: New Technology Becomes Mainstream" *Concrete International*, V19, No9-231 6, pp. 19-23.
- [17] Nanni, A.; (2012), "A New Tool for Concrete and Masonry Repair".
- [18] NCh2369-2003, "Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales".
- [19] NCh3171-2010, "Diseño Estructural-Disposiciones Generales y Combinaciones de Carga".
- [20] Sandoval, P.; (2014), "Evaluación Experimental del Comportamiento Mecánico de Refuerzos de Fibras de Carbono con Matriz Cementícea (FRCM), Influencia del Tipo de Matriz", Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil.
- [21] Sneed, L.; D' Antino, T.; Carloni, C.; (2014), "Investigation of Bond behavior of PBO Fiber-Reinforced Cementitious Matrix Composite-Concrete Interface", *ACI Materials Journal*, V. 111, pp. 1-6.
- [22] Tomicic, Y.; Delfín, F.; (2013) "Informe Técnico Proyecto de Reparación Mediante Fibra Embebida en Matriz Cementícea (FRCM), Chimenea de Hormigón Armado Planta Ventanas AES GENER", D&T Hormigones.
- [23] Triantafillou, T.; Papanicolaou, C.; (2006), "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Members with Textile Reinforced Mortar (TRM) Jackets", *Materials and Structures*, V. 39, No. 1, pp. 93-103.
- [24] Triantafillou, T.; Papanicolaou, C.; (2006), "Concrete Confinement with Textile-Reinforced Mortar Jackets", *ACI Structural Journal*, V. 103, No. 1, pp. 28-37.
- [25] Zastrau, B.; Lepenies, I.; Richter, M.; (2008), "On the Multi Scale Modeling of Textile Reinforced Concrete", *Technische Metechanik*, V.28, pp. 53-63.
- [26] Weiland, S.; Ortlepp, R.; Bruckner, A.; Curbach, M.; (2007), "Strengthening of RC Structures with Textile Reinforced Concrete", *ACI Structural Journal*, Special Publication, V.244, pp. 157-172.

A.Anexo A: Cálculo Capacidad Teórica *Papers*

A.1.Capacidad a Flexión

Babaeidarabad et al. (2006)

1. Propiedades de los Materiales

A continuación se presentan las propiedades de los materiales utilizados en el ensayo.

Propiedades Geométricas

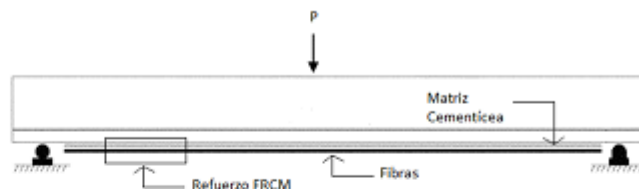
Probeta rectangular

Largo: $L := 1524\text{mm}$

Ancho: $b := 152\text{mm}$

Alto: $h := 305\text{mm}$

Distacia al refuerzo: $df := h = 305\text{-mm}$



La ubicación del acero de refuerzo no está especificada, por lo que se asume a 3cm del extremo inferior.

Distancia al acero de refuerzo: $d := h - 3\text{cm} = 275\text{-mm}$

Propiedades Hormigón

Resistencia a compresión: $fc := 29.13\text{MPa}$

Deformación última: $\epsilon_{cu} := 0.003$

Módulo de elasticidad: $E_c := 4700 \cdot \sqrt{fc \cdot \text{MPa}} = 25.367 \cdot \text{GPa}$

Propiedades Acero

Área acero de refuerzo: $A_s := 2 \cdot \frac{\pi (12.7\text{mm})^2}{4} = 2.534 \cdot \text{cm}^2$

Tensión de fluencia: $f_y := 276\text{MPa}$

Módulo de elasticidad: $E_s := 200\text{GPa}$

Deformación unitaria de fluencia: $\epsilon_y := \frac{f_y}{E_s}$

Cuantía: $\rho_s := \frac{A_s}{d \cdot b} = 0.006$

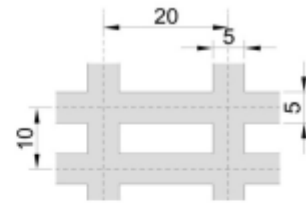
Propiedades de la malla FRCM

Malla de fibra de PBO

Propiedades entregadas por el proveedor

$$\text{Área por unidad de ancho: } Af := 0.0457 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$\text{Cuantía fibra: } \rho_f := \frac{Af \cdot b}{d \cdot b} = 0.00017$$



Propiedades del compuesto, obtenidas a partir de ensayo a tracción según AC 434.

$$\text{Módulo de elasticidad: } Ef := 128\text{GPa}$$

$$\text{Tensión última: } f_{fu} := 1664\text{MPa}$$

$$\text{Deformación unitaria última: } \epsilon_{fu} := 0.0176$$

$$\text{STD} := 0.0013$$

$$\text{Número de capas de fibra: } n := 1$$

$$\text{Ancho fibra: } w_f := b = 152 \cdot \text{mm}$$

2. Capacidad del refuerzo FRCM

En el ensayo las propiedades de la fibra fueron obtenidas a partir de un ensayo a tracción, como indica la AC 434.

$$\text{Deformación de diseño FRCM: } \epsilon_{fd} := \epsilon_{fu} - \text{STD} = 0.0163$$

$$\text{Deformación unitaria efectiva a tracción de diseño FRCM: } \epsilon_{fe} := \min(\epsilon_{fd}, 0.012) = 0.012$$

$$\text{Tensión efectiva a tracción de diseño FRCM: } f_{fe} := \epsilon_{fe} \cdot Ef = 1536 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Deformación existente en probeta: } \epsilon_{bi} := 0$$

Ubicación eje neutro:

$$\epsilon_{fe}(cu) := \begin{cases} \left[0.003 \cdot \frac{(h - cu)}{cu} - \epsilon_{bi} \right] & \text{if } 0.003 \cdot \frac{(h - cu)}{cu} - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fe} \\ \epsilon_{fe} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\epsilon_c(cu) := (\epsilon_{fe}(cu) + \epsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{cu}{h - cu} \right)$$

$$\epsilon_s(cu) := (\epsilon_{fe}(cu) + \epsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - cu}{h - cu} \right)$$

$$f_s(cu) := \begin{cases} (\epsilon_s(cu) \cdot E_s) & \text{if } \epsilon_s(cu) \cdot E_s \leq f_y \\ f_y & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$f_{fe}(cu) := E_f \cdot \epsilon_{fe}(cu)$$

$$\epsilon_{pc} := 1.7 \frac{f_c}{E_c} = 0.00195$$

$$\beta_1(cu) := \frac{4\epsilon_{pc} - \epsilon_c(cu)}{6\epsilon_{pc} - 2\epsilon_c(cu)}$$

$$\alpha_1(cu) := \frac{3\epsilon_{pc} \cdot \epsilon_c(cu) - \epsilon_c(cu)^2}{3 \cdot \beta_1(cu) \cdot \epsilon_{pc}^2}$$

$$cu := \begin{cases} cu \leftarrow 0.2 \cdot d \\ co \leftarrow d \\ \text{while } cu \leq d \\ \quad \left| \begin{array}{l} cu \leftarrow \frac{A_s \cdot f_s(cu) + A_f \cdot n \cdot wf \cdot f_{fe}(cu)}{\alpha_1(cu) \cdot f_c \cdot \beta_1(cu) \cdot b} \\ \text{break if } \left(\text{round} \left(\left| \frac{cu - co}{co} \right|, 4 \right) < 0.01\% \right) \\ co \leftarrow cu \end{array} \right. \\ cu \end{cases}$$

$$\text{Capacidad acero: } M_{ns} := A_s \cdot f_s(cu) \cdot \left(d - \frac{\beta_1(cu) \cdot cu}{2} \right) = 18.4 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{Capacidad refuerzo: } M_{nf} := (n \cdot A_f \cdot wf) \cdot f_{fe}(cu) \cdot \left(df - \frac{\beta_1(cu) \cdot cu}{2} \right) = 3.1 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{Capacidad probeta reforzada: } M_n := M_{ns} + M_{nf} = 21.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Coefficiente de reduccion:

$$\phi_m := \begin{cases} 0.9 & \text{if } \epsilon_s(cu) \geq 0.005 \\ 0.65 + 0.25 \cdot \frac{(\epsilon_s(cu) - \epsilon_y)}{0.005 - \epsilon_y} & \text{if } \epsilon_y < \epsilon_s(cu) < 0.005 \\ 0.65 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\phi_m = 0.9$$

$$\phi M_n := \phi_m \cdot (M_{ns} + M_{nf}) = 19 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{Carga máxima: } P_{max} := M_n \cdot \frac{4}{L} = 56.5 \cdot \text{kN}$$

Loreto et al. (2006)

1. Propiedades de los Materiales

A continuación se presentan las propiedades de los materiales utilizados en el ensayo.

