



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

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO
MECÁNICO DE REFUERZOS DE FIBRA DE CARBONO CON MATRIZ
CEMENTÍCEA (FRCM), INFLUENCIA DEL TIPO DE MATRIZ**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PABLO ANDRÉS SANDOVAL BONHOMME

PROFESOR GUÍA:

FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

YURI TOMICIC CALVO

DAVID CAMPUSANO BROWN

SANTIAGO DE CHILE

2014

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil
POR: Pablo Sandoval Bonhomme
FECHA: 10 de noviembre de 2014
PROFESOR GUÍA: Federico Delfin Ariztía

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE
REFUERZOS DE FIBRA DE CARBONO CON MATRIZ CEMENTÍCEA
(FRCM), INFLUENCIA DEL TIPO DE MATRIZ**

Una de las técnicas de refuerzo y reparación de estructuras desarrolladas últimamente, corresponde al uso de fibra de carbono (mallas o tejidos) las que se adhieren a los elementos de hormigón o albañilería mediante resinas epóxicas en el caso de materiales poliméricos reforzados con fibra (FRP) y mediante materiales inorgánicos en el caso de las fibras con matriz cementícea (FRCM).

El objetivo principal de esta investigación es describir el comportamiento de refuerzos de estructuras de hormigón con fibra de carbono adheridas con matriz cementícea (sistema FRCM). Para esto, se evalúa el desempeño de tres distintas matrices utilizadas para embeber mallas de fibra de carbono como refuerzo de elementos de hormigón.

En primer lugar, se hace una revisión bibliográfica de estudios internacionales realizados para evaluar esta solución de reparación y se muestran distintos ejemplos del uso de esta tecnología en distintos lugares sísmicamente vulnerables.

El trabajo experimental se inicia con una caracterización de los materiales utilizados. Se presentan las propiedades mecánicas de la malla de fibra de carbono y se caracterizan las distintas matrices cementíceas a utilizar. En esta parte, se incluye la dosificación y confección de dos morteros diseñados para actuar como matrices en el sistema FRCM. El primero de ellos corresponde a un mortero en base a cemento portland modificado con polímeros y el segundo a un mortero geopolimérico en base a ceniza volante. Estos morteros son caracterizados tanto por ensayos en estado fresco como endurecido, para ajustar su composición de modo de obtener las propiedades que normalmente se especifican para este tipo de aplicación, que en este caso corresponden a las de un mortero predosificado diseñado industrialmente como parte del sistema FRCM comercializado en Italia.

La factibilidad técnica del sistema FRCM, se estudia mediante ensayos de adherencia a flexión del refuerzo aplicado a vigas de hormigón, teniendo como variable los distintos tipos de morteros y cuantías de refuerzo. Por otra parte, se evalúan las propiedades características del sistema de refuerzo mediante ensayos de tracción directa de láminas de material compuesto y ensayos de adherencia de los morteros a una superficie de hormigón.

Del comportamiento observado en el ensayo de flexión, se concluye que no obstante los diferentes morteros estudiados cumplen satisfactoriamente con las condiciones de trabajabilidad requeridas por el sistema FRCM, solamente el refuerzo con matriz geopolimérica presentó un desempeño óptimo bajo la metodología de ensayo adoptada.

*Para todos los que nunca han dejado de soñar.
Para mis padres, para mi hermano y para Ivonne.*

A mis padres, Iris y Jorge, por su apoyo incondicional, por todo lo que me han dado, por hacer que todo esto sea posible y porque este logro es, sin duda alguna, más suyo que mío;

A mi hermano Jorge, por siempre creer en mí, por ser mi primer amigo y por estar siempre presente a pesar de la distancia;

A mi polola Ivonne, por su compañía y amor, por los momentos inolvidables que hemos vivido y por los que vendrán y por hacer que todo en la vida sea más fácil;

A mi profesor guía, Don Federico, por las muchas e interminables reuniones que tuvimos y por su preocupación y ayuda con esta memoria;

A los miembros de la comisión, Yuri y Don David, por sus correcciones, comentarios e interés con este trabajo;

A mi tía Soledad, por acogerme en su casa todos estos años, y por el cariño que siempre me ha dado;

A mis tíos, Hernán y Patricio, por estar conmigo en los momentos más difíciles;

A mis abuelos, por su cariño, preocupación y buenos deseos que siempre recordaré;

A mis tíos y primos por la compañía, amistad y los muchos buenos momentos compartidos;

A mis amigos de plan común, Camilo, Felipe, Javier, Renato y Sebastián, simplemente por ser como son;

A mis amigos de ingeniería civil, Emilio, Ernesto, Guillermo, Matías, Nicolás, y Rodrigo, por compartir juntos los mejores años de mi vida. En especial a Carlos, por ayudarme con los materiales, ensayos y parte importante de esta memoria;

A Idiem. A sus técnicos y profesionales de la Sección Tecnología del Cemento y Hormigón y la Unidad de Ensayos Estructurales, por su ayuda, experiencia y permitir realizar todos mis ensayos;

Al Departamento de Ingeniería Civil, y su Laboratorio de Sólidos, Estructuras y Medios Particulados, por facilitarme sus instalaciones e instrumentos;

A todos quiénes me ayudaron y apoyaron y a todos quiénes me insultaron y me dieron la espalda;

A todos ustedes, y de todo corazón, infinitas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. Objetivos generales.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. ALCANCES	3
CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES	5
2.1. ANTECEDENTES GENERALES.....	5
2.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE REFUERZO ESTRUCTURAL FRCM.....	6
2.3. APLICACIÓN.....	7
2.4. ESTUDIOS EXPERIMENTALES.....	8
2.4.1. Ensayos de Compresión de probetas de hormigón confinadas (De Caso y Basalo et al 2009)	8
2.4.2. Ensayos de flexión (Bisby et al 2010).....	13
2.5. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS FRCM	18
2.5.1. Refuerzo de un arco de puente de ferrocarril (Berardi et al 2011)	18
2.5.2. Refuerzo de los pilares de un muelle costero de hormigón armado (Nanni 2012)	20
2.5.3. Reparación de los apoyos de un puente de línea de metro (Nanni 2012)... ..	22
2.5.4. Refuerzo del revestimiento de un túnel de hormigón armado (Nanni 2012)	24
2.5.5. Refuerzo de una chimenea de albañilería (Nanni 2012)	24
CAPÍTULO 3: TRABAJO PRELIMINAR PARA DEFINIR LOS MATERIALES Y DOSIFICACIONES	26
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MALLA DE FIBRA DE CARBONO	26
3.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATRICES CEMENTÍCEAS.....	27
3.2.1. Introducción	27
3.2.2. Matriz Cementícea Patrón (MP)	28
3.2.3. Matriz Cementícea (MC)	33
3.2.4. Matriz Geopolimérica (MG)	56

3.2.5.	Comparación entre matrices cementíceas	74
CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL COMPUESTO FRCCM		
77		
4.1	ENSAYOS DE TRACCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO FRCCM	77
4.1.1.	Introducción a ensayos de tracción de sistemas compuestos	77
4.1.2.	Método de ensayo	79
4.1.3.	Resultados.....	86
4.2.	ENSAYOS DE ADHERENCIA DE LOS MORTEROS.....	89
4.2.1.	Método de ensayo	89
4.2.2.	Resultados.....	95
CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE REFUERZO FRCCM MEDIANTE ENSAYO DE VIGA WHEST.....		
97		
5.1.	INTRODUCCIÓN	97
5.2.	INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE REFUERZO FRCCM	99
5.3.	INSTALACIÓN DE LA RÓTULA E INSTRUMENTACIÓN DE LAS VIGAS DE ENSAYO.....	103
5.3.1.	Instalación de la rótula de ensayo	103
5.3.2.	Instrumentación	105
5.4.	MONTAJE EXPERIMENTAL.....	106
5.5.	POSIBLES MODOS DE FALLA DE LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN	107
5.5.1.	Falla por rotura de fibra (RF).....	107
5.5.2.	Falla por adherencia entre el material compuesto y el sustrato (AD).....	107
5.5.3.	Falla por adherencia interna del material compuesto o deslaminación (DL)	108
5.5.4.	Falla por arrancamiento del sustrato (AS).....	108
5.5.5.	Falla por corte de la viga (CV)	109
5.6.	RESULTADOS.....	110
5.6.1.	Antecedentes previos.....	110
5.6.2.	Variación entre las distintas matrices, usando 1 malla de fibra	111
5.6.3.	Variación entre las distintas matrices, usando 2 mallas de fibra	117
5.6.4.	Comparación entre distintas cuantías de fibra para la misma matriz	123
5.6.5.	Comparación entre distintas matrices	128
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....		
131		

CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA	134
ANEXO A: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PRELIMINARES A LOS MORTEROS.	137
A.1. RESULTADOS ENSAYOS MORTERO PATRÓN	137
A.2. RESULTADOS ENSAYOS MORTERO CEMENTÍCEO	137
A.3. RESULTADOS ENSAYOS MORTERO GEOPOLIMÉRICO	139
ANEXO B: ELABORACIÓN DE VIGUETAS	142
B.1. Preparación de moldajes para las vigas de ensayo	142
B.2. Hormigón	143
B.2.1. Materiales	143
B.2.2 . Dosificación	149
B.2.3. Preparación, confección y curado de muestras.....	149
B.2.4. Desmolde de las vigas de ensayo.....	152
ANEXO C: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A CUBOS DE CONTROL POR COLADA DE HORMIGÓN PARA VIGAS	155
ANEXO D: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A PROBETAS RILEM DE LOS MORTEROS PARA REFUERZOS DE VIGAS DE HORMIGÓN.....	156

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Resistencia a la compresión de morteros A y H	10
Tabla 2.2: Resultados obtenidos de los ensayos de vigas	16
Tabla 3.1: Especificaciones técnicas de la malla fibra de carbono	26
Tabla 3.2: Especificaciones técnicas del Mortero Patrón (MP)	28
Tabla 3.3: Pérdida de fluidez en el tiempo Mortero Patrón (T = 20°C)	30
Tabla 3.4: Sensibilidad al contenido de agua Mortero Patrón.....	31
Tabla 3.5: Características técnicas del cemento para la matriz cementícea	39
Tabla 3.6: Fracciones de arena para mortero MC.....	39
Tabla 3.7: Densidad aparente por fracción y árido combinado	40
Tabla 3.8: Densidad real y absorción de agua del árido combinado	40
Tabla 3.9: Granulometría arena para mortero MC	41
Tabla 3.10: Datos técnicos de la microsílíce del mortero cementíceo	42
Tabla 3.11: Datos técnicos del polímero (látex acrílico) utilizado en el mortero cementíceo	44
Tabla 3.12: Dosificación teórica inicial de mortero cementíceo (MC) para FRCM	47
Tabla 3.13: Incremento de resistencia mecánica y contenido de polímero	50
Tabla 3.14: Incremento de las resistencias mecánicas y densidad agregando desaireante	53
Tabla 3.15: Dosificación final para el mortero cementíceo	54
Tabla 3.16: Pérdida de fluidez en el tiempo Mortero Cementíceo (MC) (T = 20°C)	55
Tabla 3.17: Fluorescencia de rayos X ceniza volante.....	60
Tabla 3.18: Composición y características de la solución de Silicato de Sodio utilizado .	61
Tabla 3.19: Cantidad de soluto para las soluciones de NaOH	62
Tabla 3.20: Dosificación inicial de mortero geopolimérico a utilizar.....	66
Tabla 3.21: Dosificación final para el mortero geopolimérico	72
Tabla 3.22: Pérdida de fluidez en el tiempo Mortero Geopolimérico.....	73
Tabla 3.23: Fluidez inicial, final y pérdida de fluidez total para los distintos morteros ..	75
Tabla 4.1: Modo de falla para la serie MP	86
Tabla 4.2: Modo de falla para la serie MC	87
Tabla 4.3: Modo de falla para la serie MG.....	88
Tabla 5.1: Vigas a reforzar con la solución FRCM.....	100
Tabla 5.2: Vigas ensayadas, escala y tiempo de ensayo	110
Tabla 5.3: Resumen de resultados de ensayo MP-1C.....	111
Tabla 5.4: Resumen de resultados de ensayo MC-1C.....	113
Tabla 5.5: Resumen de resultados de ensayo MG-1C	115
Tabla 5.6: Resumen de resultados de ensayo MP-2C	117
Tabla 5.7: Resumen de resultados de ensayo MC-2C	119
Tabla 5.8: Resumen de resultados de ensayo MG-2C.....	121
Tabla 5.9: Resumen de resultados de ensayo MP-1C y MP-2C.....	124

Tabla 5.10: Resumen de resultados de ensayo MC-1C y MC-2C.....	125
Tabla 5.11: Resumen de resultados de ensayo MG-1C y MG-2C.....	126
Tabla 5.12: Resumen de resultados de ensayo MP-1C, MC-1C y MG-1C.....	128
Tabla 5.13: Resumen de resultados de ensayo MP-2C, MC-2C y MG-2C.....	129
Tabla A.1: Resultados ensayos a 7 y 28 días Mortero Patrón	137
Tabla A.2: Resultados ensayos a 3 días para mortero cementíceo sin desaireante.....	137
Tabla A.3: Resultados ensayos a 7 días para mortero cementíceo sin desaireante	138
Tabla A.4: Resultados ensayos a 3 días para mortero cementíceo con desaireante.....	138
Tabla A.5: Resultados ensayos a 7 días para mortero cementíceo con desaireante.....	138
Tabla A.6: Resultados ensayos a 7 y 28 días Mortero Cementíceo	139
Tabla A.7: Resultados ensayos a 3 días variando el contenido de agua adicional para mortero geopolimérico	139
Tabla A.8: Resultados ensayos a 7 días variando el contenido de agua adicional para mortero geopolimérico	139
Tabla A.9: Resultados ensayos a 3 días variando la temperatura de curado para mortero geopolimérico.....	140
Tabla A.10: Resultados ensayos a 7 días variando la temperatura de curado para mortero geopolimérico.....	140
Tabla A.11: Resultados ensayos a 3 días variando la concentración molar de la solución NaOH para mortero geopolimérico.....	140
Tabla A.12: Resultados ensayos a 7 días variando la concentración molar de la solución NaOH para mortero geopolimérico.....	140
Tabla A.13: Resultados ensayos a 7 y 28 días Mortero Geopolimérico	141
Tabla B.1: Características técnicas del cemento para vigas	143
Tabla B.2: Características físicas de los áridos utilizados en la confección de hormigón para las vigas de ensayo.....	145
Tabla B.3: Granulometría de áridos utilizados en la confección de las vigas de ensayo	146
Tabla B.4: Dosificación para las vigas de hormigón	149
Tabla C.1: Resistencia a compresión de las probetas de control.....	155
Tabla D.1: Ensayos Rilem de control por viga reforzada	156

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Fibra de carbono y matriz cementícea pre-dosificada	7
Figura 2.2: Secuencia típica de aplicación	8
Figura 2.3: Fibra N°1	9
Figura 2.4: Fibra N°2	9
Figura 2.5: Fibra N°3	9
Figura 2.6: Tensión deformación normalizada para la lámina S560	11
Figura 2.7: Tensión deformación normalizada para la lámina S915	11
Figura 2.8: Tensión deformación normalizada para la malla M250	12
Figura 2.9: Tensión deformación para la lámina de baja densidad.....	12
Figura 2.10: Tensión deformación para la lámina de alta densidad.....	12
Figura 2.11: Modelo esquemático de la viga a ensayar (Dimensiones en [mm])	14
Figura 2.12: Esquema de ensayo de la viga (Dimensiones en [mm])	16
Figura 2.13: Carga – Flecha para los ensayos a flexión a 20°C.....	17
Figura 2.14: Carga – Flecha para los ensayos flexión a 50°C.....	17
Figura 2.15: Carga – Flecha para los ensayos a flexión a 80°C.....	17
Figura 2.16: Refuerzo del puente ferroviario	19
Figura 2.17: Segunda capa de fibra aplicada	20
Figura 2.18: Grietas en los pilares del muelle	20
Figura 2.19: Reparación de las grietas previa a la aplicación del sistema FRCM.....	21
Figura 2.20: Aplicación de la capa de terminación con mortero impermeabilizante	21
Figura 2.21: Puente a reparar en Nueva York	22
Figura 2.22: Pedestal a reparar	22
Figura 2.23: Agrietamiento y desprendimiento del hormigón de los pedestales del puente.....	23
Figura 2.24: Aplicación de la última capa de matriz sobre las mallas de fibras.....	23
Figura 2.25: Aplicación del recubrimiento final de matriz cementícea.....	24
Figura 2.26: Chimenea antes de comenzar la reparación con FRCM.....	25
Figura 2.27: Aplicación del recubrimiento final de matriz cementícea sobre la malla ...	25
Figura 3.1: Detalle de la malla de fibra de carbono C-NET 170 (medidas en [mm])	26
Figura 3.2: Mesa de fluidez para la determinación de la trabajabilidad	29
Figura 3.3: Pérdida de fluidez en el tiempo Mortero Patrón	31
Figura 3.4: Sensibilidad al contenido de agua Mortero Patrón	32
Figura 3.5: Resistencias mecánicas a 7 y 28 días (MP).....	33
Figura 3.6: Tipos de polímeros usados para modificar morteros y hormigones.....	34
Figura 3.7: Modelo simplificado de la formación de la co-matriz (Ohama 1995)	35
Figura 3.8: Fracciones y proporción de arena para morteros	40
Figura 3.9: Granulometría arena para mortero MC	41
Figura 3.10: Influencia del contenido de polímero en la fluidez del mortero	49

Figura 3.11: Influencia del contenido de polímero en la resistencia mecánica del mortero. Edad 3 días.....	49
Figura 3.12: Influencia del contenido de polímero en la densidad y propiedades mecánicas del mortero. Edad 7 días	50
Figura 3.13: Influencia de la incorporación de desaireante en las propiedades mecánicas del mortero. Edad 3 días.....	52
Figura 3.14: Influencia de la incorporación de desaireante en las propiedades mecánicas del mortero. Edad 7 días	52
Figura 3.15: Influencia de la incorporación de desaireante en la densidad del mortero. Edad 7 días	53
Figura 3.16: Pérdida de fluidez en el tiempo Mortero Cementíceo	55
Figura 3.17: Resistencias mecánicas a 7 y 28 días (MC)	56
Figura 3.18: Granulometría Ceniza Volante (Díaz 2012).....	60
Figura 3.19: Resistencia a la compresión a 3 y 7 días en función del contenido de agua extra.....	68
Figura 3.20: Resistencia a la flexión a 3 y 7 días en función del contenido de agua	69
Figura 3.21: Resistencia a la compresión a 3 y 7 días en función de la temperatura de curado.....	70
Figura 3.22: Resistencia a la flexión a 3 y 7 días en función de la temperatura de curado	70
Figura 3.23: Resistencia a la compresión a 3 y 7 días en función de la Molaridad de la solución de hidróxido de sodio	71
Figura 3.24: Resistencia a la flexión a 3 y 7 días en función de la Molaridad de la solución de hidróxido de sodio	72
Figura 3.25: Pérdida de fluidez en el tiempo Mortero Geopolimérico	73
Figura 3.26: Resistencias mecánicas a 7 y 28 días (MG)	74
Figura 3.27: Pérdida de fluidez en el tiempo para los distintos morteros a utilizar como matriz cementícea	75
Figura 3.28: Resistencia a compresión a 7 y 28 días para los distintos tipos de mortero.....	76
Figura 3.29: Resistencia a flexión a 7 y 28 días para los distintos tipos de mortero.....	76
Figura 4.1: Curva tensión – deformación teórica para el material compuesto bajo ensayo de tracción.....	78
Figura 4.2: Curva tensión - deformación idealizada para el material compuesto bajo ensayo de tracción.....	78
Figura 4.3: Esquema de ensayo de tracción (medidas en mm)	79
Figura 4.4: Sistema de mordaza para el ensayo de tracción del material compuesto.....	81
Figura 4.5: Esquema del ensayo de tracción del compuesto	82
Figura 4.6: Moldajes para las probetas de ensayo a tracción	83
Figura 4.7: Compactación de la primera capa de matriz cementícea	84
Figura 4.8: Probetas de tracción.....	84
Figura 4.9: Resultados de ensayo de tracción para el mortero patrón	86
Figura 4.10: Probetas ensayadas serie MP	86