Propiedades Geométricas

Probeta rectangular

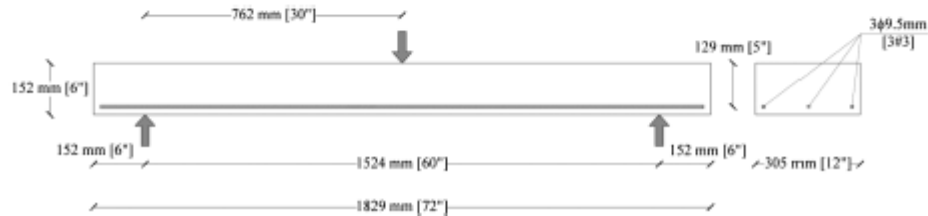
Largo: $L := 1524\text{mm}$

Ancho: $b := 305\text{mm}$

Alto: $h := 152\text{mm}$

Distacia al refuerzo: $df := h = 152\text{mm}$

Distancia al acero de refuerzo: $d := h - 19\text{mm} = 133\text{mm}$



Propiedades Hormigón

Resistencia a compresión: $f_c := 42.4\text{MPa}$

Deformación última: $\epsilon_{cu} := 0.003$

Módulo de elasticidad: $E_c := 30.4\text{GPa}$

Propiedades Acero

Área acero de refuerzo: $A_s := 3 \cdot \pi \cdot \frac{(9.5\text{mm})^2}{4} = 2.13 \cdot \text{cm}^2$

Tensión de fluencia: $f_y := 413\text{MPa}$

Módulo de elasticidad: $E_s := 200\text{GPa}$

Deformación unitaria de fluencia: $\epsilon_y := \frac{f_y}{E_s}$

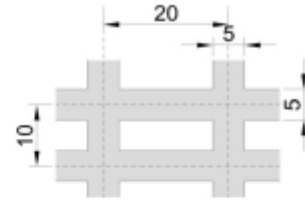
Cuantía: $\rho_s := \frac{A_s}{d \cdot b} = 0.005$

Propiedades de la malla FRCM

Malla de fibra de PBO

Propiedades entregadas por el proveedor

$$\begin{aligned} \text{Área por unidad de ancho:} \quad A_f &:= 0.0457 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}} \\ \text{Cuantía fibra} \quad \rho_f &:= \frac{A_f \cdot b}{d \cdot b} = 0.00034 \end{aligned}$$



Propiedades a partir de ensayo a tracción según AC 434

Módulo de elasticidad: $E_f := 137\text{GPa}$

Tensión última: $f_{fu} := 1058\text{MPa}$

Deformación unitaria última: $\varepsilon_{fu} := 0.00642$

$$\text{STD} := 0.00115$$

Ancho fibra: $w_f := b = 305 \cdot \text{mm}$

Número de capas de fibra: $n := 4$

2. Capacidad del refuerzo FRCM

En el ensayo las propiedades de la fibra fueron obtenidas a partir de un ensayo a tracción, como indica la AC 434.

Deformación de diseño FRCM: $\varepsilon_{fd} := \varepsilon_{fu} - \text{STD} = 0.0053$

Deformación unitaria efectiva a tracción de diseño FRCM: $\varepsilon_{fe} := \min(\varepsilon_{fd}, 0.012) = 0.0053$

Tensión efectiva a tracción de diseño FRCM: $f_{fe} := \varepsilon_{fe} \cdot E_f = 722 \cdot \text{MPa}$

Deformación existente en probeta: $\varepsilon_{bi} := 0$

Ubicación eje neutro:

$$\varepsilon_{fe}(cu) := \begin{cases} \left[0.003 \cdot \frac{(h - cu)}{cu} - \varepsilon_{bi} \right] & \text{if } 0.003 \cdot \frac{(h - cu)}{cu} - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fe} \\ \varepsilon_{fe} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\varepsilon_c(cu) := (\varepsilon_{fe}(cu) + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{cu}{h - cu} \right)$$

$$\varepsilon_s(cu) := (\varepsilon_{fe}(cu) + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - cu}{h - cu} \right)$$

$$f_s(cu) := \begin{cases} (\varepsilon_s(cu) \cdot E_s) & \text{if } \varepsilon_s(cu) E_s \leq f_y \\ f_y & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$f_{fe}(cu) := E_f \cdot \varepsilon_{fe}(cu)$$

$$\varepsilon_{pc} := 1.7 \frac{f_c}{E_c} = 0.00237$$

$$\beta_1(cu) := \frac{4\varepsilon_{pc} - \varepsilon_c(cu)}{6\varepsilon_{pc} - 2\varepsilon_c(cu)}$$

$$\alpha_1(cu) := \frac{3\varepsilon_{pc} \cdot \varepsilon_c(cu) - \varepsilon_c(cu)^2}{3 \cdot \beta_1(cu) \cdot \varepsilon_{pc}^2}$$

$$cu := \begin{cases} cu \leftarrow 0.2d \\ co \leftarrow d \\ \text{while } cu \leq d \\ \quad \begin{cases} cu \leftarrow \frac{A_s \cdot f_s(cu) + A_f \cdot n \cdot w_f \cdot f_{fe}(cu)}{\alpha_1(cu) \cdot f_c \cdot \beta_1(cu) \cdot b} \\ \text{break if } \left(\text{round} \left(\left| \frac{cu - co}{co} \right|, 4 \right) < 5\% \right) \\ co \leftarrow cu \end{cases} \\ cu \end{cases}$$

cu = 25.1 · mm

Capacidad acero: $M_{ns} := A_s \cdot f_s(cu) \cdot \left(d - \frac{\beta_1(cu) \cdot cu}{2} \right) = 10.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

Capacidad refuerzo: $M_{nf} := (n \cdot A_f \cdot w_f) \cdot f_{fe}(cu) \cdot \left(df - \frac{\beta_1(cu) \cdot cu}{2} \right) = 5.8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

Capacidad probeta reforzada: $M_n := M_{ns} + M_{nf} = 16.7 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

Coefficiente de reduccion: $\phi_m := \begin{cases} 0.9 & \text{if } \varepsilon_s(cu) \geq 0.005 \\ 0.65 + 0.25 \cdot \frac{(\varepsilon_s(cu) - \varepsilon_y)}{0.005 - \varepsilon_y} & \text{if } \varepsilon_y < \varepsilon_s(cu) < 0.005 \\ 0.65 & \text{otherwise} \end{cases}$

$$\phi_m = 0.856$$

$$\phi M_n := \phi_m \cdot (M_{ns} + M_{nf}) = 14 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Carga máxima: $P_{max} := M_n \cdot \frac{4}{L} = 43.8 \cdot \text{kN}$

A.2.Capacidad a Corte

Triantafillou et al. (2006)

1. Propiedades de los Materiales

A continuación se presentan las propiedades de los materiales utilizados en el ensayo.

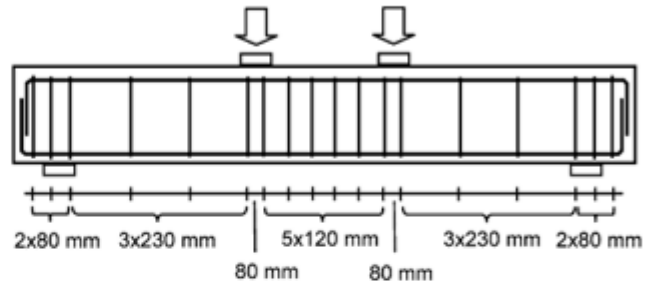
Propiedades Geometricas

Probeta Rectangular

Largo: $L := 222\text{cm}$

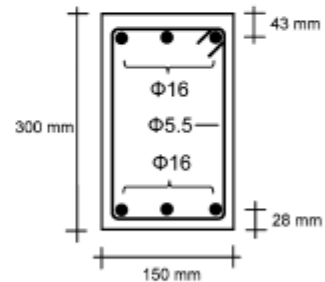
Ancho: $b_w := 150\text{mm}$

Alto: $h := 300\text{mm}$



Distancia al acero de refuerzo: $d := 272\text{mm}$

Distancia al refuerzo: $d_f := d = 272\text{-mm}$



Propiedades Hormigón

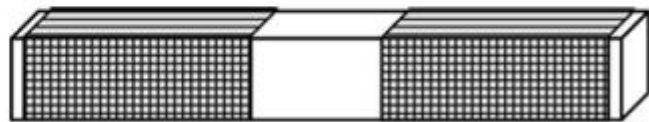
Resistencia a compresión: $f_{cp} := 30.5\text{MPa}$

Módulo de elasticidad: $E_c := 4700 \cdot \sqrt{f_{cp} \cdot \text{MPa}} = 25.957 \cdot \text{GPa}$

Propiedades Acero de los Estribos

Área acero de refuerzo: $A_v := 2 \cdot \pi \cdot \frac{(5.5\text{mm})^2}{4} = 0.475 \cdot \text{cm}^2$

Tensión de fluencia: $f_{yt} := 275\text{MPa}$



Propiedades de la malla FRCM

Malla de fibra de carbono

Espaciamiento entre fibras: $S := 10\text{mm}$

Ángulo de disposición de fibras según dirección:

$$\beta_1 := 90\text{deg} - 10\text{deg} \quad s_1 := \frac{S}{\sin(\beta_1)} = 10.15\text{ mm}$$

$$\beta_2 := 10\text{deg} \quad s_2 := \begin{cases} \infty \cdot \text{mm} & \text{if } \beta_2 = 0\text{deg} \\ \frac{S}{\sin(\beta_2)} & \text{if } \beta_2 \neq 0 \end{cases} \quad s_2 = 57.59\text{ mm}$$

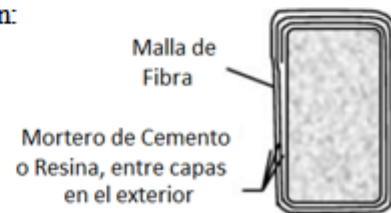
Espesor fibras: $tf := 0.047\text{mm}$

Ancho fibras: $wf := 4\text{mm}$

Área efectiva a corte por unidad de ancho según dirección:

$$Af_1 := 2 \cdot \frac{wf \cdot tf}{s_1} = 0.037 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$Af_2 := 2 \cdot \frac{wf \cdot tf}{s_2} = 0.00653 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$



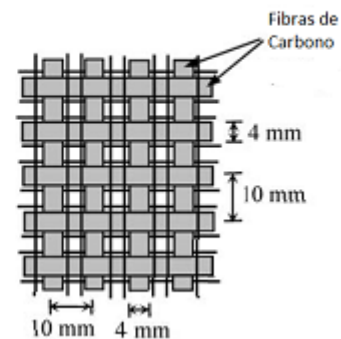
Propiedades entregadas por el proveedor

Módulo de elasticidad: $Ef := 225\text{GPa}$

Tensión última: $ffu := 3350\text{MPa}$

Deformación unitaria última: $\epsilon_{fu} := \frac{ffu}{Ef} = 0.015$

Número de capas de fibra: $n := 2$



2. Capacidad a corte probeta sin refuerzo

Capacida probeta:	$V_n := 116.5\text{kN}$	Considero falla real de la probeta sin refuerzo como capacidad al corte
Factor de reducción:	$\phi_v := 0.75$	
Capacidad minorada:	$\phi_v \cdot V_n = 87.375\text{·kN}$	

3. Capacidad del refuerzo FRCM

En el ensayo las propiedades de la fibra fueron provistas por el proveedor y no obtenidas a partir de un ensayo a tracción, como indica la AC 434, por lo que a falta de información más acabada la deformación de diseño se tomará como la deformación última por un factor de reducción especificado en la AC 434.

Deformación de diseño FRCM: $\varepsilon_{fd} := 0.55\varepsilon_{fu} = 0.0082$

Deformación unitaria efectiva a tracción de diseño FRCM:

$$\varepsilon_{fv} := \min(\varepsilon_{fd}, 0.004) = 0.004$$

Tensión efectiva a tracción de diseño FRCM: $ff_v := \varepsilon_{fv} \cdot E_f = 900\text{·MPa}$

Capacidad a corte refuerzo: $V_f := n \cdot \left[\sum_{i=1}^2 [A_{f_i} \cdot (\sin(\beta_i) + \cos(\beta_i)) \cdot ff_v \cdot df] \right] = 24.7\text{·kN}$

Capacidad probeta reforzada: $V_{nf} := (V_n + V_f) = 141.2\text{·kN}$

$$\phi V_{nf} := \phi_v \cdot (V_{nf}) = 105.9\text{·kN}$$

A.3.Capacidad Axial

Triantafillou et al. 2006.

1. Propiedades de los Materiales

A continuación se presentan las propiedades de los materiales utilizados.

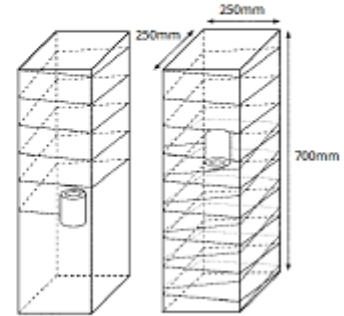
Propiedades Geométricas de la Probeta

Probeta Rectangular

$$b := 250\text{mm}$$

$$h := b = 250\text{-mm}$$

$$A_g := b \cdot h = 625 \cdot \text{cm}^2$$



Propiedades del Hormigón

$$f_{cp} := 14.25\text{MPa}$$

$$E_c := 4700 \cdot \sqrt{f_{cp} \cdot \text{MPa}} = 17.742 \cdot \text{GPa}$$

Propiedades de la malla FRCM

Malla de fibra de carbono

Propiedades entregadas por el proveedor

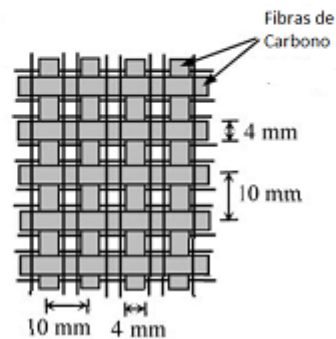
Área por unidad de ancho: $A_f := 0.05137 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$

Módulo de elasticidad: $E_f := 225\text{GPa}$

Tensión última: $f_{fu} := 3350\text{MPa}$

Deformación última: $\varepsilon_{fu} := \frac{f_{fu}}{E_f} = 0.015$

Número de capas de fibra: $n := 4$



2. Capacidad axial probeta sin refuerzo

Se destaca que en este caso la probeta ensayada no poseía acero de refuerzo.

Capacidad probeta rectangular: $P_n := 0.85 \cdot f_{cp} \cdot A_g = 757 \cdot \text{kN}$

Factor de reducción: $\phi := 0.65$

Capacidad minorada: $\phi P_n := \phi \cdot P_n = 492 \cdot \text{kN}$

3. Capacidad del refuerzo FRCM

En el ensayo las propiedades de la fibra fueron provistas por el proveedor y no obtenidas a partir de un ensayo a tracción, como indica la AC 434, por lo que a falta de información más acabada la deformación de diseño se tomará como la deformación última por un factor de reducción especificado en la AC 434.

Deformación de diseño FRCM: $\varepsilon_{fd} := 0.55\varepsilon_{fu}$

Deformación unitaria efectiva a tracción de diseño FRCM: $\varepsilon_{fe} := \min(\varepsilon_{fd}, 0.012) = 0.0082$

Radio borde: $r_c := 15\text{mm}$

Factores de forma de una sección rectangular:

$$k_a := \left[1 - \frac{\frac{b}{h}(h - 2 \cdot r_c)^2 + \frac{h}{b}(b - 2 \cdot r_c)^2}{3 \cdot h \cdot h} \right] \cdot \left(\frac{b}{h} \right)^2 = 0.484$$

$$k_b := \left[1 - \frac{\frac{b}{h}(h - 2 \cdot r_c)^2 + \frac{h}{b}(b - 2 \cdot r_c)^2}{3 \cdot b \cdot h} \right] \cdot \left(\frac{h}{b} \right)^2 = 0.484$$

Presión de confinamiento: $f_l := \frac{2 \cdot n \cdot A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fe}}{\sqrt{b^2 + h^2}} = 2 \cdot \text{MPa}$

Capacidad a compresión del hormigón confinado: $f_{ccp} := f_{cp} + 3.1 \cdot k_a \cdot f_l = 17 \cdot \text{MPa}$

Deformación unitaria última hormigón confinado:

$$\varepsilon_{cp} := \frac{f_{cp}}{E_c} = 0.0008$$

$$\varepsilon_{ccu} := \begin{cases} \left[\varepsilon_{cp} \cdot \left[1.5 + 12 \cdot k_b \cdot \frac{f_l}{f_{cp}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{cp}} \right)^{0.45} \right] \right] & \text{if } \varepsilon_{cp} \cdot \left[1.5 + 12 \cdot k_b \cdot \frac{f_l}{f_{cp}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{cp}} \right)^{0.45} \right] < 0.01 \\ 0.01 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\varepsilon_{ccu} = 0.0032$$

Capacidad probeta confinada: $P_{nf} := 0.85 \cdot f_{ccp} \cdot A_g = 928 \cdot \text{kN}$

$$\phi P_{nf} := \phi \cdot P_{nf} = 603 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Tensión} := \frac{P_{nf}}{A_g} = 14.8 \cdot \text{MPa}$$

B. Anexo B: Cálculo Fuerzas Chimenea

B.1. Efecto Temperatura

1. Propiedades de los materiales

Propiedades del hormigón: $f_{cp} := 31\text{MPa}$
 $E_c := 19000 \cdot \sqrt{f_{cp} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}} = 33.128 \cdot \text{GPa}$

Propiedades del acero: $f_y := 280\text{MPa}$
 $E_s := 200\text{GPa}$

$$n := \frac{E_s}{E_c}$$

2. Esfuerzo Máximos por Temperatura

Variación de temperatura: $T_x := 132 - \frac{(132 - 35.5)}{4} - 35.5 = 72.375 \text{ } ^\circ\text{C}$

Coefficiente térmico de expansión del hormigón y del acero de refuerzo $\alpha_{te} := 1.2 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$

Altura total chimenea: $h := 6096\text{cm}$
 $i := 0..6096 \quad z_i := i \cdot \text{cm} \quad z_{6096} = 6096 \cdot \text{cm}$

Diametro exterior altura: $d_i := \begin{cases} (762.01\text{cm} - 0.05 \cdot z_i) & \text{if } z_i \leq 59.44\text{m} \\ (822.22\text{cm} - 0.0601 \cdot z_i) & \text{if } 59.44\text{m} < z_i \leq h \end{cases}$

Espesor según altura: $t_i := \begin{cases} 0.0028 \cdot z_i + 27.94\text{cm} & \text{if } i \leq 800 \\ 30.48\text{cm} & \text{if } 800 < i \leq 1600 \\ (-0.0181 \cdot z_i + 59.397\text{cm}) & \text{if } 1600 < i \leq 1829 \\ (-0.0046 \cdot z_i + 33.563\text{cm}) & \text{if } 1829 < i \leq 4115 \\ (15.24\text{cm}) & \text{if } i > 4115 \end{cases}$

Área acero de refuerzo vertical plataforma: $Ab_i := \begin{cases} 679\text{cm}^2 & \text{if } i < 1143 \\ 743\text{cm}^2 & \text{if } 1143 \leq i < 2286 \\ 330.6\text{cm}^2 & \text{if } 2286 \leq i < 3429 \\ 450\text{cm}^2 & \text{if } 3429 \leq i < 4572 \\ 387.5\text{cm}^2 & \text{if } 4572 \leq i < 5715 \\ 123.5\text{cm}^2 & \text{if } i \geq 5715 \end{cases}$

Recubrimiento: $r_i := \frac{t_i}{2}$

Área acero de refuerzo circunferencial: $Asv_i := \begin{cases} 8.31\text{cm}^2 & \text{if } i < 3429 \\ 4.68\text{cm}^2 & \text{if } 3429 \leq i \end{cases}$

Área transversal de hormigón: $Ac_i := \pi \frac{(d_i)^2}{4} - \pi \cdot \frac{(d_i - 2 \cdot t_i)^2}{4}$

Área de hormigón en la base de la plataforma por unidad de alto: $Acv_i := t_i \cdot 1\text{m}$ Considero Viga ancho t y altura 1m

Cuantía Vertical externa: $\rho_i := \frac{Ab_i}{Ac_i}$

Cuantía Circunferencial: $\rho p_i := \frac{Asv_i}{Acv_i}$

$\gamma 1_i := 0$ Cuantía área acero vertical interno Solo hay acero centrado, considero externo para cálculo

$\gamma 1 p_i := \frac{0}{\rho p_i}$ Razón área acero circunferencia interno y externo

$\gamma 2_i := \frac{(t_i - r_i)}{t_i}$ Razón de las distancia entre la superficie interior y el refuerzo vertical exterior y el espesor total