Figura 4.11: Resultados de ensayo de tracción para el mortero cementíceo	87
Figura 4.12: Probetas ensayadas serie MC	87
Figura 4.13: Resultados de ensayo de tracción para el mortero geopolimérico	88
Figura 4.14: Probetas ensayadas serie MG.....	88
Figura 4.15: Resultados de ensayo de tracción promedio para las distintas matrices	89
Figura 4.16: Sustrato antes de aplicar el recubrimiento	91
Figura 4.17: Enrase del recubrimiento sobre el sustrato	91
Figura 4.18: Diferentes tipos de recubrimientos para ensayo de adherencia	91
Figura 4.19: Esquema ensayo de tracción directa.....	92
Figura 4.20: Cortes sobre el recubrimiento	92
Figura 4.21: Aparatos para ensayo de tracción	92
Figura 4.22: Máquina de ensayo de tracción directa	93
Figura 4.23: Falla por adherencia	93
Figura 4.24: Falla por rotura del recubrimiento	94
Figura 4.25: Falla por rotura del sustrato	94
Figura 4.26: Falla por despegue del adhesivo	94
Figura 4.27: Ensayo de adherencia y modo de falla para el mortero patrón.....	95
Figura 4.28: Ensayo de adherencia y modo de falla para el mortero cementíceo.....	95
Figura 4.29: Ensayo de adherencia y modo de falla para el mortero geopolimérico	96
Figura 5.1: Esquema de la Viga Whest	98
Figura 5.2: Aplicación de arena con ácido clorhídrico para la preparación de la superficie	100
Figura 5.3: Preparación de las probetas	101
Figura 5.4: Aplicación de la primera capa de matriz	102
Figura 5.5: Compactación de la capa de matriz	102
Figura 5.6: Posicionamiento y colocación de la fibra dentro de la matriz.....	103
Figura 5.7: Rótula para ensayo de vigas	104
Figura 5.8: Viga antes de la instalación de la rótula de ensayo	104
Figura 5.9: Viga después de la instalación de la rótula de ensayo	104
Figura 5.10: Ángulos para la instrumentación de las vigas de ensayo.....	105
Figura 5.11: Vista superior de la viga lista para ser ensayada	105
Figura 5.12: Montaje experimental	106
Figura 5.13: Detalle de la instrumentación de las vigas de ensayo	106
Figura 5.14: Falla de la probeta por rotura de la fibra	107
Figura 5.15: Falla de la probeta por adherencia entre el compuesto y el sustrato	108
Figura 5.16: Falla de la probeta por deslaminación	108
Figura 5.17: Falla de la probeta por arrancamiento del sustrato	109
Figura 5.18: Falla de la probeta por corte en la viga	109
Figura 5.19: Mortero Patrón y 1 malla de fibra	111
Figura 5.20: Modo de falla por adherencia (MP-1C-1)	112
Figura 5.21: Modo de falla por rotura de fibra (MP-1C-2 y MP-1C-3).....	112
Figura 5.22: Probetas ensayadas serie MP-1C	112

Figura 5.23: Mortero Cementíceo y 1 malla de fibra.....	113
Figura 5.24: Modo de falla por adherencia (MC-1C-1 y MC-1C-2)	114
Figura 5.25: Modo de falla por rotura de fibra (MC-1C-3)	114
Figura 5.26: Probetas ensayadas serie MC-1C	114
Figura 5.27: Mortero Geopolimérico y 1 malla de fibra	115
Figura 5.28: Modo de falla por rotura de fibra (MG-1C-1, MG-1C-2 y MG-1C-3)	116
Figura 5.29: Probetas ensayadas serie MG-1C	116
Figura 5.30: Mortero Patrón y 2 mallas de fibra.....	117
Figura 5.31: Modo de falla por adherencia (MP-2C-1).....	118
Figura 5.32: Modo de falla por rotura de fibra (MP-2C-2 y MP-2C-3)	118
Figura 5.33: Probetas ensayadas serie MP-2C	118
Figura 5.34: Mortero Cementíceo y 2 mallas de fibra.....	119
Figura 5.35: Modo de falla por rotura de fibra (MC-2C-1, MC-2C-2 y MC-2C-3).....	120
Figura 5.36: Probetas ensayadas serie MC-2C.....	120
Figura 5.37: Mortero Geopolimérico 2 mallas de fibra.....	121
Figura 5.38: Modo de falla por rotura de fibra (MG-2C-1, MG-2C-2 y MG-2C-3).....	122
Figura 5.39: Probetas ensayadas serie MG-2C.....	122
Figura 5.40: Curvas de ensayo suavizadas y promediadas para el Mortero Patrón.....	124
Figura 5.41: Curvas de ensayo suavizadas y promediadas. Mortero Cementíceo	125
Figura 5.42: Curvas de ensayo suavizadas y promediadas. Mortero Geopolimérico	126
Figura 5.43: Representación cualitativa del comportamiento de los distintos morteros variando la cuantía de fibra	127
Figura 5.44: Curvas de ensayo suavizadas y promediadas para 1 malla de fibra y distintos morteros como matriz	128
Figura 5.45: Curvas de ensayo suavizadas y promediadas para 2 mallas de fibra y distintos morteros como matriz	129
Figura 5.46: Representación cualitativa del desempeño de los distintos morteros.....	130
Figura B.1: Vista lateral moldajes	142
Figura B.2: Vista frontal moldajes.....	142
Figura B.3: Vista interior moldaje	142
Figura B.4: Granulometría de áridos utilizados en la confección de las vigas de ensayo	147
Figura B.5: Materiales utilizados para hormigón de vigas de ensayo.....	148
Figura B.6: Llenado de moldes de vigas	150
Figura B.7: Enrase de las probetas	151
Figura B.8: Confección de 4 cubos como probetas de control para cada amasada.....	151
Figura B.9: Desmolde de vigas de ensayo	152
Figura B.10: Superficie de las vigas antes de ser reparadas.....	153
Figura B.11: Pegado de las vigas de ensayo	153
Figura B.12: Serie de vigas reparadas.....	154
Figura C.1: Resistencia a compresión de las probetas de control por colada de hormigón	155

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Un problema recurrente en Ingeniería Civil, corresponde a la necesidad de incrementar la capacidad soportante de una estructura, la cual puede ser gatillada por distintos motivos:

- Cuando las cargas de diseño han sido menores a las efectivamente actuales (debido a cambios en la utilización de la estructura, cargas adicionales, demanda sísmica).
- Cuando se hacen modificaciones a los edificios (ascensores, chimeneas, shaft para tuberías, nuevos accesos).
- Cuando se requiere mejorar el comportamiento sísmico (aumentar ductilidad).
- Cuando se cometieron errores en el diseño estructural.
- Cuando se cometieron errores en la construcción, etc.

Estas intervenciones o deficiencias de diseño pueden inducir esfuerzos excesivos, los que pueden producir agrietamiento en los elementos de hormigón y llevar a una falla parcial o total de la estructura.

Como solución a este problema, se ha propuesto el uso de sistemas de refuerzo mediante materiales poliméricos reforzados con fibra (*Fiber Reinforced Polymer, FRP*). Estas fibras corresponden típicamente a fibra de vidrio, fibra de carbono o fibra de basalto. Los polímeros, por su parte, son usualmente resinas epóxicas, viniléster, resinas de poliéster, etc. (Nanni 1995) (Nanni 1997)

La solución de refuerzo mediante FRP, para aumentar la resistencia y disminuir las deformaciones de elementos de hormigón armado es actualmente, una práctica bastante aceptada, principalmente por su buena relación precio - calidad, fácil y rápida aplicación y mínima invasión e intervención en las estructuras existentes (De Caso y Basalo et al 2009).

Sin embargo, los FRP, presentan unos importantes inconvenientes tales como: temperaturas de aplicación mayores a 10 °C y no mayores a 30 °C, en el caso de los que utilizan resina epóxica, debido a que el endurecimiento de estas resinas está altamente influenciado por la temperatura ambiental. Por otro lado, el uso de resinas orgánicas en general, como matrices, posee una gran desventaja en eventos de incendio. En efecto, estos materiales presentan un mal comportamiento al fuego al ser combustibles y generar humos tóxicos dañando a personas o sistemas biológicos, y disminuyen considerablemente su capacidad bajo altas temperaturas. Además, no son aplicables en superficies húmedas, poseen baja permeabilidad al vapor de agua, requieren un estricto

control de calidad, son susceptibles a la radiación UV, etc. (Triantafillou 2006) (Ombres 2011).

Así, para resolver estos inconvenientes, recientemente se han incorporado materiales compuestos en que la resina epóxica es reemplazada por materiales inorgánicos estables (típicamente mortero de cemento) como matriz aglomerante adhiriendo las fibras al hormigón o a la albañilería. Ésta solución se conoce como refuerzo con fibra de carbono con matriz cementícea (*Fiber Reinforced Cementitious Matriz, FRCM*).

Este trabajo por su parte, contempla el estudio a escala de laboratorio, de diversos morteros diseñados para servir como matriz cementante, en el sistema FRCM aplicado al refuerzo de elementos de hormigón sometidos a flexión.

La fibra de carbono utilizada para este tipo de aplicación, corresponde a mallas reticulares bidireccionales de haces de fibra, las cuales están diseñadas para ser utilizadas en trabajos de restauración, como refuerzo estructural y reacondicionamiento de obras de hormigón y albañilería. Este tipo de solución de refuerzo no cuenta con aplicaciones o experiencia a nivel nacional, por lo que el presente estudio representa un primer acercamiento a esta nueva tecnología.

La adherencia de este tipo de refuerzos a los diversos elementos de una estructura de hormigón armado o albañilería, se debe conseguir optimizando la composición del mortero que conforma la matriz cementícea del material compuesto utilizado, por lo que resulta de interés contar con una metodología que permita evaluar el desempeño de la solución bajo condiciones estandarizadas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos generales

Determinar el comportamiento de los FRCM bajo solicitaciones mecánicas al variar el tipo de matriz cementícea, estudiando además la eficiencia de estas soluciones de refuerzo aplicadas a elementos de hormigón, y desarrollar una metodología para evaluar el desempeño de la solución de refuerzo estructural mediante un determinado tipo de matriz cementícea, componente esencial del sistema FRCM.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterización de las propiedades de los materiales componentes (morteros cementíceos y mallas de fibra de carbono) de los FRCM, de acuerdo a ensayos estándar que satisfagan condiciones de repetibilidad y reproducibilidad aceptables.

- Estudiar la composición de morteros que puedan desempeñar la función de matriz cementícea en el sistema FRCM.
- Ajuste de las mezclas de los morteros seleccionados para obtener las propiedades de consistencia y tixotropía requeridas para una colocación eficiente del refuerzo y alcanzar una alta compacidad y adherencia al sustrato.
- Determinación de los tiempos de trabajabilidad de los distintos morteros para condiciones típicas de obra (sensibilidad del mortero frente a condiciones ambientales y pérdida de trabajabilidad en el tiempo).

1.3. ALCANCES

CAPÍTULO 1:INTRODUCCIÓN

Se realiza una breve descripción y contextualización del tema. Se presenta la motivación, los objetivos y la metodología de la investigación.

CAPÍTULO 2:ANTECEDENTES

Se presentan los antecedentes generales del sistema de refuerzo y reparación FRCM. Además, se presentan estudios experimentales donde se ha estudiado el comportamiento de esta solución bajo distintas sollicitaciones mecánicas y térmicas. Por último, se presentan ejemplos de aplicación del sistema FRCM.

CAPÍTULO 3:TRABAJO PRELIMINAR PARA DEFINIR LOS MATERIALES Y DOSIFICACIONES

Se describen los materiales utilizados, y se muestran los trabajos preliminares realizados para definir la dosificación de las matrices cementíceas a utilizar.

CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL COMPUESTO FRCM

Se incluyen ensayos de tracción de láminas de material compuesto y ensayos de adherencia de los morteros a un sustrato de hormigón.

CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE REFUERZO FRCC MEDIANTE ENSAYO DE VIGA WHEST

Se realiza la evaluación del sistema de refuerzo FRCC mediante el ensayo estandarizado de la viga whest, estudiando la influencia del tipo de matriz cementícea y la cuantía de fibra utilizada.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

Se resume el trabajo experimental. Se comparan los resultados obtenidos, se comparan y analizan los resultados y se proponen futuras investigaciones que pudiesen servir como complemento a esta investigación.

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES

2.1. ANTECEDENTES GENERALES

En algunos artículos publicados entre 1995 y 1997 en el *CI Concrete International* se entrega información sobre una nueva tecnología conocida como refuerzos mediante compuestos en base a resinas poliméricas y distintos tipos de fibras minerales o metálicas, materiales denominados FRP (*Fiber reinforced polymer*) para reparación, restauración y refuerzo estructural. (Nanni 1995) (Nanni 1997).

En la actualidad, 15 años más tarde, la industria está aplicando una nueva clase de sistema de refuerzo que utiliza el mismo tipo de fibras pero embebidas en matrices cementíceas denominados FRCM (*Fiber reinforced cementitious matrix*). En comparación con FRP, FRCM ofrece una mayor compatibilidad con los elementos estructurales de hormigón y albañilería, y un comportamiento superior a altas temperaturas, condiciones de incendio y radiación ultravioleta.

Los compuestos de FRCM han sido denominados de distinta forma. El término general para las aplicaciones como revestimiento usando textiles tejidos y hormigón o mortero es Hormigón Reforzado con Textiles (TRC) (Aldea 2007), (Dubey 2008). Otros términos en la literatura incluyen Mortero Reforzado con Textiles (TRM) (Triantafillou et al 2006), Compuestos de Base Mineral (MBC) (Blanksvärd et al 2006), Cemento Reforzado con Fibra (FRC) (Wu 2005) y últimamente los compuestos que utilizan matrices geopoliméricas reforzadas con fibra de carbono (FRG) (Balaguru 1997).

El material FRCM no estaba presente en los códigos de diseño hasta la última edición del ACI, sin embargo el *International Code Council Evaluation Service (ICC-ES)* publicó “*Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening Using Fiber-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Systems (AC434)*” (ICC-Evaluation Service, 2011). Este documento entrega una guía de caracterización, recomendaciones y diseño de los sistemas FRCM y establece los requerimientos para el reconocimiento de éstos. Al igual que otros documentos del ICC-ES, éste código fue desarrollado por un equipo técnico integrado por profesionales de la industria, académicos, además de las instituciones reguladoras de las construcciones, tanto en Europa como en los Estados Unidos.

2.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE REFUERZO ESTRUCTURAL FRCCM

Los sistemas de refuerzo FRCCM poseen dos componentes primarios: la matriz cementicia y una o más mallas de refuerzo conformadas por haces de fibras. La matriz corresponde típicamente a un mortero fino compuesto por cemento portland puzolánico con una baja dosis de polímeros orgánicos secos (menos del 5% en relación al peso de cemento) una arena fina de granulometría continua y con una adición de microfibras para asegurar un desempeño tixotrópico en estado fresco y controlar la microfisuración asociada a la retracción del mortero. La incorporación de polímeros orgánicos resulta necesaria para obtener propiedades reológicas, tiempo de fraguado y propiedades mecánicas compatibles. Por otro lado, la efectividad mecánica del sistema FRCCM está altamente influenciada por la capacidad de la matriz cementicia para saturar y embeber los haces de fibra de las mallas (Banholzer 2004), la adherencia entre la matriz y la fibra (Hartig et al 2008), y la adherencia entre la matriz y el hormigón (Ortlepp et al 2004). Así, los requerimientos para la matriz son (Kolsch 1998):

- Propiedades mecánicas suficientes para la transferencia de carga.
- Consistencia adecuada, buena penetración en las fibras y buenas características para embeber las fibras.
- Compatibilidad química y térmica tanto con la malla como con el sustrato y poseer resistencia térmica y al fuego.
- Trabajabilidad de obra (aplicabilidad en grandes superficies, un período de aplicación y tixotropía compatibles con el tipo de aplicación, manual o mecánica).
- Amigable con el medio ambiente (consumo energético, emisión de CO₂, entre otros)

El refuerzo corresponde a haces de fibra de carbono conformando una malla reticulada, la cual queda embebida en la matriz cementicia. Tiene como características ser un material liviano (aproximadamente 160 [g/m²]), poseer una alta resistencia específica, una baja densidad (1,78 [g/cm³]) y alto módulo de elasticidad (>240 [GPa]) (Colajanni et al 2012).

Los haces de fibra, poseen una relativamente alta densidad de fibras con el fin de lograr distribuir la cuantía de material de refuerzo, pero por otro lado, los haces deben ser embebidos por la matriz cementicia, y penetrados por esta, para lograr la construcción monolítica deseada y el enlace (adherencia) químico y mecánico entre las fibras y la matriz y la integración con el sustrato. Además, las mallas deben adecuarse a la forma, de manera de permitir una aplicación fácil ciñéndose a las condiciones geométricas del sustrato.

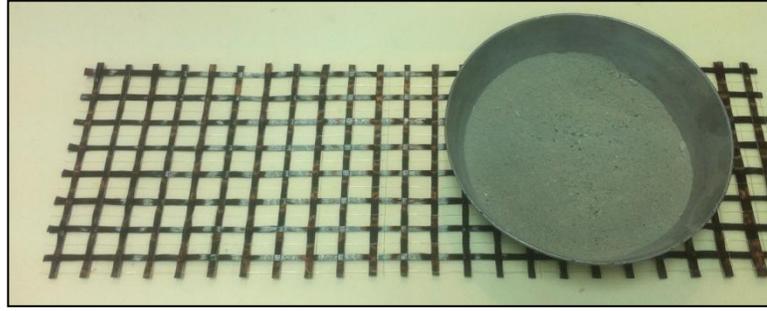


Figura 2.1: Fibra de carbono y matriz cementícea pre-dosificada

2.3. APLICACIÓN

Para asegurar la efectividad de la solución de reparación y/o de refuerzo con el sistema FRCM, y el correcto desempeño de la misma, se recomienda contemplar los siguientes pasos (Kolsch 1998):

- 1) La superficie de los elementos a reforzar debe ser sometida a un tratamiento de limpieza, preferentemente, mediante arenado, cepillado, o algún proceso abrasivo similar, de manera de remover las pinturas, recubrimientos existentes, capas vegetales, contaminaciones y las zonas débiles o desgastadas. Normalmente, se recomienda la estabilización o reconstrucción de la superficie mediante un mortero de reparación adecuado.
- 2) A continuación, se aplica la primera capa del mortero modificado con polímeros (matriz cementícea) sobre la superficie por proyección manual o mecánica, asegurándose de lograr un espesor uniforme sobre la superficie del elemento.
- 3) La fibra es colocada y presionada sobre el espesor de mortero de anclaje especificado, asegurándose de embeberla completamente dentro de esa capa. Si es necesario, dependiendo de los requerimientos de rigidez y resistencia especificados en el proyecto de reparación o refuerzo, se procede a la aplicación de una segunda capa de refuerzo.
- 4) Finalmente, se aplica una capa de mortero como recubrimiento final del sistema de capas. De esta manera, se logra construir un compuesto laminar sobre la superficie del elemento estructural a reparar.

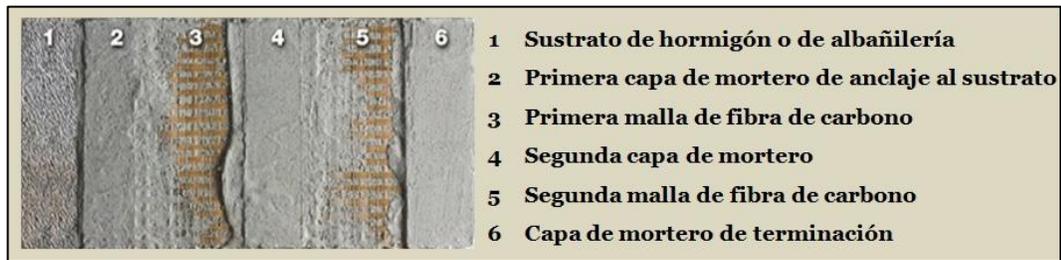


Figura 2.2: Secuencia típica de aplicación

2.4. ESTUDIOS EXPERIMENTALES

A continuación se presenta una revisión de antecedentes de dos estudios experimentales que comprenden ensayos de laboratorio de compresión y flexión de probetas cilíndricas y prismáticas respectivamente, ambas reforzadas con el sistema FRCM.

2.4.1. Ensayos de Compresión de probetas de hormigón confinadas (De Caso y Basalo et al 2009)

Introducción

El siguiente trabajo fue desarrollado en las dependencias del *Department of Civil, Architectural, and Environmental Engineering, University of Miami*, enero de 2009.

Los autores evalúan el comportamiento de probetas ensayadas a compresión variando el confinamiento de refuerzo (tipo y configuración de fibra de carbono y matriz cementícea), de manera de calificar la constructabilidad, compatibilidad y efectividad de los distintos materiales y algunas configuraciones del refuerzo.

Se utilizan un total de 15 probetas cilíndricas de hormigón de 152 [mm] de diámetro y 305 [mm] de alto, las cuales fueron reforzadas con dos capas de fibra de carbono. Se compara el comportamiento de tres matrices cementíceas y tres tipos de refuerzo. Las probetas reforzadas son ensayadas a la edad de 28 días.