$\gamma 2 p_i := \frac{(t_i - r_i)}{t_i}$ Razón de las distancia entre la superficie interior y el refuerzo circunferencial exterior y el espesor total

Ubicación eje neutro esfuerzo vertical

$$\xi_{\text{v}} := -\rho_i \cdot n \cdot (\gamma 1_i + 1) + \sqrt{[\rho_i \cdot n \cdot (\gamma 1_i + 1)]^2 + 2 \cdot \rho_i \cdot n \cdot [\gamma 2_i + \gamma 1_i \cdot (1 - \gamma 2_i)]}$$

Ubicación eje neutro esfuerzo circunferencial

$$c p_i := -\rho p_i \cdot n \cdot (\gamma 1 p_i + 1) + \sqrt{[\rho p_i \cdot n \cdot (\gamma 1 p_i + 1)]^2 + 2 \cdot \rho p_i \cdot n \cdot [\gamma 2 p_i + \gamma 1 p_i \cdot (1 - \gamma 2 p_i)]}$$

2.1 Esfuerzo máximo vertical

Máximo esfuerzo vertical
superficie interna en el hormigón: $f_{ppctv_i} := \alpha_{te} \cdot c_i \cdot T_x \cdot E_c$

Máximo esfuerzo vertical
en la superficie interna en el acero: $f_{ppstv_i} := \alpha_{te} \cdot (c_i - 1 + \gamma_{2i}) \cdot T_x \cdot n \cdot E_s$

Máximo esfuerzo vertical
en la superficie externa en el acero: $f_{stvi} := \alpha_{te} \cdot (\gamma_{2i} - c_i) \cdot T_x \cdot E_s$

2.2 Esfuerzo máximo circunferencial

Máximo esfuerzo circunferencial
en la superficie interna en el hormigón: $f_{ppctc_i} := \alpha_{te} \cdot c_{p_i} \cdot T_x \cdot E_c$

Máximo esfuerzo circunferencial
en la superficie externa en el acero: $f_{stc_i} := \alpha_{te} \cdot (\gamma_{2p_i} - c_{p_i}) \cdot T_x \cdot E_s$

3. Cálculos Propiedades de los Materiales

El efecto de la temperatura se traduce en una modificación de las propiedades de los materiales utilizados, por lo que en el análisis de las combinaciones de carga que incluyan la temperatura, se deben modificar los valores de la fluencia del acero y de la resistencia a compresión del hormigón.

3.1 Capacidad de momento nominal

Se recalculan las propiedades de los materiales según la altura:

Resistencia a compresión hormigón: $f_{ppcn_i} := f_{cp} - 1.2 \cdot f_{ppctv_i}$

Fluencia del acero: $f_{ypn_i} := f_y - \frac{1.2}{1 + \gamma_{1i}} \cdot (f_{stvi} - \gamma_{1i} \cdot f_{ppstv_i})$

Como valores de diseño se definen los menores:

Resistencia a compresión hormigón: $f_{ppcnF} := \min(f_{ppcn}) = 22.75 \cdot \text{MPa}$

Fluencia del acero: $f_{ypnF} := \min(f_{ypn}) = 207.69 \cdot \text{MPa}$

3.2 Capacidad de momento circunferencial

Se recalculan las propiedades de los materiales según la altura:

Resistencia a compresión hormigón: $f_{ppcc_i} := f_{cp} - 1.2 \cdot f_{ppctc_i}$

Fluencia del acero: $f_{ypc_i} := f_y - 1.2 \cdot f_{stc_i}$

Como valores de diseño se definen los menores:

Resistencia a compresión hormigón: $f_{ppccF} := \min(f_{ppcc}) = 26.09 \cdot \text{MPa}$

Fluencia del acero: $f_{ypcF} := \min(f_{ypc}) = 198.95 \cdot \text{MPa}$

B.2. Cargas de Viento

1. Velocidad de Diseño Promedio

Velocidad: $v := 87.48 \text{ mph} = 39.1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Factor de Importancia: $I := 1.15$

Velocidad de referencia de diseño: $V_r := I^{0.5} \cdot v = 41.9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$V_{r \text{ mph}} := 93.8$ En mph

Velocidad de diseño promedio:

Altura total chimenea: $h := 6096 \text{ cm}$

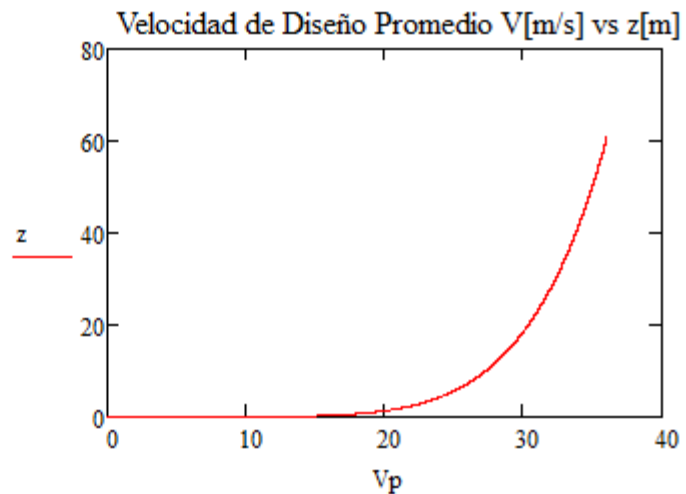
$i := 0..6096$

$z_i := i \cdot \text{cm}$ $z_{6096} = 6096 \cdot \text{cm}$

$$V_{p_i} := 1.47 V_{r \text{ mph}} \cdot \frac{\text{ft}}{\text{s}} \cdot \left(\frac{z_i}{33 \text{ ft}} \right)^{0.154} \cdot 0.65$$

$V_{p_{6096}} = 118.3 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$

$V_{p_{6096}} = 36.1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

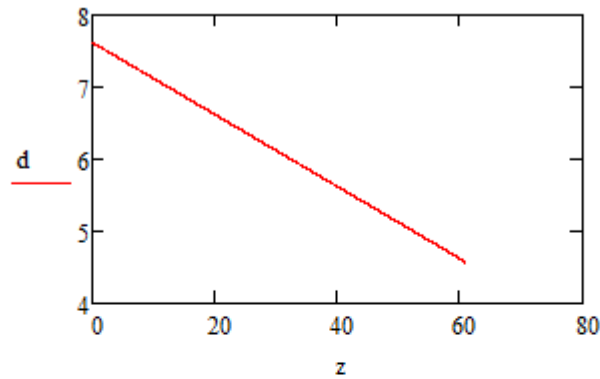


2. Carga Along-Wind

2.1 Carga promedio

Diámetro exterior: $d_i := \begin{cases} (762.01 \text{ cm} - 0.05 \cdot z_i) & \text{if } z_i \leq 59.44 \text{ m} \\ (822.22 \text{ cm} - 0.0601 \cdot z_i) & \text{if } 59.44 \text{ m} < z_i \leq h \end{cases}$

Diametro exterior d [m] en función de la altura [m]



$$\text{Coeficiente de arrastre: } Cdr_i := \begin{cases} 0.65 & \text{if } z_i < h - 1.5 d_{6096} \\ 1.0 & \text{if } z_i \geq h - 1.5 d_{6096} \end{cases}$$

Presión debido a la velocidad de viento promedio:

Para secciones circulares: $K_d := 0.95$

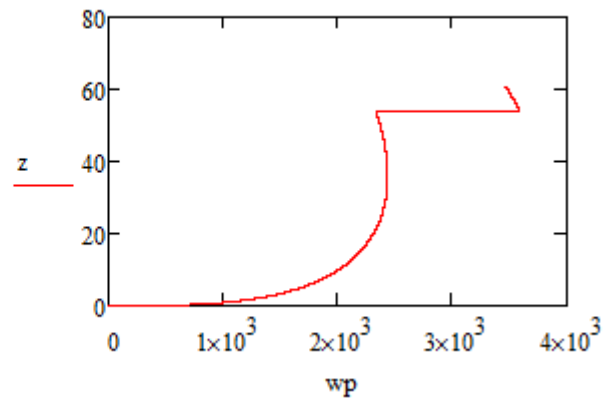
$$pp_i := 0.00119 K_d \cdot \left[\frac{V_{p_i}}{\left(\frac{\text{ft}}{\text{s}} \right)} \right]^2 \cdot \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}$$

Carga promedio: $wp_i := Cdr_i \cdot d_i \cdot pp_i$

$$wp_{5000} = 2.371 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

$$wp_{5000} = 0.267 \cdot \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Carga promedio wp [N/m] vs z[m]



2.2 Carga fluctuante

Periodo natural del primer modo de la chimenea:

$$\gamma h := 2.5 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

$$f_{cp} := 31 \text{MPa}$$

$$E_c := 19000 \sqrt{f_{cp} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}}$$

$$t_b := 30.48 \cdot \text{cm}$$

$$t_h := 15.24 \text{cm}$$

$$T1 := 5 \cdot \frac{h^2}{d_0} \cdot \sqrt{\frac{\gamma h}{Ec}} \cdot \left(\frac{t_h}{t_b}\right)^{0.3} = 0.518 \text{ s}$$

Momento en la base debido a la carga promedio:

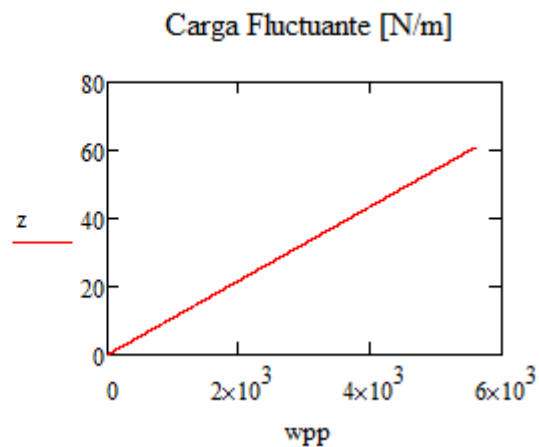
$$M_{wp} := \left[\sum_{i=1}^{6096} \left[w_{p_i} \cdot 1 \text{cm} \cdot \left(z_{i-1} + \frac{z_i}{2} \right) \right] \right] = 816 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

$$\text{Factor de ráfaga: } G_{wp} := 0.3 + 11 \cdot \frac{\left[\frac{(T1 \cdot V_{p1000})}{\text{ft}} \right]^{0.47}}{\left[\frac{(h + 16 \text{ft})}{\text{ft}} \right]^{0.86}} = 0.956$$