Materiales utilizados

- **Fibra de carbono.**

Su usan dos configuraciones de fibra (lámina y malla) y tres diferentes tipos de fibra.

a) Fibra en lámina (unidireccional)

1: Lámina de baja densidad (560 [g/m²]), con una resistencia última a tracción de 420 [MPa] (Figura 2.3).

2: Lámina de alta densidad (915 [g/m²]), con una resistencia última a tracción de 3.240 [MPa] (Figura 2.4).

b) Fibra en malla (bidireccional)

3: Malla reticulada de haces de fibra y densidad de 250 [g/m²] (Figura 2.5).

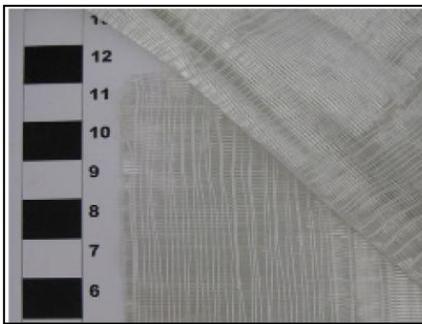


Figura 2.3: Fibra N°1

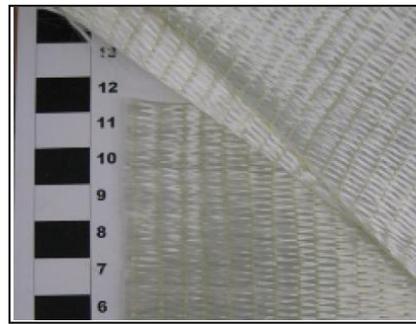


Figura 2.4: Fibra N°2

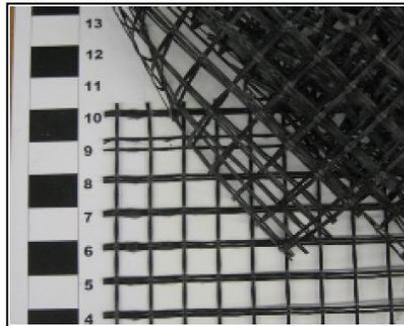


Figura 2.5: Fibra N°3

- **Matriz cementícea**

Las características principales que se consideran y controlan a las matrices cementíceas son las siguientes: capacidad de saturar o de humectar las fibras, adherencia matriz/fibra, tiempo de fraguado para asegurar la trabajabilidad al preparar las probetas, estabilidad dimensional (capacidad de deformación) de la matriz, entre otras.

Se usan tres tipos de matrices:

a) Matriz tipo A

Cemento Portland modificado con polímero acrílico (látex), lo que crea una matriz flexible y respirable (permeable al vapor de agua)

b) Matriz tipo H

Cemento hidráulico con alta retención de agua y agregado fino, para obtener una matriz flexible.

c) Matriz tipo M

Cemento de fosfato de magnesio, con un tiempo de fraguado de 15 minutos y buena capacidad de adherencia.

En la Tabla 2.1, se muestra la resistencia a compresión de los morteros A y H (ASTM C109¹)

Tabla 2.1: Resistencia a la compresión de morteros A y H

Mortero	A/C	Resistencia a compresión [MPa]
Tipo A	0,45	2,15
		2,59
		2,64
Promedio [MPa]		2,46
Tipo H	0,27	30,03
		27,72
		34,02
Promedio [MPa]		30,59

Preparación de probetas reforzadas

Se usan dos probetas para cada combinación de tipo de fibra y matriz. La notación que se usa es X000_B_C, donde X denota el tipo de fibra (C: control, S: lámina, M: malla), seguido de la densidad de la malla en [g/m²], B denota el tipo de matriz (Tipo A, H o M) y C indica el número de la probeta (1 o 2).

¹ Método de ensayo estándar para determinación de la resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulico, usando especímenes cúbicos de 50,8 [mm]

- **Relación Agua/Cemento (A/C)**

Esta relación fue obtenida de forma iterativa para poder cumplir con dos de las propiedades requeridas para la matriz: que sea fluida para saturar las fibras y que tenga la viscosidad adecuada para mantenerse adherida a la fibra sin resbalar en forma vertical (tixotropía).

- **Constructabilidad**

Para asegurar la fácil implementación del sistema de refuerzo en terreno, se recurre a un procedimiento similar al usado en los sistemas basados en matrices con resina epóxica. La aplicación de las matrices inorgánicas es simple y rápida y la impregnación de la fibra se realiza usando un rodillo

Resultados y discusión

Los resultados de los ensayos realizados se muestran a continuación en los gráficos tensión deformación de la Figura 2.6, Figura 2.7 y Figura 2.8. Éstos están normalizados por la tensión y deformación de falla del elemento sin refuerzo (elemento de control).

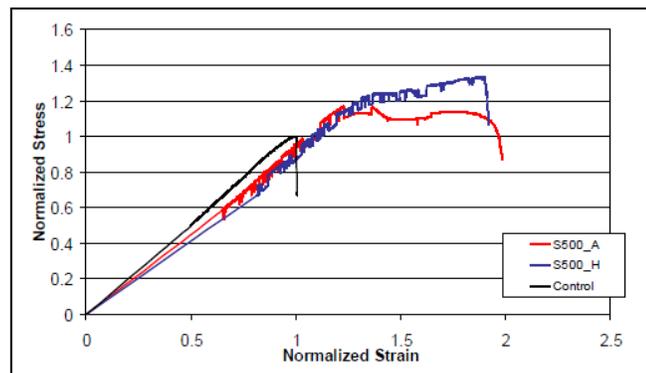


Figura 2.6: Tensión deformación normalizada para la lámina S560

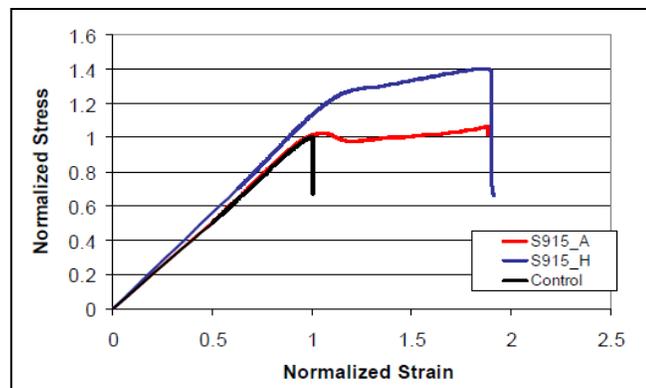


Figura 2.7: Tensión deformación normalizada para la lámina S915

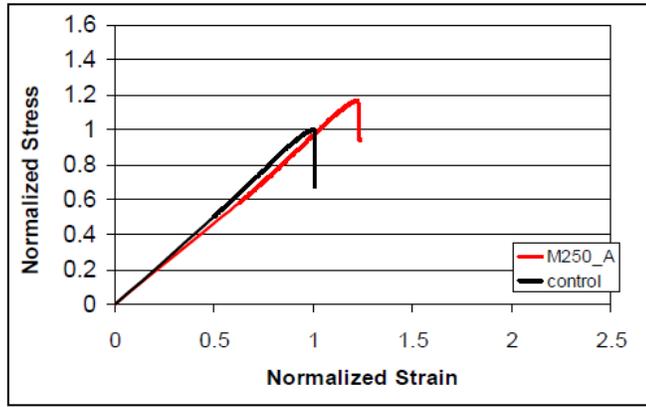


Figura 2.8: Tensión deformación normalizada para la malla M250

Además, en la

Figura 2.9 y Figura 2.10, se muestran los resultados de tensión deformación para refuerzos de baja y alta densidad respectivamente (cuantías).

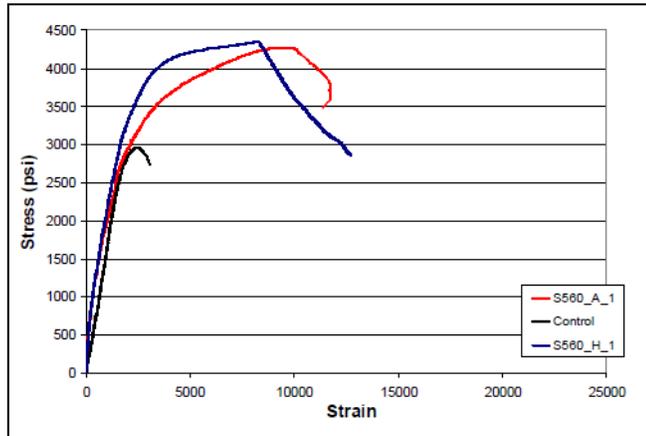


Figura 2.9: Tensión deformación para la lámina de baja densidad

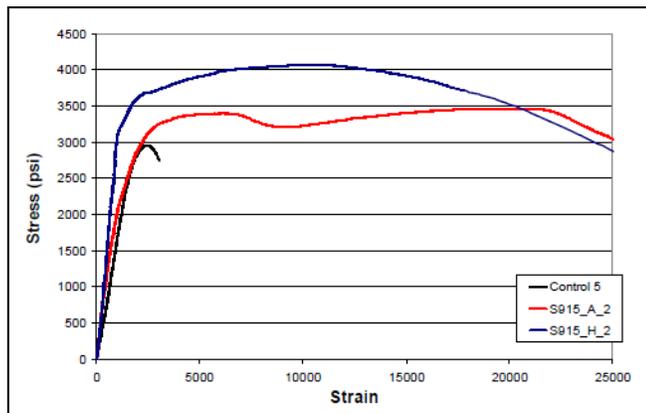


Figura 2.10: Tensión deformación para la lámina de alta densidad

En los gráficos anteriores, se puede observar que para los diferentes tipos de refuerzo y los morteros evaluados, se logra un incremento en la capacidad de la probeta en comparación con el cilindro no reforzado (control), tanto en tensión última como en deformación de rotura (aumento de la ductilidad).

El mayor incremento en tensión, se obtiene con el refuerzo unidireccional de baja densidad y con el mortero tipo H. Se observa también que el módulo de elasticidad no cambia considerablemente con la aplicación del refuerzo. En efecto, para deformaciones elásticas, las curvas tensión-deformación coinciden entre sí, y con la correspondiente probeta de control. La gran diferencia se observa luego que se alcanzan niveles de deformación no lineales, ya que en la probeta de control se produce la falla muy cerca de este punto correspondiendo a una falla frágil. Para las probetas reforzadas se retrasa bastante la falla debido a la mayor capacidad y la mayor ductilidad del material compuesto que confiere al núcleo de hormigón.

2.4.2. Ensayos de flexión (Bisby et al 2010)

Introducción

El siguiente trabajo fue desarrollado en el *Institute for Civil and Environmental Engineering, School of Engineering, University of Edinburgh*, en junio de 2010.

Los objetivos de este trabajo son: investigar experimentalmente el desempeño de los sistemas FRCM bajo cargas de flexión a temperatura ambiente e investigar experimentalmente la hipótesis de que estos sistemas poseerían mejor desempeño bajo altas temperaturas en comparación con los sistemas FRP.

Para esto, se usan vigas de 600 [mm] de largo, 150 [mm] de ancho y 80 [mm] de alto, las cuales no poseen armaduras internas pero sí poseen refuerzos externos formados por malla de fibra adheridas mediante mortero en la cara traccionada, junto con refuerzos transversales en el alma de la viga para el esfuerzo de corte (tipo U-wraps). Además, en el centro de la luz en la parte inferior, posee un perfil angular de 36 [mm] de ancho y 18 [mm] de alto como inductor de la falla por flexión. El detalle de la viga se observa en la Figura 2.11

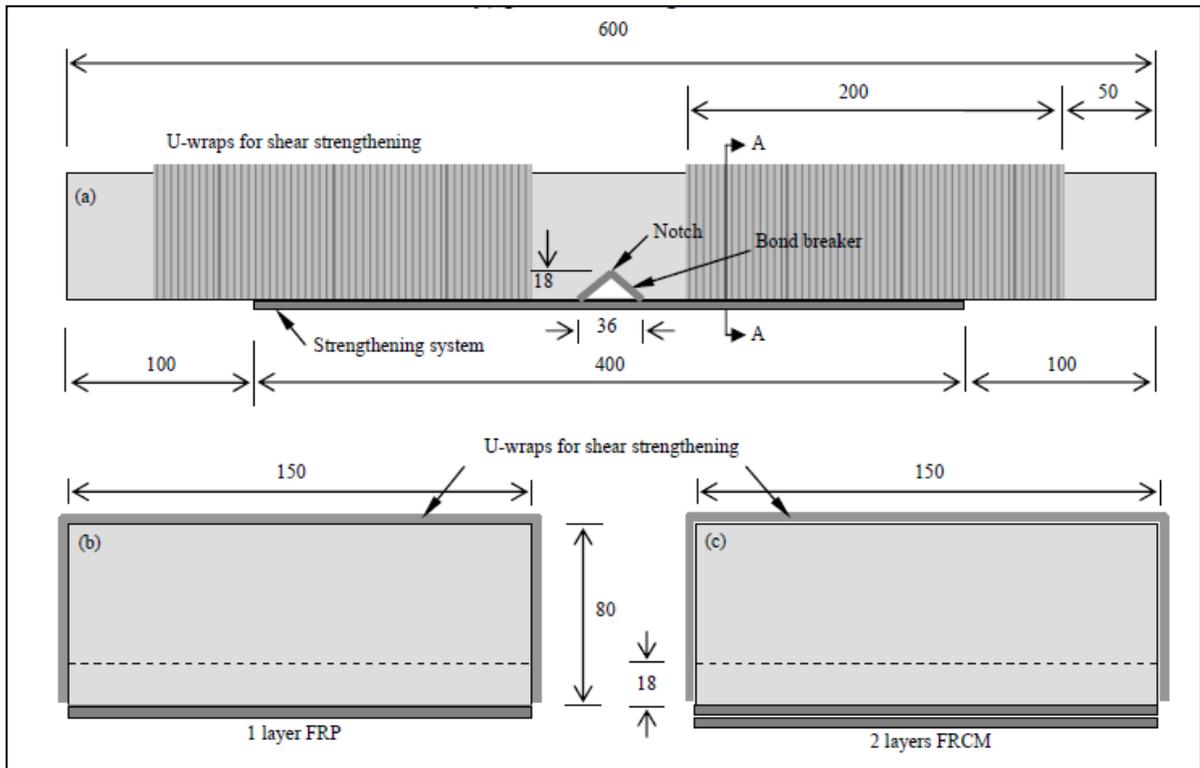


Figura 2.11: Modelo esquemático de la viga a ensayar (Dimensiones en [mm])

Materiales utilizados

Se utiliza un sistema de refuerzo integrado PBO-FRCM, que incluye tanto la malla de fibra de carbono como la matriz cementícea.

- PBO-FRCM

Se utilizan fibras sintéticas en base a PBO (*Poliparafenilbenzobisoxazol*) con un peso de 126 [g/m²], proporcionadas por la firma *Ruredil*.

- Matriz cementícea

La matriz de este sistema, posee una resistencia a la compresión y flexión nominales de 29 [MPa] y 3,5 [MPa] respectivamente, ambos a la edad de 28 días.

Preparación de las vigas

La preparación de las vigas fue la siguiente:

- Las vigas fueron hormigonadas y posteriormente curadas durante cuatro meses en condiciones de laboratorio.
- La preparación de la superficie consistió en limpiar manualmente usando una escobilla de acero y luego se usa agua a alta presión para eliminar todos los restos de material que pudieran quedar.
- Se aplica una primera capa de aproximadamente 4 [mm] del mortero sobre la superficie de la viga.
- Se coloca una malla de fibra PBO presionándola y embebiéndola dentro del mortero mediante rodillo.
- Se aplica una segunda capa de 4 [mm] de mortero.
- Se coloca una segunda malla de fibra PBO.
- Finalmente se aplica la última capa de mortero de 4 [mm].
- Se aplica el refuerzo de corte externo tipo “U-Wraps”, como se describe en la Figura 2.11
- Luego se realiza el curado a temperatura y humedad ambiente, y son ensayadas luego de tres meses.

Resultados y discusión

Las vigas son ensayadas a flexión con una carga central desviada en dos puntos, cada uno a 50 [mm] del centro de la luz, como se aprecia en la Figura 2.12.

Los resultados obtenidos para las vigas sin refuerzo (RC) y para las vigas con el sistema de refuerzo (FRCM) ensayadas a 20 °C se muestran en la Tabla 2.2.

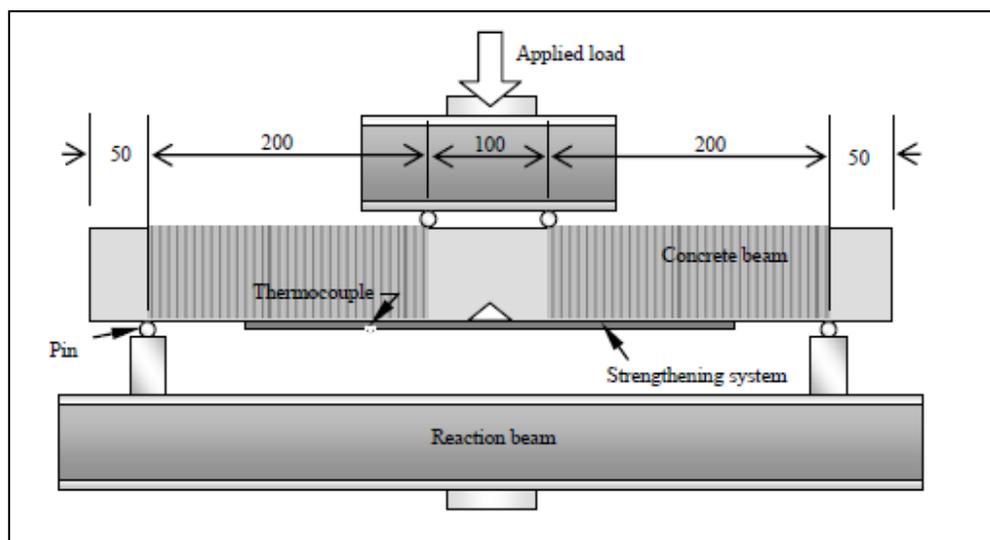


Figura 2.12: Esquema de ensayo de la viga (Dimensiones en [mm])

Tabla 2.2: Resultados obtenidos de los ensayos de vigas

Viga	Carga Última [kN]	Carga promedio + Desv. Est. [kN]	Incremento [%]
RC 1	2,3	2,2 ± 0,3	1.014
RC 2	2,4		
RC 3	1,9		
FRCM 1	24,1	24,5 ± 2,4	
FRCM 2	22,3		
FRCM 3	27,1		

De la tabla anterior, se puede observar que el incremento de la resistencia última de flexión de la viga se incrementa sobre el 1.000% usando la solución FRCM.

Por otro lado, en la Figura 2.13, se muestra el gráfico que compara el comportamiento de los sistemas FRP con FRCM y con las vigas de control para una temperatura ambiente de 20 °C.