Carga fluctuante

$$w_{p_i} := 3.0 \cdot z_i \cdot G_{wp} \cdot \frac{M_{wp}}{h^3}$$

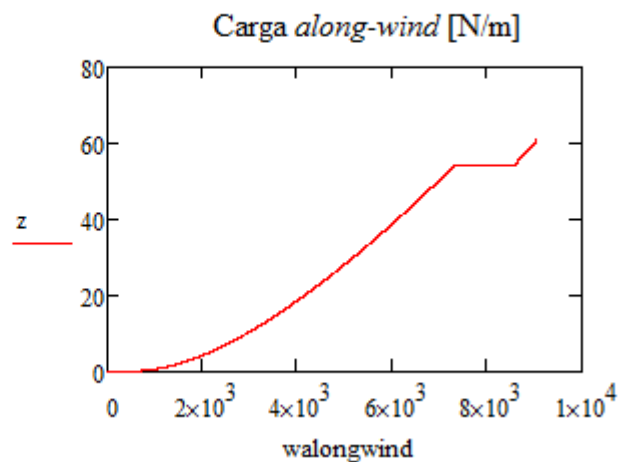
$$w_{p6096} = 5.604 \times 10^3 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$



2.3 Carga *along-wind* = Promedio + Fluctuaciones

$$w_{\text{alongwind}_i} := w_{p_i} + w_{p_i}$$

$$w_{\text{alongwind}_{6096}} = 1 \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$



3. Carga *Across-Wind*

3.1 Verificación consideración *Across-Wind*

Periodo Primer Modo $T_1 = 0.518 \text{ s}$

Periodo Segundo Modo

$$T_2 := 0.82 \cdot \frac{h^2}{d_0} \cdot \sqrt{\frac{\gamma h}{Ec}} \cdot \left(\frac{th}{tb}\right)^{0.09} \cdot \left(\frac{d_{6096}}{d_0}\right)^{-0.22} \quad T_2 = 0.11 \text{ s}$$

Altura crítica $z_{cr} := 5 \cdot \frac{h}{6} = 50.8 \text{ m}$

Frecuencia primer modo $f_1 := \frac{1}{T_1} = 1.93 \frac{1}{\text{s}}$

Promedio de diametro exterior superior chimenea:

$$d_u := \frac{\sum_{i = \frac{2 \cdot 6096}{3} + 1}^{6096} d_i}{6096 - \left(\frac{2 \cdot 6096}{3} + 1\right)} = 5.08 \cdot \text{m}$$

Parámetro de Strouhal:

$$F1A := \begin{cases} 0.333 + 0.206 \ln\left(\frac{h}{d_u}\right) & \text{if } 0.6 < 0.333 + 0.206 \ln\left(\frac{h}{d_u}\right) < 1 \\ 0.6 & \text{if } 0.333 + 0.206 \ln\left(\frac{h}{d_u}\right) \leq 0.6 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Número de Strouhal: $St := 0.25 \cdot F1A = 0.211$

Velocidad Promedio Crítica $V_{p_{z_{cr}}} = 35.1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Velocidad crítica carga de viento *across-wind*

Primero Modo: $V_{cr1} := f_1 \cdot \frac{d_u}{St} = 46.4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Segundo Modo: $V_{cr2} := 5 \frac{d_u}{T_2} = 230.9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$$\text{Primermodo} := \begin{cases} \text{"Análisis Necesario"} & \text{if } V_{cr1} \geq 0.5 V_{p \frac{z_{cr}}{cm}} \wedge V_{cr1} \leq 1.3 V_{p \frac{z_{cr}}{cm}} \\ \text{"Análisis No Necesario"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Primermodo = "Análisis No Necesario"

$$\text{Segundomodo} := \begin{cases} \text{"Análisis Necesario"} & \text{if } V_{cr2} \geq 0.5 V_{p \frac{z_{cr}}{cm}} \wedge V_{cr2} \leq 1.3 V_{p \frac{z_{cr}}{cm}} \\ \text{"Análisis No Necesario"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Segundomodo = "Análisis No Necesario"

C.Anexo C: Cálculo Capacidad Chimenea Reforzada

C.1. Flexión Nominal

A continuación se adjunta el cálculo realizado para la verificación de la capacidad y de las condiciones de diseño a una altura de 0m.

1. Propiedades de los materiales

Hormigón	$f_{cp} := 22.75\text{MPa}$	Acero	$f_y := 207.69\text{MPa}$ (Tabla 7-8)
	$E_c := 19000 \sqrt[3]{f_{cp} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}}$		$E_s := 200\text{GPa}$
	$e_{cu} := 0.003$		$e_{su} := 0.07$

2. Geometría Sección (Ref. Planos)

Diámetro externo: $d_{ext} := 7620\text{mm}$

Espesor: $t := 27.9\text{cm}$

Radio: $r := \frac{d_{ext} - t}{2} = 3.671\text{m}$

Apertura: $\beta := 0\text{deg}$ No hay apertura

3. Propiedades del Refuerzo FRCM

Malla de fibra de Carbono

Propiedades obtenidas mediante ensayo a tracción (Ref. Sandoval 2014)

Área por unidad de ancho: $A_f := 47 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

Cuantía fibra: $\rho_f := \frac{A_f \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left(r + \frac{t}{2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{(d_{ext} - t)}{2} \cdot t} = 0.00017$

Módulo de elasticidad: $E_f := 2162.7\text{MPa}$ (Tabla 7-6)

Tensión última: $f_{fu} := 445.14\text{MPa}$

Deformación unitaria última: $\varepsilon_{fu} := 0.091$
STD := 0.015

Ancho fibra: $w_f(\alpha) := 2 \cdot \frac{(\pi - \alpha)}{\text{rad}} \cdot \left(r + \frac{t}{2}\right)$

Número de capas de fibra: $n := 1$

Deformación de diseño FRCM: $\epsilon_{fd} := \epsilon_{fu} - STD = 0.076$

Deformación unitaria efectiva a tracción de diseño FRCM: $\epsilon_{feu} := \min(\epsilon_{fd}, 0.012) = 0.012$

Tensión efectiva a tracción de diseño FRCM: $f_{fe} := \epsilon_{feu} \cdot E_f = 26 \text{ MPa}$

Deformación existente en probeta: $\epsilon_{bi} := 0$

4. Solicitaciones

Momento solicitante: $M_u := 4828.7 \text{ tonf m}$ (Tabla 7-11)

Compresión solicitante: $P_u := 1073.38 \text{ tonf}$

5. Cálculo Capacidad

Cuantía vertical $\rho_t := 1.045\%$ (Ref. Planos)

$$\beta_1 := \begin{cases} 0.85 & \text{if } f_{cp} \leq 28 \text{ MPa} \\ 0.85 - \frac{0.05 \cdot \left(\frac{f_{cp}}{\text{MPa}} - 28 \right)}{1000} & \text{if } 28 \text{ MPa} < f_{cp} \leq 56 \text{ MPa} \\ 0.65 & \text{if } f_{cp} > 56 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$\beta_1 = 0.85$$

Deformación unitaria FRCM

$$\epsilon_{fe}(\alpha) := \begin{cases} \left[\frac{e_{cu} \cdot \left(r + \frac{t}{2} \right) \cdot (1 + \cos(\alpha))}{r \cdot (1 - \cos(\alpha))} \right] & \text{if } \frac{e_{cu} \cdot \left(r + \frac{t}{2} \right) \cdot (1 + \cos(\alpha))}{r \cdot (1 - \cos(\alpha))} \leq \epsilon_{feu} \\ \epsilon_{feu} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Deformación unitaria hormigón

$$\epsilon_m(\alpha) := \begin{cases} \frac{\epsilon_{fe}(\alpha) \cdot r \cdot (1 - \cos(\alpha))}{\left(r + \frac{t}{2} \right) \cdot (1 + \cos(\alpha))} & \text{if } \frac{\epsilon_{fe}(\alpha) \cdot r \cdot (1 - \cos(\alpha))}{\left(r + \frac{t}{2} \right) \cdot (1 + \cos(\alpha))} < e_{cu} \\ e_{cu} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Deformación unitaria acero

$$\epsilon_{st}(\alpha) := \begin{cases} \frac{\epsilon_{fe}(\alpha) \cdot r \cdot (1 + \cos(\alpha))}{\left(r + \frac{t}{2} \right) \cdot (1 + \cos(\alpha))} & \text{if } \frac{\epsilon_{fe}(\alpha) \cdot r \cdot (1 + \cos(\alpha))}{\left(r + \frac{t}{2} \right) \cdot (1 + \cos(\alpha))} < \epsilon_{su} \\ \epsilon_{su} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Parámetro de corrección de esfuerzo a compresión en el hormigón , Q.

$$Q(\alpha) := \begin{cases} \left[-0.523 + 0.181\alpha - 0.0154\alpha^2 + \left(41.3 - 13.2\alpha + 1.32\alpha^2 \right) \frac{t}{r} \right] & \text{if } \alpha \leq 5\text{deg} \\ \left[-0.154 + 0.01773\alpha + 0.00249\alpha^2 + \left(16.42 - 1.98\alpha + 0.0674\alpha^2 \right) \frac{t}{r} \right] & \text{if } 5\text{deg} < \alpha \leq 10\text{deg} \\ \left[-0.488 + 0.076\alpha + \left(9.758 - 0.64\alpha \right) \frac{t}{r} \right] & \text{if } 10\text{deg} < \alpha \leq 17\text{deg} \\ \left[-1.345 + 0.2018\alpha - 0.004434\alpha^2 + \left(15.83 - 1.676\alpha + 0.03994\alpha^2 \right) \frac{t}{r} \right] & \text{if } 17\text{deg} < \alpha \leq 25\text{deg} \\ \left[0.993 - 0.00258\alpha + \left(-3.27 + 0.0862\alpha \right) \frac{t}{r} \right] & \text{if } 25\text{deg} < \alpha \leq 35\text{deg} \\ 0.89 & \text{if } \alpha > 35\text{deg} \end{cases}$$

$$\tau(\alpha) := \text{acos}[1 - \beta_1 \cdot (1 - \cos(\alpha))]$$

$$\text{coseno}\psi(\alpha) := \begin{cases} \left[\cos(\alpha) - \left[\frac{f_y}{E_s} \cdot \left(\frac{1 - \cos(\alpha)}{\epsilon_m(\alpha)} \right) \right] \right] & \text{if } \left[\cos(\alpha) - \left[\frac{f_y}{E_s} \cdot \left(\frac{1 - \cos(\alpha)}{\epsilon_m(\alpha)} \right) \right] \right] \geq -1 \\ (-1) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{coseno}\mu(\alpha) := \begin{cases} \left[\cos(\alpha) + \frac{f_y}{E_s} \cdot \left(\frac{1 - \cos(\alpha)}{\epsilon_m(\alpha)} \right) \right] & \text{if } \cos(\alpha) + \frac{f_y}{E_s} \cdot \left(\frac{1 - \cos(\alpha)}{\epsilon_m(\alpha)} \right) < 1 \\ (1) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{coseno}\gamma(\alpha) := \begin{cases} \left[\cos(\alpha) - \left[\epsilon_{feu} \cdot \left(\frac{1 - \cos(\alpha)}{e_{cu}} \right) \right] \right] & \text{if } \left[\cos(\alpha) - \left[\epsilon_{feu} \cdot \left(\frac{1 - \cos(\alpha)}{e_{cu}} \right) \right] \right] \geq -1 \\ (-1) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\psi(\alpha) := \text{acos}(\text{coseno}\psi(\alpha))$$

$$\mu(\alpha) := \text{acos}(\text{coseno}\mu(\alpha))$$

$$\gamma(\alpha) := \text{acos}(\text{coseno}\gamma(\alpha))$$

Fuerza Hormigón a Compresión τ

$$P(\alpha) := 2 \cdot (\tau(\alpha) - \beta) \cdot r \cdot t \cdot 0.85 \cdot f_{cp} \cdot Q(\alpha)$$

Fuerza Acero a Compresión en fluencia $0-\mu$

$$S1(\alpha) := 2 \cdot \mu(\alpha) \cdot p_t \cdot r \cdot t \cdot f_y$$

Fuerza Acero a Compresión bajo fluencia $\mu-\alpha$

$$S2(\alpha) := 2 \cdot \int_{\mu(\alpha)}^{\alpha} \frac{r \cdot (\cos(\theta) - \cos(\alpha))}{r \cdot (1 - \cos(\alpha))} \varepsilon m(\alpha) \cdot E_s \cdot \rho t \cdot r \cdot t \, d\theta$$

Fuerza Acero a Tracción bajo fluencia $\alpha-\psi$

$$S3(\alpha) := 2 \cdot \int_{\alpha}^{\psi(\alpha)} \frac{r \cdot (\cos(\alpha) - \cos(\theta))}{r \cdot (1 - \cos(\alpha))} \varepsilon m(\alpha) \cdot E_s \cdot \rho t \cdot r \cdot t \, d\theta$$

Fuerza Acero a Tracción en fluencia $\psi-\pi$

$$S4(\alpha) := 2 \cdot (\pi - \psi(\alpha)) \cdot \rho t \cdot r \cdot t \cdot f_y$$

Fuerza FRCM a Tracción bajo tensión de diseño $\alpha-\gamma$

$$FRCM1(\alpha) := 2 \cdot \int_{\alpha}^{\gamma(\alpha)} \frac{\left(r + \frac{t}{2}\right) \cdot (\cos(\alpha) - \cos(\theta))}{r \cdot (1 - \cos(\alpha))} e_{cu} \cdot E_f \cdot n \cdot \rho f \cdot r \cdot t \, d\theta$$

Fuerza FRCM a Tracción en tensión de diseño $\gamma-\pi$

$$FRCM2(\alpha) := 2 \cdot (\pi - \gamma(\alpha)) \cdot n \cdot \rho f \cdot r \cdot t \cdot f_{fe}$$

Ubicación eje neutro

$$\alpha := \begin{cases} \alpha \leftarrow 1 \text{deg} \\ \text{while } \alpha < \frac{\pi}{2} \\ \quad \left| \begin{array}{l} SF \leftarrow P(\alpha) + S1(\alpha) + S2(\alpha) - S3(\alpha) - S4(\alpha) - FRCM1(\alpha) - FRCM2(\alpha) \\ \text{break if } \left(\text{round} \left(\left| \frac{Pu - SF}{SF} \right|, 4 \right) < 5\% \right) \\ \alpha \leftarrow \alpha + 0.01 \text{deg} \end{array} \right. \\ \alpha = 35.01 \cdot \text{deg} \end{cases}$$

$$SF := P(\alpha) + S1(\alpha) + S2(\alpha) - S3(\alpha) - S4(\alpha) = 1128.06 \cdot \text{tonf}$$

$$Pu = 1073.38 \cdot \text{tonf}$$

Momento Fuerza Hormigón a Compresión τ

$$MP(\alpha) := 2 \cdot r \cdot t \cdot 0.85 \cdot f_{cp} \cdot Q(\alpha) \cdot \left[\tau(\alpha) \cdot \left(\frac{r \cdot \sin(\tau(\alpha))}{\tau(\alpha)} - r \cdot \cos(\alpha) \right) - \int_0^{\beta} r \cdot (\cos(\theta) - \cos(\alpha)) \, d\theta \right]$$

Fuerza Acero a Compresión en fluencia $0-\mu$

$$MS1(\alpha) := 2 \cdot \int_0^{\mu(\alpha)} r \cdot (\cos(\theta) - \cos(\alpha)) \cdot f_y \cdot \rho_t \cdot r \cdot t \, d\theta$$

Fuerza Acero a Compresión bajo fluencia $\mu-\alpha$

$$MS2(\alpha) := 2 \cdot \int_{\mu(\alpha)}^{\alpha} \frac{r^2 \cdot (\cos(\theta) - \cos(\alpha))^2}{r \cdot (1 - \cos(\alpha))} \cdot \varepsilon_m(\alpha) \cdot E_s \cdot \rho_t \cdot r \cdot t \, d\theta$$

Momento Fuerza Acero a Tracción bajo fluencia $\alpha-\psi$

$$MS3(\alpha) := 2 \cdot \int_{\alpha}^{\psi(\alpha)} \frac{r^2 \cdot (\cos(\alpha) - \cos(\theta))^2}{r \cdot (1 - \cos(\alpha))} \cdot \varepsilon_m(\alpha) \cdot E_s \cdot \rho_t \cdot r \cdot t \, d\theta$$

Momento Fuerza Acero a Tracción en fluencia $\psi-\pi$

$$MS4(\alpha) := 2 \cdot \int_{\psi(\alpha)}^{\pi} r \cdot (\cos(\alpha) - \cos(\theta)) \cdot f_y \cdot \rho_t \cdot r \cdot t \, d\theta$$

Momento Fuerza FRCM a Tracción bajo tensión de diseño $\alpha-\gamma$

$$MFRCM1(\alpha) := 2 \cdot \int_{\alpha}^{\gamma(\alpha)} \frac{\left(r + \frac{t}{2} \right)^2 \cdot (\cos(\alpha) + \cos(\theta))^2}{r \cdot (1 - \cos(\alpha))} \cdot e_{cu} \cdot E_f \cdot n \cdot \rho_f \cdot (r) \cdot t \, d\theta$$

Momento Fuerza FRCM a Tracción en tensión de diseño $\gamma-\pi$

$$MFRCM2(\alpha) := 2 \cdot \int_{\gamma(\alpha)}^{\pi} \left(r + \frac{t}{2} \right) \cdot (\cos(\alpha) - \cos(\theta)) \cdot f_{fe} \cdot \rho_f \cdot r \cdot t \, d\theta$$

Capacidad nominal chimenea

$$M_n := P_u \cdot r \cdot \cos(\alpha) + MP(\alpha) + MS1(\alpha) + MS2(\alpha) + MS3(\alpha) + MS4(\alpha) + MFRCM1(\alpha) + MFRCM2(\alpha)$$

$$M_n = 8696.4 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$\phi := 0.8$$

$$\phi M_n := \phi \cdot M_n = 6957.1 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

$$\text{if}(\phi M_n \geq M_u, \text{"Ok"}, \text{"Insuficiente"}) = \text{"Ok"}$$

Verificación Bajo Condiciones de Servicio, Diseño FRCM

Solicitaciones de Servicio

Momento solicitante: $M_{su} := 3449.1 \text{tonf m}$

(Tabla 7-12)

Compresión solicitante: $P_{su} := 894.5 \text{tonf}$

Cálculo Capacidad

Cuantía vertical $\rho_t := 1.045\%$

Deformación unitaria hormigón

Supuesto: se considera la tensión del hormigón menor a la máxima.

$$\varepsilon_{st} := 0.00062$$

$$\varepsilon_{cc}(\alpha) := \varepsilon_{st} \cdot \frac{r \cdot (1 - \cos(\alpha))}{r \cdot (1 + \cos(\alpha))}$$

$$\text{coseno}\gamma(\alpha) := \begin{cases} \left[\cos(\alpha) - \left[\varepsilon_{feu} \cdot \left(\frac{1 - \cos(\alpha)}{\varepsilon_{cc}(\alpha)} \right) \right] \right] & \text{if} \left[\cos(\alpha) - \left[\varepsilon_{feu} \cdot \left(\frac{1 - \cos(\alpha)}{\varepsilon_{cc}(\alpha)} \right) \right] \right] \geq -1 \\ (-1) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\gamma(\alpha) := \text{acos}(\text{coseno}\gamma(\alpha))$$