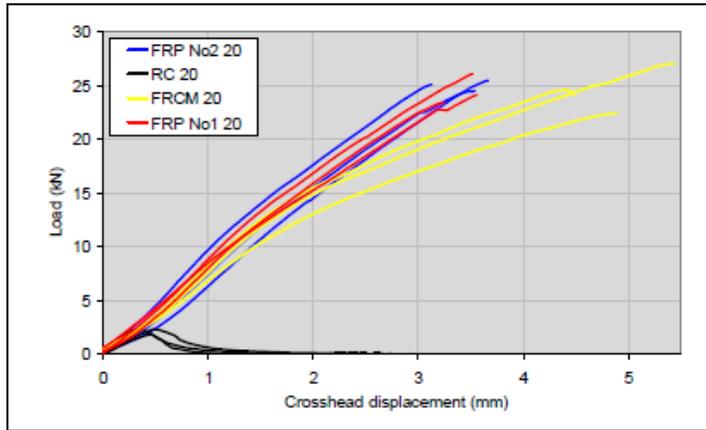


Figura 2.13: Carga – Flecha para los ensayos a flexión a 20°C

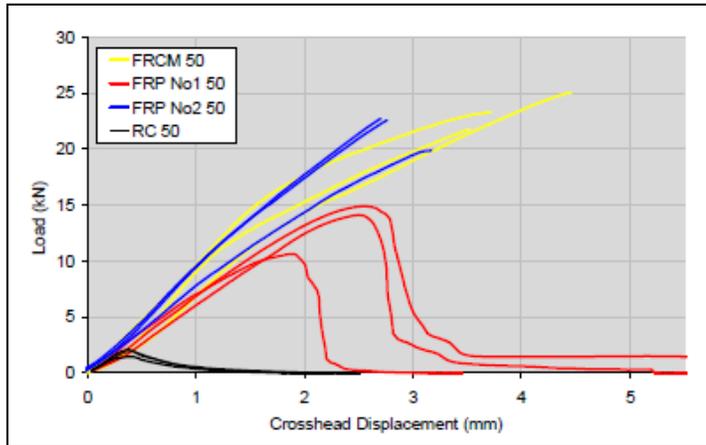


Figura 2.14: Carga – Flecha para los ensayos flexión a 50°C

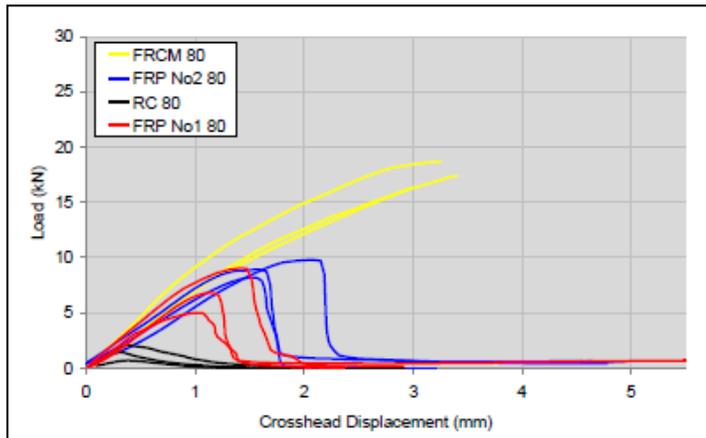


Figura 2.15: Carga – Flecha para los ensayos a flexión a 80°C

En la Figura 2.13, se puede observar que los sistemas FRCM alcanzan una resistencia un poco menor que los sistemas FRP. Sin embargo, según lo comentado anteriormente, el desempeño de los sistemas FRP bajo altas temperaturas es bastante menor en comparación a los sistemas FRCM. En efecto, en las Figura 2.14 y Figura 2.15 se muestran los resultados obtenidos para ambos sistemas bajo 50 °C y 80 °C respectivamente.

En las Figura 2.14 y Figura 2.15, se puede observar que el comportamiento de los FRCM bajo condiciones de altas temperaturas es considerablemente mayor en comparación a los FRP, los cuales pierden propiedades de resistencia última y desplazamiento máximo por efecto de la temperatura.

Para los ensayos a 50 °C (Figura 2.14), se muestra que tanto el FRCM como el FRP No2 aún tienen buen comportamiento, sin embargo el FRP No1 posee una resistencia mucho más baja llegando a una carga de aproximadamente 12 [kN].

Para los ensayos a 80 °C (Figura 2.15), se puede observar que el comportamiento de los sistemas FRP es bastante menor que el caso a temperatura ambiente, llegando a valores de carga máxima del orden de los 8 [kN], mientras que para los compuestos FRCM se tienen cargas últimas del orden de los 18 [kN].

Este comportamiento deja en evidencia lo comentado anteriormente, que bajo solicitaciones de altas temperaturas, el desempeño de los compuestos FRCM es considerablemente mayor al de los sistemas FRP.

2.5. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS FRCM

A continuación, se presentan distintos ejemplos de casos reales donde se ha optado por la aplicación del sistema de refuerzo FRCM en distintas partes del mundo. Se incluyen reparaciones en distintos tipos de obras, como arcos de puentes, pilares de estructuras marítimas, pedestales de apoyo de pilares de puentes, entre otros.

2.5.1. Refuerzo de un arco de puente de ferrocarril (Berardi et al 2011)

Este ejemplo de aplicación de la solución FRCM, se lleva a cabo en el puente ferroviario que forma parte del ferrocarril Roma – Formia, en Nápoles, Italia.

El puente es soportado por seis arcos de hormigón los cuales se apoyan en pilares de albañilería de bloques de una toba volcánica.

El refuerzo estructural fue precedido de una investigación previa para caracterizar la geometría del puente y las propiedades mecánicas de los materiales componentes. Estudios previos habían concluido que el puente sufría riesgo de colapso, por lo que el diseño estuvo dirigido a restituir la capacidad y asegurar la estabilidad de la estructura para cargas de servicio.

Así, el diseño consiste en el refuerzo de cada una de las seis bóvedas de soporte, mediante la aplicación de dos mallas de fibra (PBO) con el sistema FRCM por la cara inferior de los arcos (Figura 2.16). Este refuerzo evita la formación de grietas y modifica la respuesta última de la estructura sin modificar el comportamiento de servicio. Se opta por este tipo de refuerzo debido a la necesidad de no interrumpir el uso del puente y de intervenirlo en forma no invasiva.



Figura 2.16: Refuerzo del puente ferroviario

La aplicación del sistema fue la siguiente:

- Limpieza de la superficie y reconstrucción de las zonas deterioradas con un mortero de reparación.
- Aplicación de la primera capa de matriz cementicia de aproximadamente 5 [mm] de espesor.
- Colocación de la primera malla de fibra dentro de la matriz, asegurándose de tener una buena impregnación y embebido de la misma.
- Aplicación de la segunda capa de matriz cementicia.
- Colocación de la segunda malla de fibra dentro de la matriz.
- El refuerzo es completado con la aplicación de una capa final de matriz cementicia como recubrimiento de protección.

Debido a que el tráfico sobre el puente no fue interrumpido, el refuerzo resultó ser una alternativa económica, rápida y fácil de realizar.



Figura 2.17: Segunda capa de fibra aplicada

2.5.2. Refuerzo de los pilares de un muelle costero de hormigón armado (Nanni 2012)

Esta aplicación del sistema FRCM corresponde al refuerzo de los pilares de un muelle de hormigón armado en la ciudad de Novosibirsk, Rusia.

En el año 1958, se llevó a cabo la reconstrucción del muelle, y desde entonces, han aparecido una gran cantidad e importantes grietas en los pilares que podrían ser atribuidos a fenómenos expansivos por reacciones químicas al interior del elemento, que estarían estabilizadas (Figura 2.18).

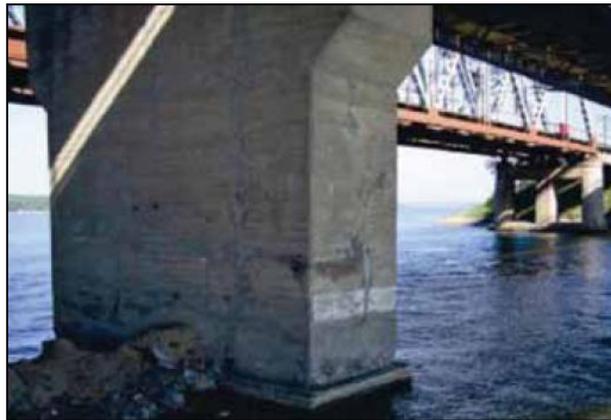


Figura 2.18: Grietas en los pilares del muelle

Posteriormente, en el año 1991, estas grietas fueron inyectadas con epóxicos, pero una serie de inspecciones y estudios realizados en 1997, indicaron que habían reaparecido, y con espesores entre los 2 [mm] y 5 [mm]. Así, se optó por llevar a cabo la reparación con el sistema FRCM.

El proyecto de reparación se completó en 2007, el cual consiste en:

- Limpiado de la superficie del hormigón con arenado.
- Redondeo de las esquinas a un radio de 30 [mm]².
- Reparación de grietas (Figura 2.19) y aplicación de una capa de matriz cementícea modificada con polímeros.
- Refuerzo con mallas de fibras PBO.
- Aplicación de una última capa de mortero impermeabilizante (Figura 2.20).

El proceso demostró ser rápido y fácil de aplicar y la intervención de la estructura resultó mínima. Con la última capa de mortero impermeabilizante se busca impedir el paso de agentes agresivos (cloruros presentes en ambientes salinos) a las armaduras de acero.



Figura 2.19: Reparación de las grietas previa a la aplicación del sistema FRCM



Figura 2.20: Aplicación de la capa de terminación con mortero impermeabilizante

² Las esquinas redondeadas tienen un mejor comportamiento en comparación a las esquinas rectas, para los sistemas FRCM (Colajanni et al 2012)

2.5.3. Reparación de los apoyos de un puente de línea de metro (Nanni 2012)

Esta reparación corresponde al refuerzo de los apoyos de hormigón de un puente de metro en el norte de la ciudad de Nueva York, Estados Unidos. Los pedestales tienen una forma de pirámide truncada y su tamaño varía dependiendo de la estratigrafía y tipo de suelo existe.



Figura 2.21: Puente a reparar en Nueva York

En la Figura 2.22, se muestra un pedestal que está siendo reparado, el cual tiene una base de 2,4 [m] x 2,4 [m] y una altura de 2,4 [m].



Figura 2.22: Pedestal a reparar

El desgaste debido al paso del tiempo, ha producido grietas importantes y desprendimientos de trozos de hormigón de los pedestales (Figura 2.23).



Figura 2.23: Agrietamiento y desprendimiento del hormigón de los pedestales del puente

Con el objetivo de restaurar la integridad y para asegurar la durabilidad de la estructura, se ha propuesto el confinamiento de los pedestales de hormigón con la solución FRCM. Se buscó esta solución por la rapidez, la fácil aplicación y la “respirabilidad” de la matriz cementícea.

La aplicación de la solución es como sigue:

- Remoción y reposición del hormigón deteriorado.
- Una vez que es removido, el espacio se llena con un mortero de hormigón compatible con la solución FRCM (Figura 2.22).
- Se le aplica una escobilla de acero para eliminar las imperfecciones y hacer un radio de las esquinas aceptable y compatible con la solución.
- Se aplica una malla de matriz cementícea con una llana y luego se presiona para embeber la fibra dentro de esta matriz.
- Se aplica una segunda capa de matriz cementícea para completar la reparación de la estructura (Figura 2.24).



Figura 2.24: Aplicación de la última capa de matriz sobre las mallas de fibras

2.5.4. Refuerzo del revestimiento de un túnel de hormigón armado (Nanni 2012)

En este caso, el refuerzo se utilizó para el revestimiento de un túnel de hormigón armado en la Autopista Egnatia Odos en Grecia. Este refuerzo es necesario debido a un déficit de armadura en los 650 [mm] de espesor del recubrimiento de hormigón armado.

Los cálculos realizados indicaban que con una capa de FRCM se incrementaría la capacidad a la flexión en aproximadamente un 14% y un 4% en la parte superior y en la parte lateral del túnel, respectivamente, y que con dos capas de FRCM se incrementaría en un 100% la capacidad a flexión tanto en la parte superior como en la parte lateral del túnel.

El proceso de refuerzo se realizó de acuerdo a lo siguiente:

- La superficie del hormigón se limpió con agua a alta presión antes de la instalación del sistema de refuerzo
- Aplicación de una capa de FRCM, lo que incluye la matriz y la fibra.
- Aplicación del recubrimiento final de matriz cementícea (Figura 2.25).



Figura 2.25: Aplicación del recubrimiento final de matriz cementícea

2.5.5. Refuerzo de una chimenea de albañilería (Nanni 2012)

Este proyecto corresponde al refuerzo de una chimenea de albañilería simple en un antiguo aserradero en la municipalidad de Gerardmer, Francia. Si bien la fábrica está fuera de funcionamiento, la chimenea es conservada como símbolo de la región industrial y es usada como soporte para antenas telefónicas y su cableado.

La chimenea tiene una altura de 38 [m], con un diámetro que varía entre los 3,6 [m] y los 1,7 [m] desde la base a su extremo superior (Figura 2.26).

Para efectos de diseño, la chimenea es considerada como una viga cantiléver donde el viento corresponde a la principal carga de diseño. Este análisis indica que es necesaria una capa del sistema FRCM. El proceso es llevado a cabo como sigue:

- Llenado de espacios que se han desprendido usando un mortero de cemento, sin mayor tratamiento de superficie.
- Aplicación de una capa simple de matriz cementícea.
- Aplicación de una malla de fibra.



Figura 2.26: Chimenea antes de comenzar la reparación con FRCM



Figura 2.27: Aplicación del recubrimiento final de matriz cementícea sobre la malla

CAPÍTULO 3: TRABAJO PRELIMINAR PARA DEFINIR LOS MATERIALES Y DOSIFICACIONES

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MALLA DE FIBRA DE CARBONO

La malla de fibra de carbono a utilizar corresponde a la *C-NET 170 BL (Bi)*, de la empresa italiana *G&P Intech*.

Esta malla, consiste en un reticulado bidireccional de filamentos de fibra de carbono, cuya presentación es en rollos de 50 [m] de largo y 1 [m] de ancho.

Los datos técnicos de la fibra de carbono se presentan a continuación en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Especificaciones técnicas de la malla fibra de carbono³

Tipo	Uni/Bi direccional	Peso [g/m ²]	Módulo Elástico [GPa]	Resistencia a la rotura [MPa]	Alargamiento [%]
C-NET 170 B	BI	170	240	>4.500	>1,5

Esta fibra está diseñada para trabajar en una o dos capas sobre elementos estructurales de hormigón o albañilería, y para ser adherida a éstos mediante una matriz cementícea, de manera de obtener el sistema compuesto de refuerzo y reparación FRCM.

La principal ventaja y característica de esta malla de refuerzo con respecto a otros tipos de refuerzo convencional es su bajo peso por unidad de área, su gran resistencia mecánica, su gran compatibilidad con la matriz cementícea y sus bajos espesores requeridos, lo que hace que sea una solución mínimamente invasiva, liviana y especial para rehabilitación estructural y reconstrucción patrimonial.

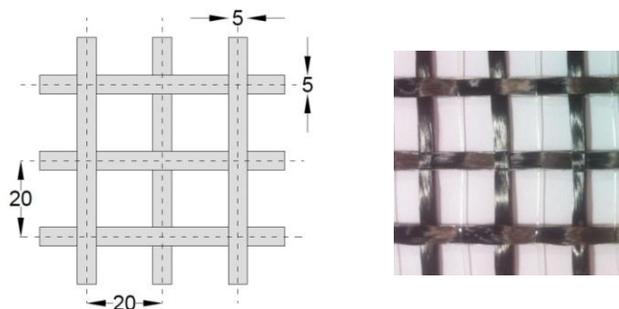


Figura 3.1: Detalle de la malla de fibra de carbono C-NET 170 (medidas en [mm])

³ Datos obtenidos del catálogo G&P Intech. www.gpintech.it

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATRICES CEMENTÍCEAS

3.2.1. Introducción

Uno de los principales componentes del sistema de refuerzo y reparación FRCM es la matriz cementícea que embebe la malla de fibra adhiriéndola al elemento a reforzar o reparar.

Esta matriz corresponde típicamente a morteros de cemento modificados con polímeros, adición que aumenta su flexibilidad, tixotropía y capacidad de adherirse sobre elementos de hormigón o albañilería.

La efectividad de la matriz cementícea depende de varios factores, como lo son su capacidad de embeber y saturar las fibras, la adherencia entre la matriz y la fibra (adherencia interna, para evitar el deslizamiento y asegurar la transferencia de esfuerzos entre la matriz y la fibra), y la adherencia entre la matriz y el sustrato donde se aplica el sistema.

Una de las ventajas de utilizar mallas de fibra de carbono (por sobre las mallas de acero), es la alta resistencia a la tracción que desarrollan filamentos pequeños, además de su bajo peso. Sin embargo, esta resistencia sólo se alcanzará en la medida que la matriz cementícea tenga la capacidad de transferir los esfuerzos a la fibra que son aplicados sobre el elemento reforzado y de esta manera, evitar otro tipo de falla de los elementos, como lo podrían ser falla por adherencia (deslaminación) con el sustrato o falla por adherencia interna del sistema (deslizamiento).

En este estudio, se investiga la influencia de 3 distintas matrices cementíceas en el desempeño del sistema de refuerzo FRCM. La primera matriz corresponde a un mortero predosificado denominado mortero patrón (MP), la segunda matriz corresponde a un mortero en base a cemento portland puzolánico modificado con polímeros y otras adiciones, denominado mortero cementíceo (MC), similar al mortero patrón y la tercera matriz corresponde a un mortero geopolimérico en base a ceniza volante como fuente de alúmino-silicato, activado con una solución alcalina de silicato de sodio e hidróxido de sodio, denominado mortero geopolimérico (MG).

3.2.2. Matriz Cementícea Patrón (MP)

3.2.2.1. Descripción

La Matriz Cementícea Patrón, corresponde al mortero que se comercializa junto con la Malla de Fibra de Carbono, y se denomina *Concrete Rock W* como parte del sistema FRCM de *G&P Intech*. Corresponde a un mortero “con nano compuestos, que confieren alta resistencia y adherencia a la matriz utilizada para la reparación estructural de elementos de hormigón. Es un mortero basado en nano compuestos, ligantes inorgánicos, fibras y áridos seleccionados, lo que le confiere una excelente adherencia a los sustratos para la reparación de hormigón”⁴.

Dentro de las ventajas se tiene que se puede utilizar tanto en interiores como exteriores, está exento de cloruros, posee alta resistencia mecánica y estabilidad química, alta adherencia, excelente trabajabilidad, resistencia a los sulfatos, altamente tixotrópico, y resistente al agua.

3.2.2.2. Datos técnicos

En la Tabla 3.2, se muestran las especificaciones técnicas del mortero patrón.

Tabla 3.2: Especificaciones técnicas del Mortero Patrón (MP)⁵

Aspecto – color	Polvo gris
pH	12
Densidad	2,05 [g/cm ³]
Agua de amasado	17% en peso del mortero
Temperatura de aplicación	+5°C / +35°C
Tiempo de trabajabilidad (20°C)	30 min
Resistencia a la compresión (28 días)	>50 MPa
Resistencia a la flexión (28 días)	>7 MPa
Módulo Elástico	28 GPa
Adherencia al hormigón	>2 MPa
Espesor de aplicación	5 – 50 mm

⁴ Catálogo G&P Intech. www.gpintech.it

⁵ Datos obtenidos del catálogo G&P Intech. www.gpintech.it. Conforme a la norma UNI EN 1504-3 Clase R4.

3.2.2.3. Ensayos de mortero en estado fresco (MP)

A modo de complementar la información de la Tabla 3.2 y para observar el comportamiento real del material, se realizaron distintos ensayos para caracterizar el comportamiento en estado fresco:

1) Pérdida de fluidez en el tiempo

Para llevar a cabo este ensayo, se siguen los procedimientos de la norma chilena oficial NCh 2257 Of 96, para la determinación de la trabajabilidad en la mesa de fluidez. Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Aglomerantes de Idiem.

Si bien la norma anterior especifica para la extensión del mortero en la mesa una cantidad de 25 sacudidas, debido a la alta trabajabilidad del mortero, se realiza un ensayo reducido, utilizando sólo 12 sacudidas de la mesa.



Figura 3.2: Mesa de fluidez para la determinación de la trabajabilidad

El procedimiento de ensayo es el siguiente:

- Se coloca el molde troncocónico centrado sobre la plataforma y se llena en dos capas compactadas con 20 golpes de pisón cada una de ellas.
- Se enrasa con regla, evitando compactar el mortero.
- Se levanta cuidadosamente el molde y se acciona el sistema para dejar caer la plataforma 12 veces en 7,5 [s].

- Se miden y registran cuatro diámetros equidistantes, con una exactitud de 1 mm.
- Se calcula la fluidez del mortero como la relación porcentual entre el diámetro promedio medido y el diámetro de la mesa (254 [mm])

Para realizar los ensayos, se prepara una cantidad de 800 [g] de mortero y 136 [ml] de agua ($A/M = 0,17$), se mide la fluidez inicial, y luego de esto se mide la fluidez cada 15 [min] por un período de 3 [hrs]. Entre cada medición, el mortero se cubre con un plástico de polietileno para evitar la pérdida de agua, y antes de medir la fluidez, se homogeniza la mezcla con 1 [min] en velocidad lenta en la mezcladora.

La temperatura de la sala de ensayo se mantienen entre 17 °C y 23 °C y la humedad relativa del ambiente se mantiene mayor al 50%.

Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3.3 y en la Figura 3.3.