Fuerza Hormigón a Compresión τ

$$P_s(\alpha) := 2 \cdot \alpha \cdot r \cdot t \cdot \frac{\varepsilon_{cc}(\alpha) E_c}{2}$$

Fuerza Acero a Compresión $0-\alpha$

$$S_{s1}(\alpha) := 2 \cdot \int_0^\alpha \frac{r \cdot (\cos(\theta) - \cos(\alpha))}{r \cdot (1 - \cos(\alpha))} \varepsilon_{cc}(\alpha) \cdot E_s \cdot \rho_t \cdot r \cdot t \, d\theta$$

Fuerza Acero a Tracción $\alpha-\pi$

$$S_{s2}(\alpha) := 2 \cdot \int_\alpha^\pi \frac{r \cdot (\cos(\alpha) - \cos(\theta))}{r \cdot (1 - \cos(\alpha))} \varepsilon_{cc}(\alpha) \cdot E_s \cdot \rho_t \cdot r \cdot t \, d\theta$$

Fuerza FRCM a Tracción bajo tensión de diseño α - γ

$$FRCMs1(\alpha) := 2 \cdot \int_{\alpha}^{\gamma(\alpha)} \frac{\left(r + \frac{t}{2}\right) \cdot (\cos(\alpha) - \cos(\theta))}{r \cdot (1 - \cos(\alpha))} \varepsilon_{cc}(\alpha) \cdot E_f \cdot n \cdot \rho_f \cdot r \cdot t \, d\theta$$

Fuerza FRCM a Tracción en tensión de diseño γ - π

$$FRCMs2(\alpha) := 2 \cdot (\pi - \gamma(\alpha)) \cdot n \cdot \rho_f \cdot r \cdot t \cdot f_{fe}$$

Ubicación eje neutro

$$\alpha := \left| \begin{array}{l} \alpha \leftarrow 1 \text{deg} \\ \text{while } \alpha < \frac{\pi}{2} \\ \left| \begin{array}{l} SF \leftarrow Ps(\alpha) + Ss1(\alpha) - Ss2(\alpha) - FRCMs1(\alpha) - FRCMs2(\alpha) \\ \text{break if } \left(\text{round} \left(\left| \frac{P_{su} - SF}{SF} \right|, 4 \right) < 1\% \right) \\ \alpha \leftarrow \alpha + 0.01 \text{deg} \end{array} \right. \end{array} \right|_{\alpha}$$

$$\alpha = 70 \cdot \text{deg}$$

$$SF := Ps(\alpha) + Ss1(\alpha) - Ss2(\alpha) - FRCMs1(\alpha) - FRCMs2(\alpha) = 885.8 \cdot \text{tonf}$$

$$P_{su} = 894.5 \cdot \text{tonf}$$

Momento Fuerza Hormigón a Compresión τ

$$MPs(\alpha) := 2 \cdot \alpha \cdot r \cdot t \cdot \frac{\varepsilon_{cc}(\alpha) E_c}{2} \cdot \frac{r \cdot (1 - \cos(\alpha))}{3}$$

Momento Fuerza Acero a Tracción

$$MSs1(\alpha) := 2 \cdot \int_0^{\alpha} \frac{r^2 \cdot (\cos(\theta) - \cos(\alpha))^2}{r \cdot (1 - \cos(\alpha))} \varepsilon_{cc}(\alpha) \cdot E_s \cdot \rho_t \cdot r \cdot t \, d\theta$$

Momento Fuerza Acero a Tracción

$$MSs2(\alpha) := 2 \cdot \int_{\alpha}^{\pi} \frac{r^2 \cdot (\cos(\alpha) - \cos(\theta))^2}{r \cdot (1 - \cos(\alpha))} \varepsilon_{cc}(\alpha) \cdot E_s \cdot \rho_t \cdot r \cdot t \, d\theta$$

Momento Fuerza FRCM a Tracción bajo tensión de diseño α - γ

$$MFRCMs1(\alpha) := 2 \cdot \int_{\alpha}^{\gamma(\alpha)} \frac{\left(r + \frac{t}{2}\right)^2 \cdot (\cos(\alpha) - \cos(\theta))^2}{r \cdot (1 - \cos(\alpha))} \varepsilon_{cc}(\alpha) \cdot E_f \cdot n \cdot \rho_f \cdot r \cdot t \, d\theta$$

Momento Fuerza FRCM a Tracción en tensión de diseño γ - π

$$MFRCMs2(\alpha) := 2 \cdot \int_{\gamma(\alpha)}^{\pi} \left(r + \frac{t}{2}\right) \cdot (\cos(\alpha) - \cos(\theta)) f_{fe} \cdot n \cdot \rho_f \cdot r \cdot t \, d\theta$$

$$M_n := P_{su} \cdot r \cdot \cos(\alpha) + MP_s(\alpha) + MS_s1(\alpha) + MS_s2(\alpha) + MFRCMs1(\alpha) + MFRCMs2(\alpha)$$

$$\varepsilon_{cc1} := \frac{M_{su} - P_{su} \cdot r \cdot \cos(\alpha) - MFRCMs1(\alpha) - MFRCMs2(\alpha)}{\frac{(MS_s1(\alpha) + MS_s2(\alpha) + MP_s(\alpha))}{\varepsilon_{cc}(\alpha)}} = 0.0003$$

$$\varepsilon_{st1} := \varepsilon_{cc1} \cdot \frac{1 + \cos(\alpha)}{1 - \cos(\alpha)} = 0.00062$$

$$\varepsilon_{st} = 0.00062 \quad \text{Se alcanza la convergencia}$$

$$f_{st} := E_s \cdot \varepsilon_{st} = 124 \text{ MPa}$$

Verificación de diseño refuerzo FRCM a flexión bajo condiciones de servicio

Límite de tensiones de servicio del acero a tracción

$$f_{ss} := 0.8 f_y = 166.2 \text{ MPa}$$

$$\text{if}(f_{st} \leq f_{ss}, \text{"Ok"}, \text{"Revisar"}) = \text{"Ok"}$$

Límite de rotura por fluencia y fatiga del refuerzo

$$f_{fs} := f_{ss} \cdot \frac{E_f}{E_s} \left[\frac{\left(r + \frac{t}{2}\right) \cdot (1 + \cos(\alpha))}{r \cdot (1 + \cos(\alpha))} \right] = 1.86 \text{ MPa}$$

$$\text{if}(f_{fs} \leq 0.55 \cdot f_{fe}, \text{"Ok"}, \text{"Revisar"}) = \text{"Ok"}$$

C.2. Flexión Circunferencial

A continuación se adjunta el cálculo realizado para el cálculo de las solicitaciones circunferenciales

1. Momento Circunferencial Solicitante

$$Gr_i := \begin{cases} 4.0 - 0.8 \cdot \log\left(\frac{z_i}{\text{ft}}\right) & \text{if } z_i > 30.48 \text{ cm} \\ 4 & \text{otherwise} \end{cases} \quad 1 \text{ft} = 30.48 \text{ cm}$$

$$pr_i := \begin{cases} pp_i \cdot Gr_i & \text{if } z_i < h - 1.5 d_{6096} \\ [1.5 \cdot (pp_i \cdot Gr_i)] & \text{otherwise} \end{cases}$$

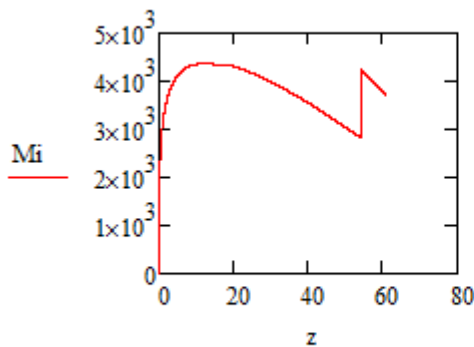
$$\text{Espesor según altura: } t_i := \begin{cases} 0.0028 \cdot z_i + 27.94 \text{ cm} & \text{if } i \leq 800 \\ 30.48 \text{ cm} & \text{if } 800 < i \leq 1600 \\ (-0.0181 \cdot z_i + 59.397 \text{ cm}) & \text{if } 1600 < i \leq 1829 \\ (-0.0046 \cdot z_i + 33.563 \text{ cm}) & \text{if } 1829 < i \leq 4115 \\ (15.24 \text{ cm}) & \text{if } i > 4115 \end{cases}$$

$$\text{Radio según altura: } r_i := \frac{d_i - t_i}{2}$$

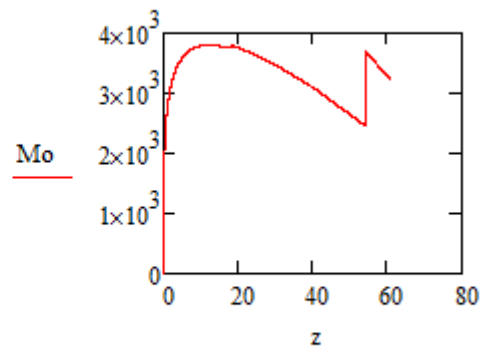
$$\text{Momento, tracción en el interior: } Mi_i := 0.31 \cdot pr_i \cdot (r_i)^2$$

$$\text{Momento, tracción en el exterior: } Mo_i := 0.27 \cdot pr_i \cdot (r_i)^2$$

Momentos Circunferenciales Solicitantes [Nm/m]



$$Mim := \max(Mi) = 0.491 \cdot \text{tonf} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$



$$Mom := \max(Mo) = 0.428 \cdot \text{tonf} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

A continuación se adjunta el cálculo realizado para la verificación de la capacidad de la sección reforzada, a una altura de 0m.