Tabla 3.3: Pérdida de fluidez en el tiempo Mortero Patrón (T = 20°C)

Pérdida de fluidez en el tiempo MP		
Tiempo [min]	Diámetro [mm]	Fluidez [%]
0	187	73,5
15	181	71,3
30	180	70,9
45	178	70,1
60	175	68,9
75	174	68,3
90	173	67,9
105	169	66,3
120	166	65,4
135	161	63,4
150	157	61,7
165	154	60,7
180	151	59,5

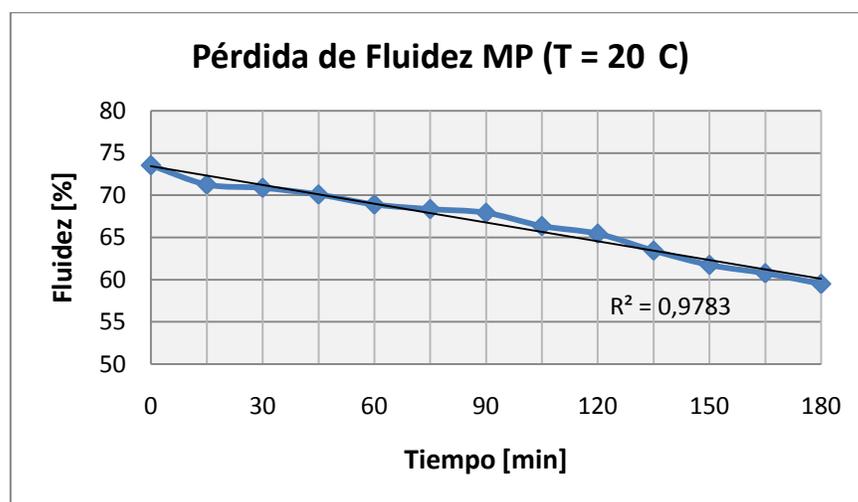


Figura 3.3: Pérdida de fluidez en el tiempo Mortero Patrón

2) Sensibilidad al contenido de agua

Al igual que el ensayo anterior, en este caso se siguen los procedimientos de la norma chilena oficial NCh 2257 Of 96, para la determinación de la trabajabilidad en la mesa de fluidez.

Para este caso, se preparan distintas muestras de mortero con distintas cantidades de agua, y se mide la fluidez en la mesa. Al igual que el caso anterior, se realiza el ensayo reducido con 12 golpes por capa, debido a la alta trabajabilidad del mortero.

Los resultados se expresan en la Tabla 3.4 y en la Figura 3.4.

Tabla 3.4: Sensibilidad al contenido de agua Mortero Patrón

Variación c/r agua de amasado [%]	Diámetro [mm]	Fluidez [%]
+10	229	90
+5	224	88
0	218	86
-5	208	82
-10	184	73

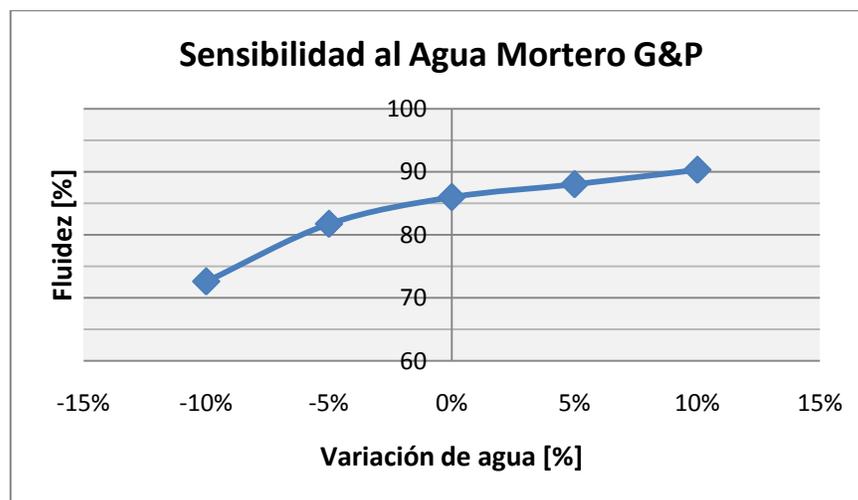


Figura 3.4: Sensibilidad al contenido de agua Mortero Patrón

3.2.2.4. Ensayos de mortero en estado endurecido (MP)

Para la caracterización de las matrices cementíceas es necesario realizar los ensayos de flexión y compresión de morteros de cemento (NCh 158 Of 67), para la obtención de la resistencia a la compresión y flexo-tracción de las matrices a utilizar.

Para esto, se utilizan moldes Rilem, los cuales poseen las siguientes dimensiones:

Longitud $l = 160$ [mm], tolerancia $\pm 0,4$ [mm];

Ancho $a = 40$ [mm], tolerancia $\pm 0,1$ [mm]; y

Altura $h = 40$ [mm], tolerancia $\pm 0,1$ [mm]

Todo el procedimiento de preparación de mezclas, conservación de probetas, ensayos, cálculos y toma de datos es realizado en concordancia con la norma citada anteriormente.

Se confeccionaron 2 moldes con 3 probetas cada uno, de modo de ensayar a compresión y flexo-tracción 3 probetas a una edad de 7 días y 3 probetas a una edad de 28 días.

Para esto, se utilizaron 2000 [g] de mortero y 340 [ml] de agua ($A/M = 0,17$) para ambos moldes de 3 probetas cada uno. Luego de la confección de las probetas, éstas se conservan en cámara húmeda ($T^{\circ} = 23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, $HR \geq 90\%$) hasta alcanzar la edad de ensayo correspondiente.

Finalmente, una vez que las probetas alcanzan la edad especificada son ensayadas a flexo-tracción y luego, los trozos resultantes, a compresión siguiendo las especificaciones de la norma anterior.

Los resultados obtenidos son mostrados en la Figura 3.5.

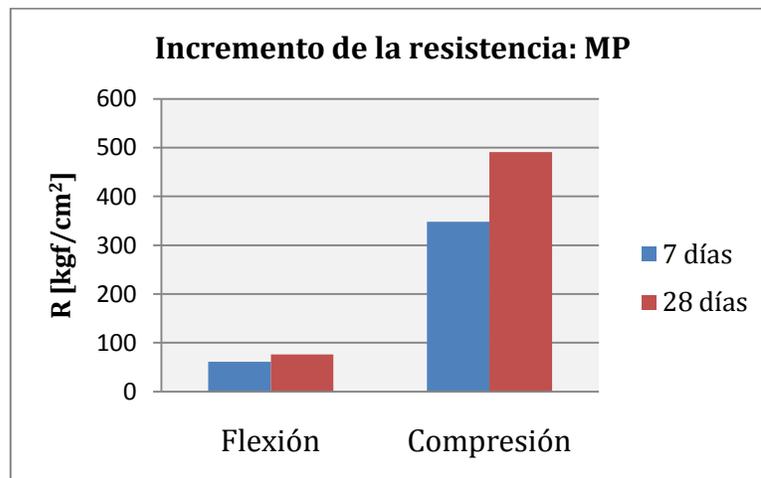


Figura 3.5: Resistencias mecánicas a 7 y 28 días (MP)

3.2.3. Matriz Cementícea (MC)

3.2.3.1. Introducción a los morteros modificados con polímeros

A partir del año 1920, se ha estudiado el efecto de la adición de polímeros orgánicos a morteros y hormigones, con el fin de modificar alguna de sus propiedades o disminuir las desventajas que presenta el cemento portland ordinario.

Los morteros modificados con polímeros se obtienen al incorporar adiciones poliméricas a las mezclas de mortero u hormigón. Dentro de estas adiciones se encuentran ciertos tipos de látex, polvos redispersables, polímeros solubles en agua, resinas líquidas o monómeros (Figura 3.6).

Mecanismo de endurecimiento de los morteros modificados con polímeros

El endurecimiento de los morteros modificados con polímeros está determinado tanto por la hidratación del cemento como por la formación de la película polimérica dentro del mortero para formar la co-matriz de cemento-polímero. En general, la hidratación del cemento precede a la formación de la película polimérica (Ohama 1995).

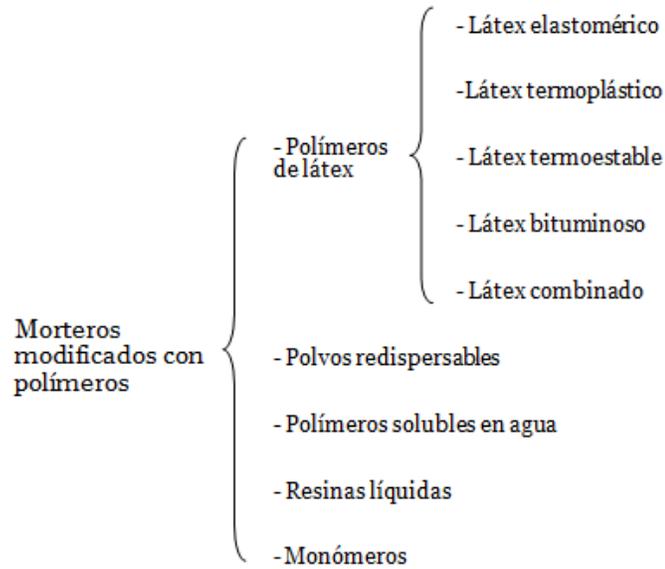


Figura 3.6: Tipos de polímeros usados para modificar morteros y hormigones

El proceso de formación de la co-matriz de cemento-polímero puede ser simplificado en un modelo de tres etapas (Figura 3.7) (Traducido de Ohama 1995), el que será descrito a continuación:

- Etapa 0: Una vez que el polímero (emulsión acuosa) es mezclado con el mortero fresco, las partículas del polímero se encuentran uniformemente dispersas en la pasta de cemento.
- Etapa 1: El gel de cemento producto de la hidratación, es formado gradualmente y las partículas de cemento son depositadas parcialmente en la superficie de las partículas de cemento no hidratadas.
- Etapa 2: Mientras avanza el proceso de hidratación y de formación del gel de cemento, las partículas de polímero son confinadas a los poros capilares. Así, mientras más se reduce el agua capilar, las partículas de polímero forman una película en la superficie de las partículas de cemento.
- Etapa 3: Finalmente, cuando el agua es extraída debido a la hidratación del cemento, las partículas de polímero se aglomeran en forma de película o membrana, enlazándose con el cemento hidratado formando una red monolítica, donde la fase polimérica penetra en toda la fase hidratada del cemento. Estas fases envuelven a los agregados, pudiendo dejar aire ocluido entre las partículas, debido a las características hidrofílicas e hidrofóbicas de algunos polímeros (Mindess 2003).

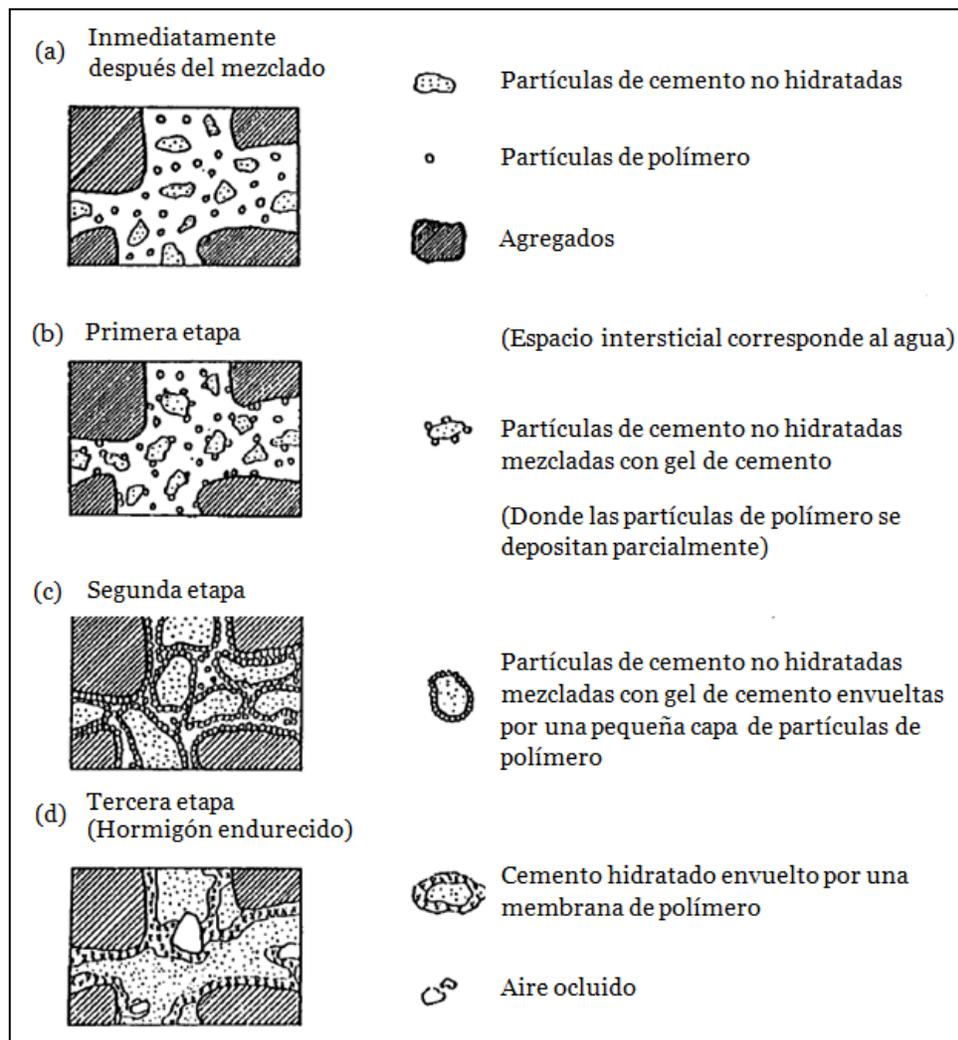


Figura 3.7: Modelo simplificado de la formación de la co-matriz (Ohama 1995)

Propiedades de los morteros modificados con polímeros

1) Propiedades en estado fresco

- Trabajabilidad

En general, los morteros y hormigones modificados con polímeros poseen mejor trabajabilidad sobre morteros y hormigones convencionales. Lo anterior, en el sentido que la incorporación de polímeros genera una mezcla con mayor consistencia y trabajabilidad, debido al efecto de rodamiento de las partículas esféricas y redondeadas del polímero.

La fluidez de la mezcla se ve incrementada al aumentar la relación agua cemento en peso (A/C) y la relación polímero cemento en peso (P/C)⁶. Además, para una relación A/C fija, al aumentar la relación P/C. De forma equivalente, la relación A/C es reducida de forma considerable para una fluidez (asentamiento de cono) dada, al aumentar la relación P/C.

- **Incorporación de aire**

En comparación con morteros y hormigones convencionales, en la mayoría de los morteros y hormigones modificados con polímeros se incorpora una gran cantidad de aire al incorporar esta adición. Esto se debe principalmente a la acción tensioactiva (o surfactante) de los emulsionantes y estabilizantes presentes en los polímeros utilizados en el hormigón⁷. Esta característica, genera un ordenamiento de las partículas que favorece la incorporación de aire y dificulta su eliminación en los procesos de compactación.

El aire incorporado es útil para aumentar la trabajabilidad de los morteros y hormigones, sin embargo, son perjudiciales al reducir considerablemente las resistencias mecánicas. Por lo mismo, muchos morteros y hormigones modificados con polímeros incorporan también agentes antiespumantes (o desaireantes) para disminuir este efecto y así no afectar las resistencias mecánicas.

- **Retención de agua, exudación y segregación**

La incorporación de polímeros a morteros y hormigones produce un aumento considerable en la retención de agua de estos materiales. Esto se debe principalmente a la acción sellante e impermeabilizante de la película formada por las partículas de polímero. La retención de agua aumenta al aumentar el contenido de polímero agregado, manteniéndose aproximadamente constante sobre una relación polímero cemento entre un 5 a un 10%.

Por otro lado, a diferencia de los morteros y hormigones convencionales los cuales pueden estar afectados por fenómenos de exudación o segregación, esto no ocurre en los modificados con polímeros, debido a las propiedades hidrofílicas mencionadas anteriormente.

⁶ La relación polímero cemento (P/C), es definida como la relación entre el peso total de polímero sólido y peso del cemento.

⁷ Los tensioactivos o surfactantes o agentes de superficie activa, son especies químicas con una estructura dual (grupo hidrofílico e hidrofóbico).

2) Propiedades en estado endurecido

- Resistencias mecánicas

En general, los morteros y hormigones modificados con polímeros presentan un aumento significativo en las resistencias a la tracción y flexión, sin embargo, presentan una disminución en la resistencia a la compresión, comparados con morteros y hormigones convencionales. Esto se debe principalmente a la resistencia a la tracción del polímero por sí solo, y al aumento de la adherencia entre la pasta de cemento modificado por polímeros y los agregados, debido a la incorporación del polímero.

Las resistencias mecánicas de los morteros y hormigones modificados con polímeros están influenciadas por muchos factores, dentro de los cuales destacan: las características de los materiales utilizados (polímeros, cemento y agregados), los parámetros de diseño de mezclas (relación A/C y P/C), método de curado, etc.

- Relación tensión-deformación, módulo de elasticidad y ductilidad

En general, los morteros y hormigones modificados por polímeros poseen mayor deformación, ductilidad y elasticidad que los morteros y hormigones convencionales, y su cuantía depende del tipo de polímero y de la relación P/C.

En general, la deformación máxima a compresión aumenta al aumentar la relación P/C, mientras que el módulo de elasticidad a compresión no se ve afectado. Por otro lado, la deformación máxima a tracción aumenta al aumentar la relación P/C mientras el módulo de elasticidad a tracción disminuye. Esto se explica debido a que la película de polímero evita la propagación de microfisuras debido a su mayor resistencia a la tracción y capacidad de elongación que posee.

- Retracción, creep y expansión térmica

La adición de polímeros a morteros y hormigones puede aumentar o disminuir la retracción por secado.

Los morteros y hormigones modificados con polímeros presentan en general un menor creep que los morteros y hormigones convencionales, a pesar de la inclusión de polímeros flexibles, incluso a bajas temperaturas.

Por último la adición de polímeros mantiene o aumenta levemente la expansión térmica en los morteros y hormigones modificados con respecto a los convencionales.

- **Adhesión o adherencia**

Una de las propiedades más importantes que se modifican al incorporar polímeros a morteros y hormigones es el aumento de la adhesión o adherencia de éstos sobre varios sustratos en comparación con morteros y hormigones convencionales. Este aumento es atribuido a la alta adhesión que poseen los polímeros incorporados, y se ve afectada tanto por la relación P/C, como por las características del sustrato. En general, la adherencia de los morteros modificados con polímeros a otros sustratos aumenta al aumentar la relación P/C. Sin embargo, en general existe una relación P/C óptima, que al aumentarla produce disminución en la adherencia.

La incorporación de polímeros, entonces, aumenta tanto la adhesión interna del mortero (tixotropía, viscosidad y capacidad de no escurrimiento) como la adherencia entre el mortero y otro tipo de sustrato (típicamente hormigón endurecido, albañilería, madera, etc.).

3.2.3.2. Características de la matriz cementícea (MC) para FRCM

La matriz cementícea MC, corresponde a un mortero en base a cemento, arena, microsilíce, fibras sintéticas, polímero acrílico en solución acuosa, antiespumante y aditivo reductor de agua. Es el resultado de múltiples iteraciones y modificaciones tanto de materiales como dosificación, hasta lograr características de mortero fresco y endurecido que lo hacen idóneo para ser utilizado en el sistema de refuerzo FRCM.

Corresponde a un mortero de alta fluidez, con buenas características tixotrópicas y consistencia, que produce muy baja segregación o exudación de agua.

3.2.3.3. Materiales

- Cemento:

El cemento utilizado es de Clasificación Portland Puzolánco y Grado Alta Resistencia según la norma NCh 148 Of 68, y su marca comercial es *Melón Extra – Alta Resistencia*. Sus características se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Características técnicas del cemento para la matriz cementícea⁸

Variable de control	
Fraguado Inicial [min]	100
Fraguado Final [min]	150
Superficie Específica Blaine [cm²/g]	5.000
Peso específico [g/dm³]	2,95
Pérdida por Calcinación [%]	2,0
Residuo Insoluble [%]	12

- Arena:

La arena a utilizar en el mortero cumple un papel importante al ser el esqueleto soportante del mismo. Es necesario que sea rodada y fina, para asegurar gran cohesión entre los materiales en estado fresco y evitar la segregación o exudación de agua. Además la estructura capilar que se obtiene, le otorga durabilidad al mortero, debido a que impide el ingreso de agentes agresivos, pero al mismo tiempo, permite el paso de humedad en forma de vapor.

La arena empleada es de origen fluvial del Río Maipo, de característica rodada y lavada, de alta dureza, libre de impurezas orgánicas y partículas desmenuzables. Para asegurar una correcta dosificación y graduación, se utiliza separada en 4 fracciones, las que se muestran en la

Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Fracciones de arena para mortero MC

Fracción	Tamiz que pasa [mm]	Tamiz retenido [mm]	Dosificación en peso sobre el total de arena [%]
1	2,36	1,18	12,5
2	1,18	0,59	17,6
3	0,59	0,15	45,7
4	0,15	0,045	24,2

⁸ Datos obtenidos de catálogo Cementos Melón: www.melon.cl



Figura 3.8: Fracciones y proporción de arena para morteros

En la Tabla 3.7, se presentan las densidades aparente suelta y compactada para cada fracción y para el árido combinado. Además, en la Tabla 3.8, se presenta la densidad real y absorción de agua para el árido combinado en las proporciones de la

Tabla 3.6.