1. Propiedades de los Materiales

A continuación se presentan las propiedades los materiales utilizados en el ensayo.

Propiedades Geométricas

Probeta rectangular

Ancho: $b := 1\text{m}$

Alto: $h := 27.94\text{cm}$

Distacia al refuerzo: $df := h = 279.4\cdot\text{mm}$

Distancia al acero de refuerzo: $d := \frac{h}{2} = 139.7\cdot\text{mm}$

Propiedades Hormigón

Resistencia a compresión: $f_{cp} := 26.09\text{MPa}$

Deformación última: $\epsilon_{cu} := 0.003$

Módulo de elasticidad: $E_c := 19000 \sqrt{f_{cp} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}} = 30.391\cdot\text{GPa}$

Propiedades Acero

Cuantía: $\rho_t := 0.53\%$ (Tabla 7-9)

Tensión de fluencia: $f_y := 198.95\text{MPa}$

Módulo de elasticidad: $E_s := 200\text{GPa}$

Deformación unitaria de fluencia: $\epsilon_y := \frac{f_y}{E_s}$

Propiedades de la malla FRCM

Malla de fibra de PBO

Propiedades entregadas por el proveedor

Área por unidad de ancho: $A_f := 47 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

Cuantía fibra: $\rho_f := \frac{A_f \cdot b}{d \cdot b} = 0.00034$

Módulo de elasticidad: $E_f := 2162.7\text{MPa}$

Tensión última: $f_{fu} := 445.14\text{MPa}$

Deformación unitaria última: $\epsilon_{fu} := 0.091$
 $STD := 0.015$

Número de capas de fibra: $n := 1$

Ancho fibra: $w_f := b$

2. Capacidad Sección

En el ensayo las propiedades de la fibra fueron obtenidas a partir de un ensayo a tracción, como indica la AC 434.

Deformación de diseño FRCM: $\epsilon_{fd} := \epsilon_{fu} - STD = 0.076$

Deformación unitaria efectiva a tracción de diseño FRCM: $\epsilon_{fe} := \min(\epsilon_{fd}, 0.012) = 0.012$

Tensión efectiva a tracción de diseño FRCM: $f_{fe} := \epsilon_{fe} \cdot E_f = 26 \cdot \text{MPa}$

Deformación existente en probeta: $\epsilon_{bi} := 0$

Ubicación eje neutro:

$$\epsilon_{fe}(cu) := \begin{cases} \left[0.003 \cdot \frac{(h - cu)}{cu} - \epsilon_{bi} \right] & \text{if } 0.003 \cdot \frac{(h - cu)}{cu} - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fe} \\ \epsilon_{fe} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\epsilon_c(cu) := (\epsilon_{fe}(cu) + \epsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{cu}{h - cu} \right)$$

$$\epsilon_s(cu) := (\epsilon_{fe}(cu) + \epsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - cu}{h - cu} \right)$$

$$f_s(cu) := \begin{cases} (\epsilon_s(cu) \cdot E_s) & \text{if } \epsilon_s(cu) \cdot E_s \leq f_y \\ f_y & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$f_{fe}(cu) := E_f \cdot \epsilon_{fe}(cu)$$

$$\epsilon_{pc} := 1.7 \frac{f_{cp}}{E_c} = 0.00146$$

$$\beta_1(cu) := \frac{4\epsilon_{pc} - \epsilon_c(cu)}{6\epsilon_{pc} - 2\epsilon_c(cu)}$$

$$\alpha_1(\text{cu}) := \frac{3\varepsilon_{pc} \cdot \varepsilon_c(\text{cu}) - \varepsilon_c(\text{cu})^2}{3 \cdot \beta_1(\text{cu}) \cdot \varepsilon_{pc}^2}$$

$$\text{cu} := \begin{cases} \text{cu} \leftarrow 0.2d \\ \text{co} \leftarrow d \\ \text{while } \text{cu} \leq d \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{cu} \leftarrow \frac{\rho t \cdot h \cdot 1m \cdot f_s(\text{cu}) + A_f \cdot n \cdot w_f \cdot f_{fe}(\text{cu})}{\alpha_1(\text{cu}) \cdot f_{cp} \cdot \beta_1(\text{cu}) \cdot b} \\ \text{break if } \left(\text{round} \left(\left| \frac{\text{cu} - \text{co}}{\text{co}} \right|, 4 \right) < 0.01\% \right) \\ \text{co} \leftarrow \text{cu} \end{array} \right. \\ \text{cu} \end{cases}$$

$$\text{cu} = 21.5 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Capacidad acero: } M_{ns} := \rho t \cdot h \cdot 1m \cdot f_s(\text{cu}) \cdot \left(d - \frac{\beta_1(\text{cu}) \cdot \text{cu}}{2} \right) = 38.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{Capacidad refuerzo: } M_{nf} := (n \cdot A_f \cdot w_f) \cdot f_{fe}(\text{cu}) \cdot \left(d_f - \frac{\beta_1(\text{cu}) \cdot \text{cu}}{2} \right) = 0.3 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{Capacidad probeta reforzada: } M_n := M_{ns} + M_{nf} = 39.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Coefficiente de reduccion:

$$\phi_m := \begin{cases} 0.9 & \text{if } \varepsilon_s(\text{cu}) \geq 0.005 \\ 0.65 + 0.25 \cdot \frac{(\varepsilon_s(\text{cu}) - \varepsilon_y)}{0.005 - \varepsilon_y} & \text{if } \varepsilon_y < \varepsilon_s(\text{cu}) < 0.005 \\ 0.65 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\phi_m = 0.9$$

$$\phi M_n := \phi_m \cdot (M_{ns} + M_{nf}) = 3.97 \cdot \text{tonf} \cdot \text{m}$$

C.3. Corte

A continuación se adjunta el cálculo realizado para la verificación de la capacidad de la sección reforzada y de las condiciones de diseño a una altura de 11.43m.

1. Propiedades de los materiales

Hormigón	$f_{cp} := 31\text{MPa}$	Acero	$f_y := 280\text{MPa}$
	$E_c := 19000 \sqrt{f_{cp} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}}$		$E_s := 200\text{GPa}$
	$e_{cu} := 0.003 \sqrt{f_{cp} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}}$		$e_{su} := 0.07$

2. Geometría Sección

Diámetro externo $d_{ext} := 7048.5\text{mm}$
 Espesor: $t := 30.48\text{cm}$
 Radio: $r := \frac{d_{ext} - t}{2} = 3.372\text{m}$
 Apertura: $\beta := 0\text{deg}$ No hay apertura

3. Propiedades del Refuerzo FRCM

Malla de fibra de Carbono

Espaciamiento entre fibras: $S := 20\text{mm}$

Ángulo de disposición de fibras según dirección:

$$\beta_1 := 90\text{deg} \quad s_1 := \frac{S}{\sin(\beta_1)} = 20\text{mm}$$

$$\beta_2 := 0\text{deg} \quad s_2 := \begin{cases} \infty\text{mm} & \text{if } \beta_2 = 0\text{deg} \\ \frac{S}{\sin(\beta_2)} & \text{if } \beta_2 \neq 0 \end{cases}$$

Espesor fibras: $t_f := 0.047\text{mm}$

Ancho fibras: $w_f := 5\text{mm}$

Área efectiva a corte por unidad de ancho según dirección:

$$A_{f1} := \frac{w_f \cdot t_f}{s_1} = 0.0117 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$A_{f2} := \frac{w_f \cdot t_f}{s_2} = 0 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

Propiedades obtenidas mediante ensayo a tracción

Módulo de elasticidad: $E_f := 2162.7 \text{MPa}$

Tensión última: $ff_u := 445.14 \text{MPa}$

Deformación unitaria última: $\varepsilon_{fu} := 0.091$
 $STD := 0.015$

Número de capas de fibra: $n := 1$

Deformación de diseño FRCM: $\varepsilon_{fd} := \varepsilon_{fu} - STD = 0.076$

Deformación unitaria efectiva a tracción de diseño FRCM: $\varepsilon_{fv} := \min(\varepsilon_{fd}, 0.004) = 0.004$

Tensión efectiva a tracción de diseño FRCM: $ff_v := \varepsilon_{fv} \cdot E_f = 9 \cdot \text{MPa}$

3. Solicitaciones

Corte solicitante: $V_u := 11.9 \text{tonf}$

Compresión solicitante: $N_u := 55.5 \text{tonf}$

4. Cálculo Capacidad

La zona delaminada se considera consolidada, por lo que se considera la totalidad del espesor del hormigón y el aporte del acero.

$$\text{Acero horizontal: } A_v := \frac{\left(\frac{4}{8} \text{in}\right)^2}{4} \pi = 1.267 \cdot \text{cm}^2$$

Espaciamiento: $s := 6 \text{in} = 15.24 \cdot \text{cm}$

Ancho $bw := t = 30.48 \cdot \text{cm}$

$d := 1 \text{m}$

$df := d$

$$\text{Corte Hormigón: } V_c := 0.17 \left(1 \text{MPa} + \frac{N_u}{14 \cdot bw \cdot d} \right) \sqrt{\frac{f_{cp}}{\text{MPa}}} \cdot bw \cdot d = 33.2 \cdot \text{tonf}$$

$$\text{Corte Acero: } V_s := A_v \cdot f_y \cdot \frac{d}{s} = 23.7 \cdot \text{tonf}$$

$$\text{Capacidad a corte refuerzo: } V_f := n \cdot \left[\sum_{i=1}^2 \left[A f_i \cdot (\sin(\beta_i) + \cos(\beta_i)) \cdot ff_v \cdot df \right] \right] = 10.4 \cdot \text{kgf}$$

Capacidad a Corte: $V_n := V_c + V_s + V_f = 56.9\text{-tonf}$

$$\phi := 0.75$$

$$\phi V_n := \phi \cdot V_n = 42.7\text{-tonf}$$

$\text{if}(\phi V_n \geq V_u, \text{"Ok"}, \text{"Verificar"}) = \text{"Ok"}$