Tabla 3.7: Densidad aparente por fracción y árido combinado

Fracción	Dens. Ap. Suelta [kg/m³]	Dens. Ap. Comp. [kg/m³]
Arena 1	1.464	1.572
Arena 2	1.418	1.540
Arena 3	1.360	1.505
Arena 4	1.408	1.610
Arena Combinada	1.554	1.721

Tabla 3.8: Densidad real y absorción de agua del árido combinado

Fracción	Dens. Real Seca [kg/m³]	Dens. Real SSS [kg/m³]	Densidad Neta [kg/m³]	Absorción de Agua [%]
Arena Combinada	2.602	2.646	2.722	2,41%

A continuación en la Tabla 3.9 y en la Figura 3.9, se presenta la granulometría del árido combinado tanto el valor numérico como de forma gráfica respectivamente.

Tabla 3.9: Granulometría arena para mortero MC

Abertura [mm]	% pasa
2,36	100
1,18	88
0,6	74
0,3	43
0,15	16
0,075	8

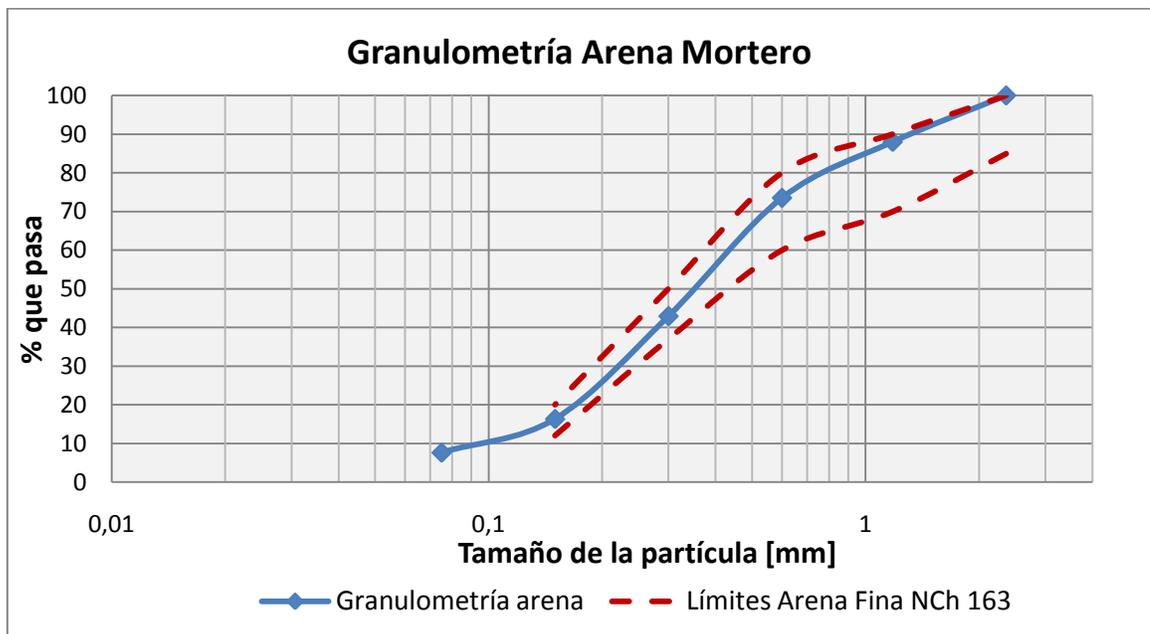


Figura 3.9: Granulometría arena para mortero MC

La granulometría anterior está dentro de los rangos granulométricos de la arena tamaño 5 de la Tabla D.1 del Anexo D de la Norma NCh 163:2013, catalogada como arena fina (Figura 3.9)

Como recomendación y a modo informativo, la norma propone usar, para este tipo de arena, mayores dosis de cemento y de agua. Recomienda también el uso de estas arenas para morteros de recubrimiento y pega de albañilería.

- **Microsílice (*silica fume*):**

Con el fin de mejorar la estructura granulométrica de la fracción fina, se utiliza como adición cementícea suplementaria microsíllice (*silica fume*). Este aumento en el contenido de finos trae mejoras importantes a la matriz cementícea del sistema FRCM, como aumentar su cohesividad y consistencia, evitar la excesiva exudación, aumentar la adhesividad entre la matriz y la fibra y la impregnación de la misma (Wiberg 2003).

Como microsíllice se utiliza el producto de marca comercial *SikaFume*, que corresponde a un “aditivo en polvo compuesto por microsíllice de alta calidad.”

Como principal ventaja a modo general es que disminuye la exudación por segregación en estado fresco, aumenta la resistencia mecánica, la impermeabilidad al agua y a agentes químicos, la resistencia química, la cohesión y la durabilidad frente a agentes abrasivos.

Los datos técnicos de la microsíllice utilizada en esta investigación se muestran en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10: Datos técnicos de la microsíllice del mortero cementíceo⁹

Aspecto / Color	Polvo / Gris
Partícula / Forma	Esférica / Amorfa
Peso Específico	2,2
Superficie específica [m²/kg]	18.000 - 22.000
Finura (diámetro promedio) [µm]	0,1 - 0,2
Análisis Químico	
SiO₂	93%
Fe₂O₃	0,8%
Al₂O₃	0,4%
CaO	0,6%
MgO	0,6%
Na₂O	0,2%
K₂O	1,2%
C (libre)	2,0%
SO₃	0,4%

⁹ Datos obtenidos de la ficha técnica del producto: chl.sika.com

- **Fibras sintéticas:**

Para aumentar la cohesión y tixotropía, la adherencia y la resistencia a la fisuración por retracción de secado, se utilizan microfibras sintéticas dispersadas en el mortero.

Por otro lado, la presencia de microfibras ayuda a distribuir las tensiones, y la fisuración del mortero una vez que aparecen las primeras fisuras al quedar expuesto a secamiento. Además, le otorga cierta flexibilidad a los morteros.

Para el caso del refuerzo con el sistema FRCM, la presencia de fibra aumenta la cohesión entre capas de mortero, quedando la fibra inmersa dentro de las capas intermedias y el recubrimiento final, logrando un sistema compuesto monolítico que trabaja en conjunto.

La fibra utilizada es de marca comercial *SikaFiber P-6*, la cual corresponde a una “fibra sintética de polipropileno de 6 mm de largo, diseñada para controlar la fisuración en hormigones y morteros.”

Las principales ventajas de esta fibra es que “reduce la fisuración por retracción y asentamiento plástico, no modifica la trabajabilidad de la mezcla, no afecta los tiempos de fraguado, aumenta ligeramente las resistencias mecánicas, mejora la resistencia al impacto y desgaste, y aumenta la cohesión de la mezcla.”

La dosificación típica de esta fibra es de 600 [g/m³] de hormigón fresco.

- **Polímero acrílico:**

Una propiedad muy importante que deben tener los morteros usados como matriz para el sistema FRCM es la adherencia, la cual puede ser tanto interna (de la matriz con la fibra), o externa (del sistema compuesto con el elemento a reforzar). Es sabido que al incorporar polímeros a la matriz cementícea, la adherencia entre ésta y los sustratos mejora considerablemente, además se modifica la resistencia y el módulo de elasticidad, propiedades también importantes en el desempeño de este sistema de refuerzo y reparación.

Existen dos formas de incorporar polímeros a morteros y hormigones: impregnando el compuesto endurecido con monómeros para posteriormente efectuar el tratamiento conducente a la polimerización, obteniendo hormigón impregnado con polímero (*Polymer Impregnated Concrete, PIC*), o añadiendo el polímero en el mezclado, obteniendo hormigón modificado con polímero (*Polymer Modified Concrete, PMC*). Ambos tipos de incorporación de polímero tienen efectos similares en cuanto al aumento de la adherencia de las matrices, sin embargo, en PIC, la matriz posee un módulo de elasticidad mayor, volviéndose frágil, y en PMC, la matriz se vuelve más dúctil con un módulo de elasticidad menor. (Bentur & Mindess 2007).

Por otro lado, el agregar polímero a la matriz reduce la permeabilidad del mortero, y mejora la durabilidad, la resistencia a los ciclos de hielo – deshielo y la resistencia a la radiación UV. (Lavelle 1988).

En este estudio, la adición de polímero se realiza durante el proceso de mezclado del mortero (PMC).

El polímero empleado tiene un nombre comercial de *Acronal S400* y corresponde a una dispersión aniónica de un copolímero de éster acrílico y estireno en base acuosa, libre de plastificante. Posee varios usos, dentro de los cuales destacan: para fabricar morteros flexibles, como puente adherente, morteros de pega flexible para cerámicos, lechadas de impermeabilización, fragüe para baldosas, anticorrosivo, aditivos para aglomerantes hidráulicos, etc.

Tabla 3.11: Datos técnicos del polímero (látex acrílico) utilizado en el mortero cementíceo¹⁰

Aspecto / Color	Líquido pegajoso / Blanco
Contenido de sólidos [%]	57 ± 1
Viscosidad [MPa s]	140 - 200
pH	7,0 - 8,5
Densidad [g/cm³]	1,04
Tamaño promedio de partículas [µm]	0,2

- **Aditivo Superplastificante:**

El aditivo superplastificante utilizado en un principio para el mortero cementíceo, fue el que se utilizó para confeccionar el hormigón para las vigas de ensayo, y que se detalla en el Anexo B..

- **Aditivo Antiespumante:**

Se utiliza, eventualmente, un aditivo antiespumante (*defoamer*), con el fin de disminuir la incorporación de aire debido a la presencia de polímero en el mortero. El producto utilizado tiene por nombre comercial *Agitan 731*, de la empresa *Münzin Chemicals*. Corresponde a una mezcla de polisiloxanos modificados con compuestos orgánicos alcoxilados no iónicos. Es usado principalmente en pinturas para construcción, productos diversos para construcción, líquidos industriales para revestimiento de maderas, adhesivos, limpiadores, entre otros.

¹⁰ Datos obtenidos de la ficha técnica del producto: <http://www.basf.com>

3.2.3.4. Ajuste de la dosificación de la matriz MC

La dosificación del mortero cementíceo es el resultado de múltiples iteraciones tanto de materiales como de proporción de los mismos, hasta lograr una mezcla que cumpla con las características requeridas tanto del mortero fresco como endurecido. Algunas de estas características son: alta fluidez (>90%), alta tixotropía (no escurrimiento al aplicarse en superficies verticales) y cohesión, baja segregabilidad, alta adherencia (>2,5 [MPa]) y un buen desempeño tanto a flexión como a compresión, no inferior a la del mortero patrón (MP).

- Dosificación inicial:

En primer lugar, dados los requerimientos de contenido de finos, trabajabilidad y propiedades mecánicas, se fija una cantidad de cemento portland puzolánico grado alta resistencia (NCh 148) de 450 [kg/m³] y una relación agua/cemento en peso $A/C = 0,45$. Así, la cantidad de agua queda determinada por la relación:

$$A = 0,45 \cdot C$$

A = Contenido de agua, [kg/m³]

C = Contenido de cemento, [kg/m³]

Luego, la cantidad de agua teórica es 202,5 [kg/m³].

Esta cantidad de agua debe ser provista en parte por la fase acuosa del polímero, que según la Tabla 3.11 posee un 57% de partículas sólidas en peso y el resto sería agua.

Se fija para partir, la relación contenido de polímero sólido y contenido de cemento $P_S/C = 0,05$.

Con esto, la cantidad de polímero (parte sólida de la emulsión) se obtiene mediante la relación:

$$P_S = 0,05 \cdot C$$

P_S = Parte sólida de emulsión polimérica, [kg/m³]

C = Contenido de cemento, [kg/m³]

Luego, la cantidad de parte sólida de polímero a incorporar a la mezcla es 22,5 [kg/m³]. Así, la cantidad de emulsión polimérica se obtiene como:

$$\frac{P_S}{P_S + P_A} = 0,57$$

$P_S =$ Contenido sólido de la emulsión, [kg/m³]

$P_A =$ Parte acuosa de la emulsión, [kg/m³]

Así, el aporte de agua a la mezcla de la emulsión es 17 [kg/m³]

La cantidad de microsílíce se fija en un 5% con respecto al peso de cemento, valor generalmente recomendado. Luego, esta cantidad resulta igual a 22,5 [kg/m³].

La cantidad de microfibra sintética, recomendada para morteros de este tipo corresponde a 600 [g/m³], por lo que es lo que se utiliza en el mortero experimental en estudio.

Se desea obtener un mortero de alta consistencia y tixotropía, por lo que la cantidad de aditivo superplastificante se debe encontrar en el nivel de un 1% con respecto al peso de cemento, lo que corresponde a una dosis de superplastificante de 4,5 [kg/m³].

El árido utilizado se fija, de acuerdo a recomendaciones para morteros de este tipo, en una cantidad de 65% con respecto al peso total de todos los componentes del mortero. Luego, el peso del árido se obtiene de la relación:

$$A_r = 0,65 \cdot \frac{C + (P_S + P_A) + M_S + A + A_d + F}{1 - 0,65}$$

$A_r =$ Contenido total de árido, [kg/m³]

$C =$ Contenido de cemento, [kg/m³]

$P_S =$ Parte sólida de polímero, [kg/m³]

$P_A =$ Parte acuosa de polímero, [kg/m³]

$M_S =$ Cantidad de microsílíce, [kg/m³]

$A =$ Cantidad de agua, [kg/m³]

$A_d =$ Cantidad de aditivo superplastificante, [kg/m³]

$F =$ Cantidad de microfibra sintética, [kg/m³]

Con esto, la cantidad total de árido fino a utilizar es 1.305 [kg/m³]

Finalmente, la dosificación primera a utilizar es la que se muestra en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12: Dosificación teórica inicial de mortero cementíceo (MC) para FRCM

Material	Símbolo	Cantidad [kg/m³]
Cemento	C	450
Polímero (Parte Sólida + Parte Acuosa)	P	39,5
Microsílice	Ms	22,5
Agua adicional	A	185,5
Arena 1	Ar1	162,7
Arena 2	Ar2	229,8
Arena 3	Ar3	596,0
Arena 4	Ar4	316,5
Aditivo Superplastificante	Sp	4,5
Fibra	F	0,6
DENSIDAD [kg/m³]	D	2.007,6

- **Método de mezclado del mortero cementíceo**

El mezclado de los materiales se realiza en forma sistemática, y siguiendo siempre los mismos tiempos de manera de obtener morteros con la menor variabilidad posible. Los pasos seguidos se listan a continuación:

- 1) Se pesa y se mezcla en la mezcladora el polímero, con el 75% del agua adicional por un tiempo de entre 3 a 5 [min].
- 2) Se pesan el cemento y la microsíllice y se mezclan manualmente dentro de una bolsa hasta que el contenido se homogenice completamente.
- 3) Se pesan por separado las 4 fracciones de arena y se mezclan manualmente dentro de una bolsa hasta obtener un árido combinado de forma homogénea. Luego se pesa el agua de absorción del árido (Calculada según la absorción de agua de la arena de la Tabla 3.8) y se mezcla completamente con el árido

combinado de manera de incorporar el árido en estado saturado superficialmente seco (SSS)¹¹.

- 4) Se mezcla el aditivo superplastificante con el 25 % de agua adicional restante.
- 5) Se agrega la mezcla de cemento y microsílíce sobre la emulsión de polímero y el agua y se mezcla durante 3 a 5 [min] a velocidad lenta.
- 6) Se agrega el árido combinado en condición SSS.
- 7) Se agrega el agua con el aditivo superplastificante.
- 8) Se agrega la fibra sintética.
- 9) Se mezclan todos los componentes durante 5 [min] a velocidad lenta, eventualmente se raspan los bordes para mezclar los componentes en su totalidad.

- **Variación del contenido de polímero:**

Un componente fundamental en la dosificación de los morteros como matriz para el sistema de refuerzo y reparación FRCM es el contenido de polímero, como se mencionó anteriormente.

Para evaluar y cuantificar el efecto de la adición de la emulsión de polímero en las propiedades del mortero tanto en estado fresco como en estado endurecido, se realizan distintos ensayos. Al mortero en estado fresco, se le mide la consistencia mediante la mesa de fluidez (NCh 2257), y en estado endurecido se realizan ensayos de resistencia mecánica (compresión y flexión) (NCh 158), y se registra el peso y dimensiones de cada probeta de manera de obtener la densidad de las mismas.

En una primera serie de ensayos, se realizan morteros con una variación en la relación Ps/C desde 0 hasta 0,5.

Los resultados de los ensayos en estado fresco correspondientes a esta serie se muestran en la Figura 3.10 y los resultados de los ensayos en estado endurecido a edades de 3 y 7 días se muestran en la Figura 3.11 y Figura 3.12, respectivamente.

¹¹ En experiencias previas, se observa que al incorporar el árido en estado seco absorbe gran cantidad de agua de amasado, lo que produce una mezcla poco trabajable y segregada, aumentando los tiempos de mezclado.

Por otro lado, en la Tabla 3.13 se muestran los resultados de los ensayos de resistencia mecánica tanto a flexión como compresión a 3 y 7 días y la relación entre estas resistencias.

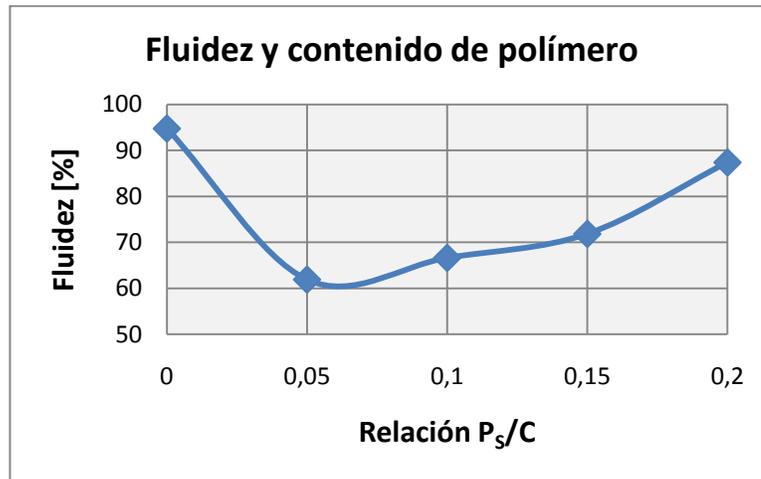


Figura 3.10: Influencia del contenido de polímero en la fluidez del mortero

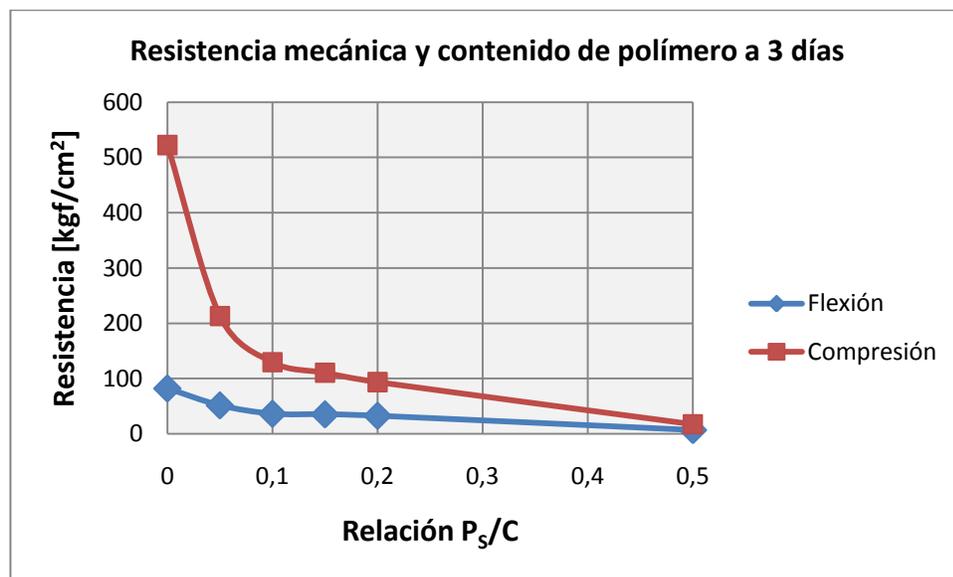


Figura 3.11: Influencia del contenido de polímero en la resistencia mecánica del mortero. Edad 3 días

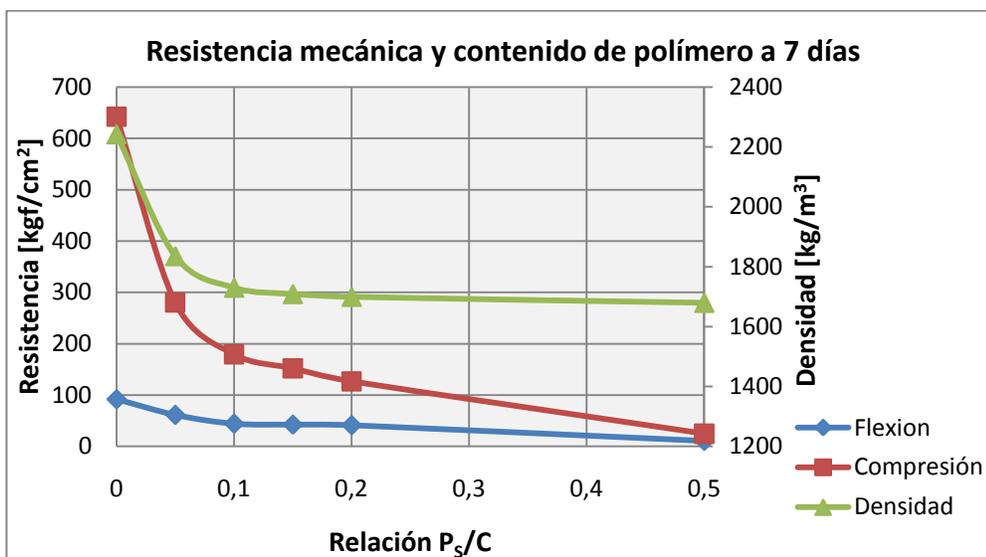


Figura 3.12: Influencia del contenido de polímero en la densidad y propiedades mecánicas del mortero. Edad 7 días

Tabla 3.13: Incremento de resistencia mecánica y contenido de polímero

Compresión			
P _s /C	Resistencia 3 días [kgf/cm ²]	Resistencia 7 días [kgf/cm ²]	Relación R3/R7
0	522	642	0,81
0,05	213	280	0,76
0,1	129	179	0,72
0,15	110	152	0,72
0,2	94	127	0,74
0,5	17	25	0,68
Flexión			
P _s /C	Resistencia 3 días [kgf/cm ²]	Resistencia 7 días [kgf/cm ²]	Relación R3/R7
0	82	92	0,89
0,05	52	61	0,85
0,1	36	44	0,82
0,15	35	42	0,83
0,2	33	41	0,80
0,5	7	11	0,64

De la Figura 3.11 y Figura 3.12, se observa que la resistencia mecánica (en especial la compresión), disminuyen drásticamente al aumentar el contenido de polímero.

La resistencia a compresión se ve mayormente afectada por sobre la resistencia a la flexión conforme aumenta el contenido de polímero en el mortero. De la Figura 3.12, se puede observar que la densidad del mortero en estado endurecido también disminuye al aumentar el contenido de polímero. Por otro lado, se observa que al incorporar polímero se agrega de forma considerable aire a los morteros.

Es sabido que al incorporar aire a los morteros y hormigones se disminuye sostenidamente la resistencia a compresión. En efecto, “por cada 1% de aire incorporado se disminuye la resistencia a compresión en un 5%” (Mindess et al 2003).

Por lo tanto, se ve necesario la incorporación de un desaireante (*Defoamer*) de manera de poder obtener todos los beneficios de la incorporación del polímero al mortero, sin ver perjudicada la resistencia mecánica.

Debido a la incorporación del aditivo desaireante y problemas de compatibilidad, se cambia el aditivo superplastificante (solución), por un aditivo reductor de agua sólido.

Al realizar estos cambios en los materiales estudiados, el método de mezclado y obtención del mortero se ve afectado cambiando los siguientes puntos:

- 1) Se pesa y se mezcla en la mezcladora el polímero, con el 100% del agua adicional, **más el aditivo reductor de agua** por un tiempo de entre 3 a 5 [min].
- 3) Junto con las 4 fracciones de arena, se mezcla el aditivo desaireante, y luego se agrega el agua de absorción del árido para incorporarlo a la mezcla en estado Saturado Superficialmente Seco (SSS).
- 4) Se elimina, al reemplazar el aditivo superplastificante por el aditivo reductor de agua.

El aditivo reductor de agua se utiliza en una dosis del 2% con respecto al peso de cemento y el aditivo desaireante en una dosis del 0,2% con respecto al peso de cemento.

El contenido de polímero, se ajusta a una dosis cercana al 5% con respecto al peso de cemento, luego para el mortero con desaireante se elaboran mezclas de prueba. Los resultados se muestran en la Figura 3.13 y Figura 3.14

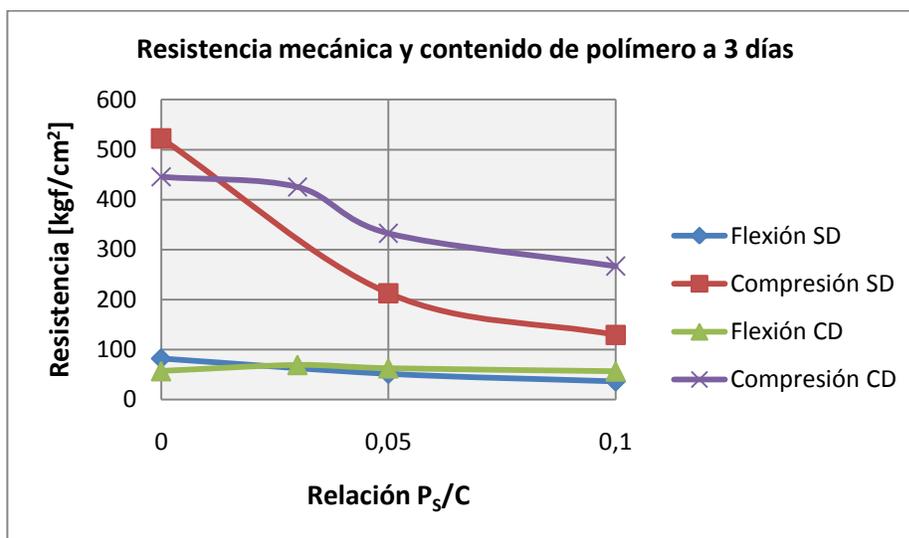


Figura 3.13: Influencia de la incorporación de desaireante en las propiedades mecánicas del mortero. Edad 3 días

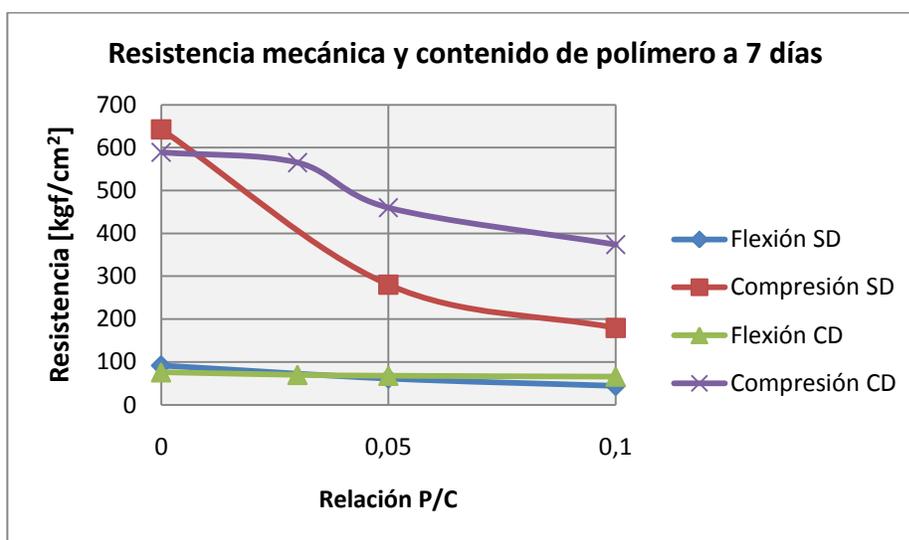


Figura 3.14: Influencia de la incorporación de desaireante en las propiedades mecánicas del mortero. Edad 7 días

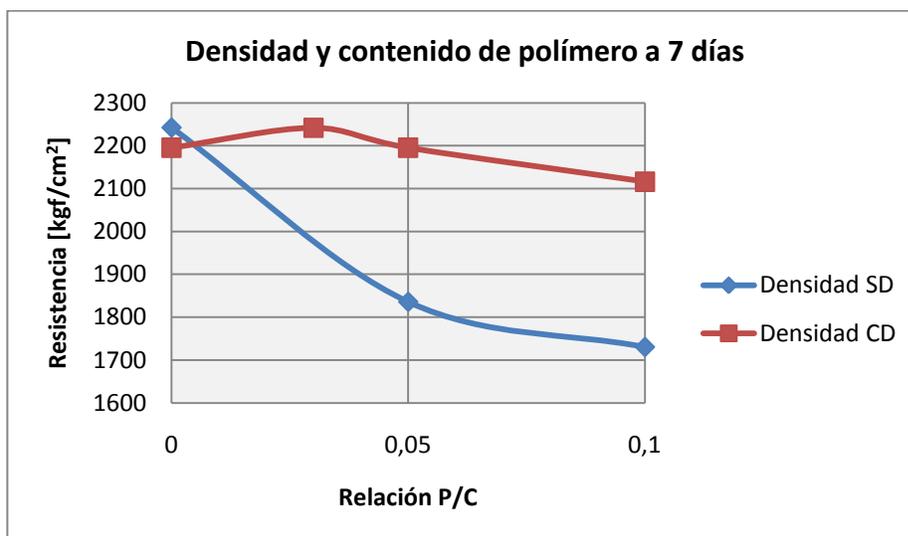


Figura 3.15: Influencia de la incorporación de desaireante en la densidad del mortero. Edad 7 días

Tabla 3.14: Incremento de las resistencias mecánicas y densidad agregando desaireante

Compresión [kgf/cm²] 7 días			
P _s /C	SD	CD	Incremento [%]
0	642	589	-8
0,03	394	565	44
0,05	280	460	64
0,1	179	374	109
Flexión [kgf/cm²] 7 días			
P _s /C	SD	CD	Incremento [%]
0	92	76	-17
0,03	72	70	-3
0,05	61	68	11
0,1	44	66	50
Densidad [kg/m³] 7 días			
P _s /C	SD	CD	Incremento [%]
0	2.242	2.195	-2
0,03	1.962	2.242	14
0,05	1.836	2.195	20
0,1	1.730	2.116	22

- **Dosificación final:**

Finalmente, luego de los ajustes necesarios, y de varias iteraciones, la dosificación utilizada para el mortero cementíceo es la que se presenta en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15: Dosificación final para el mortero cementíceo

Material	Símbolo	Cantidad [kg/m³]
Cemento	C	450
Polímero (Parte Sólida + Parte Acuosa)	P	23,7
Microsílice	Ms	22,5
Agua adicional	A	192
Arena 1	Ar1	169,0
Arena 2	Ar2	238,5
Arena 3	Ar3	618,9
Arena 4	Ar4	328,7
Aditivo Reductor de Agua	Ra	6
Aditivo Desaireante	Da	0,9
Fibra	F	0,6
Densidad [kg/m³]	D	2.050,8

3.2.3.5. Ensayos de mortero en estado fresco (MC)

Al igual que el caso del mortero patrón, para el mortero cementíceo se realiza el ensayo de pérdida de fluidez en el tiempo utilizando la mesa de sacudidas.

- **Pérdida de fluidez en el tiempo**

Para realizar estos ensayos, se siguen los mismos procedimientos que los explicados en la sección 2.1.3 de este capítulo.

Los resultados de estos ensayos se presentan a continuación en la Tabla 3.16 y gráficamente en la Figura 3.16.

Tabla 3.16: Pérdida de fluidez en el tiempo Mortero Cementíceo (MC) (T = 20°C)

Pérdida de fluidez en el tiempo MC		
Tiempo [min]	Diámetro [mm]	Fluidez [%]
0	239	94,1
15	229	90,2
30	227	89,4
45	220	86,6
60	214	84,3
75	202	79,5
90	192	75,6
105	188	74,0
120	185	72,8
135	180	70,9
150	173	68,1
165	168	66,1
180	166	65,4

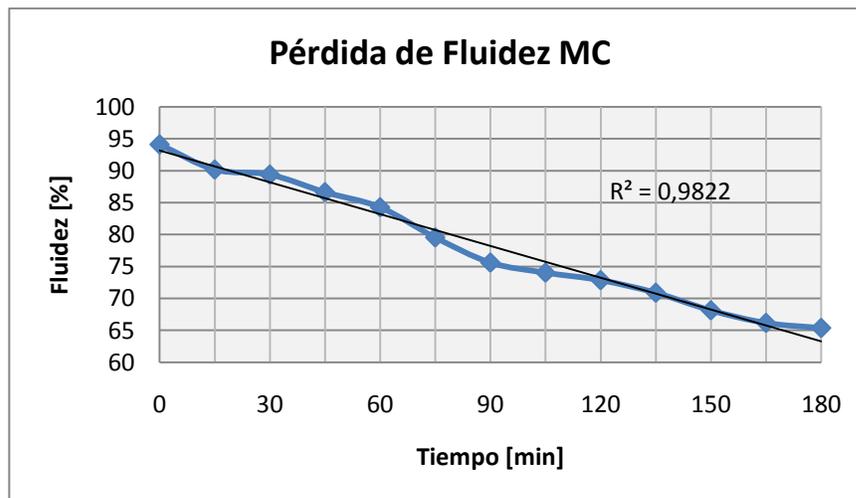


Figura 3.16: Pérdida de fluidez en el tiempo Mortero Cementíceo

3.2.3.6. Ensayos de mortero en estado endurecido (MC)

Al igual que en el punto 2.1.4, se realizan ensayos de mortero endurecido (probetas Rilem) al mortero cementíceo. Estos resultados se expresan gráficamente en la Figura 3.17.

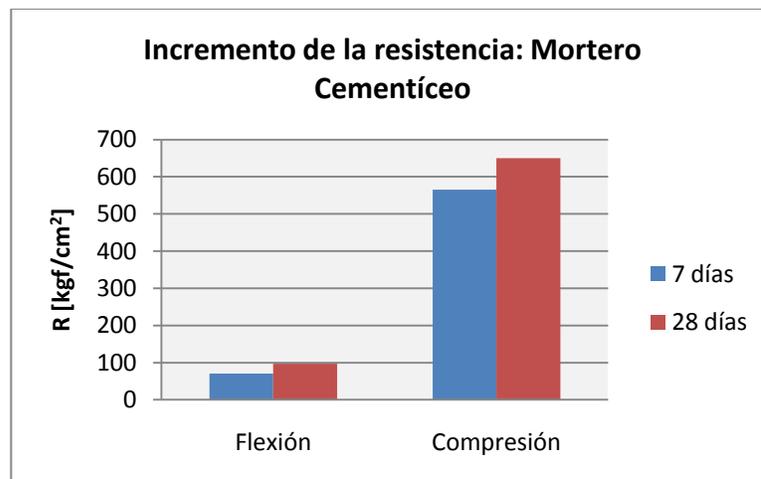


Figura 3.17: Resistencias mecánicas a 7 y 28 días (MC)

3.2.4. Matriz Geopolimérica (MG)

3.2.4.1. Introducción a los morteros geopoliméricos (Vijaya 2014)

En dirección a disminuir la gran contaminación asociada a la producción de cemento portland en el mundo¹², se han realizado numerosos esfuerzos e investigaciones para incorporar materiales cementíceos suplementarios (ceniza volante, humo de sílice, escoria básica granular de alto horno, cáscaras de arroz, metakaolín), a las mezclas de mortero y hormigón, con el fin de disminuir o reemplazar el uso y la producción de cemento portland en el mundo.

Así, los hormigones y morteros geopoliméricos, con una muy baja huella medioambiental, nacen como una buena alternativa para disminuir la contaminación producida por la industria del cemento.

En la década de los 80, Davidovits propuso que una solución alcalina puede ser usada para reaccionar con el silicio (Si) y el aluminio (Al) presente en algunos materiales de

¹² Uno de los principales gases de efecto invernadero es el dióxido de carbono (CO₂), siendo éste el responsable del 65% del calentamiento global. Es sabido que para producir una tonelada de cemento portland, se emite aproximadamente una tonelada de CO₂ a la atmósfera (Vijaya Rangan 2014).

origen geológico, o en materiales producidos artificialmente como ceniza volante, escoria de alto horno, entre otros, y así obtener materiales con características aglomerantes. Nace así el concepto de “geopolímero”, denominado así, debido a la composición geológica de los materiales constituyentes y al proceso de polimerización que ocurre al reaccionar materiales sílico-aluminosos con soluciones alcalinas, para formar estructuras tridimensionales que se asemejan a la estructura de los polímeros orgánicos.

Los geopolímeros poseen dos componentes principales: una fuente de alúmino-silicato y una solución alcalina. Como fuente de alúmino-silicato, se pueden utilizar materiales minerales naturales como caolinita, o bien, metacaolín y materiales producidos artificialmente (generalmente desechos industriales) como ceniza volante, escoria de alto horno, humo de sílice, ceniza de cáscara de arroz, etc. Para la solución alcalina, se utiliza típicamente una combinación de hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio, y silicato de sodio o silicato de potasio.

Propiedades y características de los morteros y hormigones geopoliméricos

El comportamiento de los morteros y hormigones geopoliméricos se asemeja a los morteros y hormigones convencionales, en base a cemento portland, sin embargo, poseen ciertas diferencias importantes que están dadas principalmente por las características y composición de sus materiales constituyentes.

1) Propiedades en estado fresco

Los geopolímeros pueden ser mezclados siguiendo las técnicas convencionales de mezclado para morteros y hormigones. Se recomienda mezclar la fuente de alúmino-silicato con los agregados y que éstos se encuentren preferentemente, en su condición de humedad saturado superficialmente seco (SSS), para evitar que el árido absorba la solución alcalina en el proceso de mezclado, inhibiendo así el contacto de la fuente de alúmino-silicato con esta solución.

También se recomienda mezclar de forma previa los componentes de la solución alcalina, con el agua adicional y el superplastificante. Luego, estos componentes se agregan a los materiales secos y se mezclan durante varios minutos.

- Trabajabilidad

En general, al mezclar la fuente de alúmino-silicato con la solución alcalina para obtener geopolímeros, la trabajabilidad de la mezcla es muy baja. Es por esto, que suele agregarse agua adicional, con el fin de aumentar la trabajabilidad de la mezcla. A diferencia con los morteros y hormigones en base a cemento portland,

en los geopolímeros esta agua adicional no forma parte de las reacciones químicas de endurecimiento, sirviendo sólo para aumentar la trabajabilidad de las mezclas.

Aun con esta agua adicional, generalmente se usan aditivos superplastificantes hasta aproximadamente un 4% en peso de la fuente de alúmino-silicato, con el fin de aumentar aún más la trabajabilidad. Sin embargo, existe una pequeña pérdida de resistencia a compresión, cuando la dosis de aditivo es superior al 2%.

Por lo general, a temperatura y ambiente de laboratorio, el geopolímero fresco puede permanecer trabajable sobre más de 120 minutos, sin signos de segregación, exudación de agua o endurecimiento.

2) Propiedades en estado endurecido

- Resistencias mecánicas (compresión)

El desarrollo de las resistencias mecánicas en los geopolímeros está relacionado con muchos aspectos tanto de los materiales (composición, características, concentraciones), su dosificación y en gran parte por la forma de curado de las mezclas.

A continuación se listan algunas de las características de los geopolímeros que modifican su resistencia mecánica.

- La incorporación de agua adicional, produce una disminución en la resistencia mecánica de los geopolímeros.
- Al incrementar la concentración molar de la solución de hidróxido de sodio a utilizar en la solución alcalina, se produce un aumento en la resistencia mecánica de los geopolímeros.
- Al realizar el curado bajo temperatura, se obtienen incrementos de resistencias mecánicas considerables. En efecto, la temperatura promueve y facilita las reacciones químicas de polimerización que ocurren.

- Retracción y creep

Los geopolímeros presentan, al menos los sometidos a curado térmico inicial (80°C / 24 h), muy bajos valores de retracción por secado y de creep. En efecto, los valores de retracción por secado luego de un año son entre un 12 y un 20% de los obtenidos para hormigones en base a cemento portland, mientras que los valores de creep son aproximadamente un 50% de los valores característicos para hormigones en base a cemento portland.

- **Resistencia a los sulfatos, altas temperaturas y ataques de ácido**

Los geopolímeros a diferencia de los hormigones en base a cemento portland poseen una muy buena resistencia a los ataques por sulfatos. Esto se debe a que el principal componente que reacciona con los sulfatos, en los hormigones basados en cemento portland, es el calcio. Esta reacción produce yeso y etringita la cual al ser de carácter expansiva, genera esfuerzos internos en el hormigón, produciendo pérdida de masa y de resistencias mecánicas. Esto no ocurre en los geopolímeros, debido a la poca presencia de calcio en sus componentes.

Por otro lado, a diferencia de los hormigones convencionales, los geopolímeros poseen buena resistencia a altas temperaturas, permaneciendo estables y resistentes a temperaturas incluso mayores a 1000 °C, mientras que para hormigones convencionales se pierde toda resistencia residual sobre los 400 °C.

La poca presencia de calcio en los geopolímeros, contribuye también a que estos materiales posean una mejor resistencia al ataque de ácidos. En efecto, el contenido de sulfatos (presente en algunas aguas subterráneas y suelos) reacciona con el hidróxido de calcio Ca(OH)_2 y el silicato cálcico hidratado (CSH) presente en los hormigones comunes, produciendo yeso y etringita, lo que produce una pérdida de masa y pérdida de resistencia mecánica. Para el caso de los geopolímeros, donde la presencia de calcio es muy baja, estas reacciones no ocurren, por lo que la resistencia al ataque por sulfatos e incluso frente al ácido de los geopolímeros es mucho mayor, siendo entre 15 a 20 veces mayor que los hormigones convencionales de cemento portland.

3.2.4.2. Características de la matriz geopolimérica (MG) para FRCM

La matriz geopolimérica MG, utilizada en el presente estudio, corresponde a un mortero geopolimérico en base a una fuente de alúmino-silicato que corresponde a ceniza volante tipo F baja en calcio, una solución alcalina, que corresponde a una mezcla de silicato de sodio e hidróxido de sodio (ambas en solución), agua adicional, arena, fibras sintéticas y aditivo superplastificante. Es el resultado de múltiples iteraciones y ajustes de materiales constituyentes, dosificaciones, procesos de mezclado (tanto de orden como de tiempos de mezclado), forma de curado, etc.

Corresponde a un mortero de fluidez media, con un tiempo de trabajabilidad bastante amplio, buena consistencia, poca exudación de agua y ciertas características tixotrópicas. Estas características le permiten ser utilizado como matriz cementícea para el sistema de refuerzo y reparación FRCM.

3.2.4.3. Materiales

- Ceniza Volante

La ceniza volante utilizada es de clase F¹³. Es de procedencia de la división *Ventanas* de *AES Gener*. Una vez extraída, se seca en horno a 60°C por 24 horas, y luego se tamiza por el tamiz de 2,36 [mm], a fin de eliminar las partículas de mayor tamaño.

La composición química se obtiene mediante fluorescencia de rayos X, y es presentada en la Tabla 3.17, mientras la curva granulométrica es presentada en la Figura 3.18. (Díaz 2012)

Tabla 3.17: Fluorescencia de rayos X ceniza volante

Óxido	Contenido [%]
Si ₂ O	55,1
Al ₂ O ₃	26,5
Fe ₂ O ₃	8,5
CaO	4,4
K ₂ O	2,3
TiO ₂	1,1
P ₂ O ₅	0,6
SO ₃	0,6

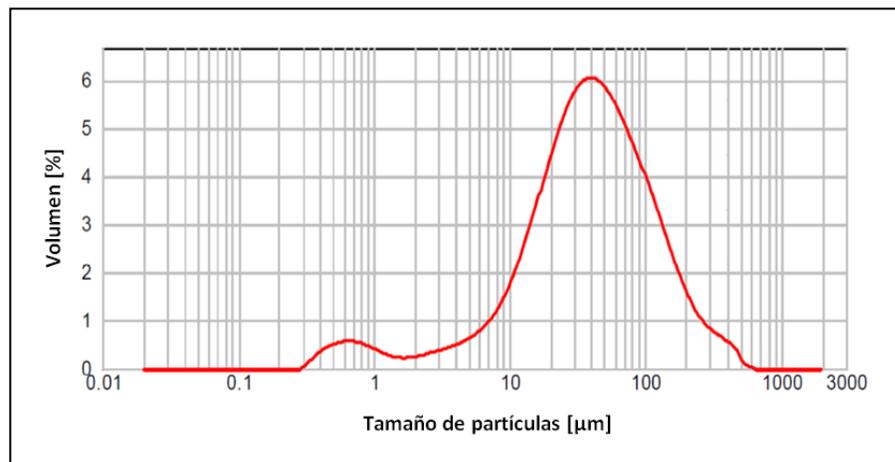


Figura 3.18: Granulometría Ceniza Volante (Díaz 2012)

¹³ Cenizas volantes tipo F se obtienen como subproducto de la combustión de carbones de buena calidad (carbones bituminosos o antracita). Poseen bajo contenido de Óxido de Calcio (generalmente menor al 5%).

- **Silicato de Sodio**

El silicato de sodio utilizado posee las características que se muestran en la Tabla 3.18. Como se puede observar, la relación $\frac{SiO_2}{Na_2O} = 2,0$, razón que permanece constante durante todas las pruebas realizadas en esta investigación.

Este material fue proporcionado mezclado y listo para su uso por la empresa *Austral Chemicals*. (Mellado 2014).

Tabla 3.18: Composición y características de la solución de Silicato de Sodio utilizado

Composición	
Na ₂ O	14,66%
SiO ₂	29,32%
H ₂ O	56,02%
Características	
Aspecto físico	Líquido viscoso opalescente
Densidad [g/cm ³]	1.530
Viscosidad [cps]	490

- **Hidróxido de Sodio**

Se utiliza Hidróxido de Sodio en forma de pellets con una pureza mayor al 99%. Para el uso en la fabricación de mortero geopolimérico, se debe disolver en agua previamente para formar la solución de hidróxido de sodio a la concentración especificada.

Las cantidades a disolver dependen de la molaridad deseada para la solución. En este estudio se utilizan 3 molaridades distintas, que corresponden a 10M, 14M y 16M. Para obtener estas cantidades, es necesario conocer el peso molecular del hidróxido de sodio, esto se obtiene con la ecuación (3.1).

$$PM_{NaOH} = PM_{Na} + PM_O + PM_H = 39,99 [g/mol] \approx 40 [g/mol] \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} PM_{NaOH} &= \text{Peso Molecular de Hidróxido de Sodio, [g/mol]} \\ PM_{Na} &= \text{Peso Molecular de Sodio} = 22,99 [g/mol] \\ PM_O &= \text{Peso Molecular de Oxígeno} = 15,99 [g/mol] \\ PM_H &= \text{Peso Molecular de Hidrógeno} = 1,01 [g/mol] \end{aligned}$$

La molaridad de una solución se obtiene mediante la ecuación (3.2).

$$M = \frac{n}{V} = \frac{m}{PM} \cdot \frac{1}{V} \quad (3.2)$$

M = Molaridad, [mol/L]
 n = Número de moles, [mol]
 V = Volumen de solución, [L]
 M = Masa de soluto, [g]
 PM = Peso molecular de soluto, [g/mol]

Luego, despejando la ecuación (3.2), se obtiene que la masa de soluto necesario para completar 1 [L] de solución dada una concentración molar se obtiene con la ecuación (3.3).

$$m = M \cdot PM \quad (3.3)$$

m = Masa de soluto, [g]
 M = Molaridad, [mol/L]
 PM = Peso molecular de soluto, [g/mol]

Finalmente, las masas utilizadas para las distintas concentraciones molares se muestran en la Tabla 3.19.

Tabla 3.19: Cantidad de soluto para las soluciones de NaOH

Molaridad [g/mol]	Masa de Solute por Litro de Solución [g]
10	400
14	560
16	640

- **Arena:**

La arena utilizada para la confección del mortero geopolimérico (MG) es la misma que la utilizada para el mortero cementíceo (MC). En efecto, es de la misma procedencia, posee las mismas fracciones, las cuales se mezclan en los mismos porcentajes para obtener el árido combinado.

Lo único que varía entre un mortero y otro es la cantidad de arena con respecto al contenido de material geopolimérico (matriz cementícea).

- **Aditivo Superplastificante:**

De manera de aumentar la trabajabilidad del mortero sin disminuir sus resistencias mecánicas y agregando la menor cantidad de agua, se utiliza un aditivo líquido superplastificante.

El aditivo superplastificante utilizado para el mortero geopolimérico, es el que se utiliza para confeccionar el hormigón para las vigas de ensayo, y que se detalla en la sección 4.1.3.1.

- **Fibras Sintéticas**

Las fibras sintéticas utilizadas corresponden a las mismas que se utilizan en la confección del mortero cementíceo, es decir, corresponden a fibras de polipropileno de 6 [mm] de largo, cuya descripción se hace en el punto 2.2.3. de este capítulo.

3.2.4.4. Ajuste de la dosificación

Al igual que para el caso del mortero cementíceo, la obtención del mortero geopolimérico final se logra luego de una serie de iteraciones tanto de materiales como de dosificación, procesos de mezclado, de curado, etc.

Parte de estas iteraciones realizadas se muestran en esta sección.

- **Dosificación inicial**

La dosificación inicial se realiza con el fin de familiarizarse con la realización de geopolímeros a partir de ceniza volante baja en calcio (tipo F), para entender los efectos de la secuencia de las adiciones de los materiales y los tiempos de mezclado, para observar el comportamiento en estado fresco de la mezcla, para desarrollar y mejorar los procesos de mezclado y curado, y para tener una primera aproximación a la dosificación final de la mezcla.

Antes de obtener la dosificación inicial, se toman en cuenta los siguientes antecedentes, de modo de acotar en parte la investigación y disminuir las iteraciones de dosificación (Hardjito 2005). Los parámetros considerados y sus rangos de trabajo, son los siguientes:

- 1) $\frac{\text{Solución Silicato de Sodio}}{\text{Solución Hidróxido de Sodio}} = 0,4 - 2,5$ (En peso)
- 2) $M_{NaOH} = 8M - 16M$
- 3) $\frac{\text{Solución Alcalina}}{\text{Ceniza Volante}} = 0,3 - 0,4$ (En peso)
- 4) $\text{Árido} = 70\% - 80\%$ (En relación del peso total)
- 5) $\text{Superplastificante} = 0 - 2\%$ (En relación al peso de Ceniza Volante)

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, se procede con el cálculo de la dosificación inicial del mortero geopolimérico.

De la literatura, se fija una cantidad de ceniza volante de 420 [kg/m³] (Díaz 2012).

Luego, al utilizar el punto 2) anterior, se fija una relación $\frac{\text{Solución Alcalina}}{\text{Ceniza Volante}} = 0,4$

Con esto, la cantidad de Solución Alcalina se obtiene con la ecuación (3.4).

$$SA = 0,4 \cdot CV = 168 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (3.4)$$

SA = Cantidad de solución alcalina, [kg/m³]

CV = Cantidad de ceniza volante, [kg/m³]

Luego, se fija la relación $\frac{\text{Solución Silicato de Sodio}}{\text{Solución Hidróxido de Sodio}} = 2,5$, debido a que la solución de Silicato de Sodio es más económica y más fácil de obtener y manipular que la de Hidróxido de Sodio (Hardjito 2005). Así, la cantidad de Silicato de Sodio (Na₂SiO₃) e Hidróxido de Sodio (NaOH) se puede obtener mediante las ecuaciones (3.5) y (3.6)

$$\frac{\text{Sol Na}_2\text{SiO}_3}{\text{Sol NaOH}} = 2,5 \quad (3.5)$$

$$\text{Sol Na}_2\text{SiO}_3 + \text{Sol NaOH} = 168 \quad (3.6)$$

Sol Na₂SiO₃ = Solución de Silicato de Sodio, [kg/m³]

Sol NaOH = Solución de Hidróxido de Sodio, [kg/m³]

Con esto se obtiene: Sol Na₂SiO₃ = 120 [kg/m³] y Sol NaOH = 48 [kg/m³].

Por otro lado, para aumentar la trabajabilidad del mortero y hacer posible la obtención de mortero geopolimérico con la trabajabilidad adecuada, se debe agregar una cantidad de agua extra. Esta cantidad se fija en un 10% del contenido de Ceniza Volante. Entonces, la cantidad de agua extra agregada corresponde a 42 [kg/m³].

No obstante, se desea obtener un mortero fluido, por lo que la cantidad de Aditivo Superplastificante se fija en un 1,5% con respecto al peso de Ceniza Volante. Luego, la cantidad de Aditivo Superplastificante es 6,3 [kg/m³].

La cantidad de fibra se utiliza, igual que en el caso del mortero cementíceo, según la información otorgada por el fabricante, utilizando una cantidad de 600 [g/m³].

Finalmente, según el punto 4), la cantidad de agregado se fija en un 70% del peso total de los componentes. Así, la cantidad de árido se obtiene como sigue:

$$A_r = 0,70 \cdot \frac{CV + (Na_2SiO_3 + NaOH) + A + A_d + F}{1 - 0,70}$$

$A_r =$	Contenido total de árido, [kg/m ³]
$CV =$	Contenido de ceniza volante, [kg/m ³]
$Na_2SiO_3 =$	Contenido de solución de silicato de sodio, [kg/m ³]
$NaOH =$	Contenido de solución de hidróxido de sodio, [kg/m ³]
$A =$	Cantidad de agua, [kg/m ³]
$A_d =$	Cantidad de aditivo superplastificante, [kg/m ³]
$F =$	Cantidad de fibra sintética, [kg/m ³]

Con esto, la cantidad total de árido a utilizar es 1486 [kg/m³]

Luego, la dosificación inicial se muestra en la Figura 3.20.

El resultado de la primera colada de prueba es un mortero bastante seco, muy poco trabajable. Sus resistencias mecánicas tanto a 3 como a 7 [días] son cercanas a 0 [kgf/cm²]. Sin embargo, permite cualificar el comportamiento de los materiales al momento del mezclado y curado del mortero.

A continuación se detallan las modificaciones realizadas a esta dosificación hasta obtener un mortero fluido, trabajable, tixotrópico y con características de resistencias mecánicas aceptables.

Tabla 3.20: Dosificación inicial de mortero geopolimérico a utilizar

Material	Símbolo	Cantidad [kg/m³]
Ceniza Volante	CV	420
Solución de Silicato de Sodio	SS	120
Solución de Hidróxido de Sodio 10M	HS	48
Agua adicional	A	42
Arena 1	Ar1	185,1
Arena 2	Ar2	261,4
Arena 3	Ar3	678,0
Arena 4	Ar4	360,2
Aditivo Superplastificante	Sp	6,3
Fibra	F	0,6

- **Método de mezclado del mortero geopolimérico**

El método de mezclado de los materiales para el mortero geopolimérico se muestra en detalle a continuación.

- 1) Se pesan y mezclan los 2 componentes de la solución alcalina (solución de silicato de sodio y solución de hidróxido de sodio, preparada con anterioridad). Se mezclan y se dejan reposar por al menos 30 [min] antes de agregar los demás materiales.
- 2) Una vez transcurrido este tiempo, se agrega la ceniza volante sobre la solución alcalina. Se procede a un mezclado por un tiempo de 3 a 5 [min] en velocidad lenta, en el equipo mezclador de mortero.
- 3) Al igual que en el caso del mortero cementíceo, se pesan y mezclan manualmente en una bolsa todas las fracciones de arena y se agrega el agua de absorción del árido de acuerdo a la Tabla 3.8. Esto se realiza de manera de agregar el árido en estado Saturado Superficialmente Seco (SSS), para evitar que éste absorba agua o solución alcalina, lo que podría disminuir la trabajabilidad y evitar que la solución entre en contacto por completo con la fuente de alúmino-silicato (ceniza volante).

Se agrega el árido y se mezcla junto con la solución alcalina y la ceniza volante durante 3 a 5 [min].

- 4) Se pesan y mezclan el 75% del agua adicional junto con el aditivo superplastificante. Esto se agrega con la mezcladora en funcionamiento.
- 5) Se mezclan todos los componentes por aproximadamente 10 [min], y progresivamente se va agregando el 25% de agua restante¹⁴.
- 6) Una vez cumplido el tiempo, y que la mezcla esté lo suficientemente trabajable, se agrega la fibra sintética y se mezcla todo por 3 [min] más.

- **Variación de la cantidad de ceniza volante, de árido, relación $\frac{\text{Solución Alcalina}}{\text{Ceniza Volante}}$, y dosis de aditivo**

Debido al mal resultado obtenido de la primera dosificación de geopolímero, se opta por realizar progresivamente una serie de ajustes en la dosificación, los que se explican brevemente a continuación:

- 1) Debido a la consistencia “terrosa” del mortero y su poca trabajabilidad y cohesión en estado fresco, se opta por disminuir el porcentaje de árido desde un 70% del peso total de los materiales a un 65%.
- 2) Debido también a la poca capacidad aglomerante de la mezcla y sus nulas resistencias mecánicas, se opta por aumentar la dosis de fuente de alúmino-silicato (CV) desde 420 [kg/m³] a 480 [kg/m³].
- 3) Para aumentar también la correcta humectación de la ceniza volante junto con la solución alcalina, y aumentar su trabajabilidad, se opta por aumentar la relación $\frac{\text{Solución Alcalina}}{\text{Ceniza Volante}}$ desde 0,4 a 0,45, más allá del límite recomendado.
- 4) Por último, para aumentar la trabajabilidad del mortero, sin la necesidad de incorporar demasiada agua extra, se aumenta la dosis de aditivo desde 1,5% con respecto al peso de ceniza volante a un 2,0%.

¹⁴ Luego de varios morteros de prueba, se determina experimentalmente que el geopolímero requiere de poca energía de mezclado (en velocidad lenta) y durante un tiempo prolongado. Lo primero para no incorporar demasiado aire a la mezcla y lo segundo para que la solución se mezcle con la fuente de alúmino-silicato (debido a la gran finura de la ceniza volante) y el aditivo superplastificante logre su efecto sobre la mezcla.

- Variación del contenido de agua adicional

Al contrario de lo que ocurre en la hidratación del cemento portland, el agua presente en los morteros u hormigones geopoliméricos no cumple un rol en las reacciones químicas que ocurren en el proceso, solamente le provee la trabajabilidad necesaria a la mezcla durante su manipulación, colocación y compactación. (Hardjito 2005).

Sin embargo, al igual que en el caso de morteros y hormigones en base a cemento, la adición de más o menos agua influye considerablemente, por un lado en la fluidez, y por otro lado en las resistencias mecánicas que se obtienen, al aumentar la porosidad del material.

A continuación en la Figura 3.19 y en la Figura 3.20, se muestran los resultados de resistencias mecánicas obtenidas en función de la cantidad de agua extra agregada al mortero en el proceso de mezclado. Esta agua extra se presenta en porcentaje de la cantidad de ceniza volante según la dosificación.

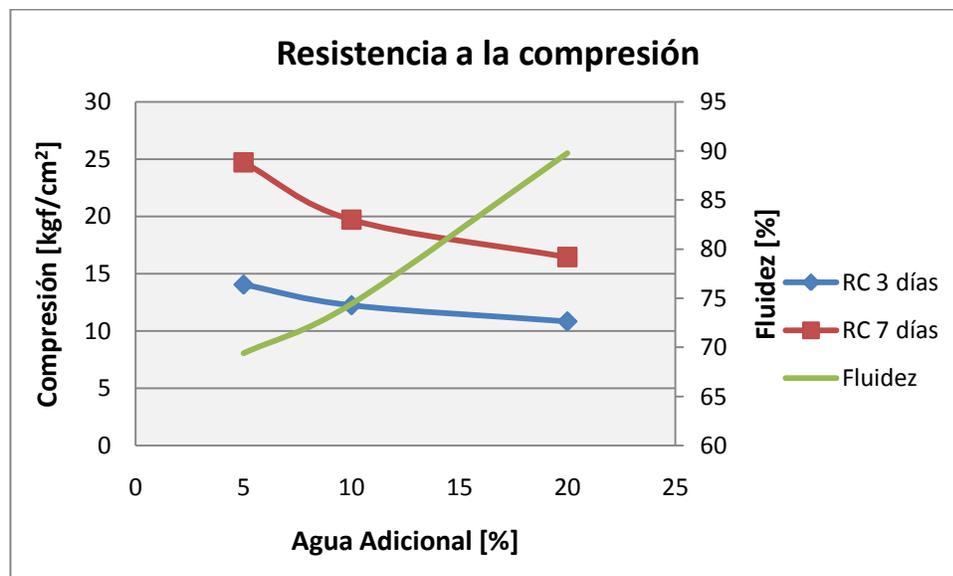


Figura 3.19: Resistencia a la compresión a 3 y 7 días en función del contenido de agua extra

De la Figura 3.19 y de la Figura 3.20, se observa, según lo esperado, que las resistencias mecánicas disminuyen considerablemente al aumentar la cantidad de agua extra que se agrega a la mezcla y la fluidez aumenta, llegando hasta aproximadamente un 90%.

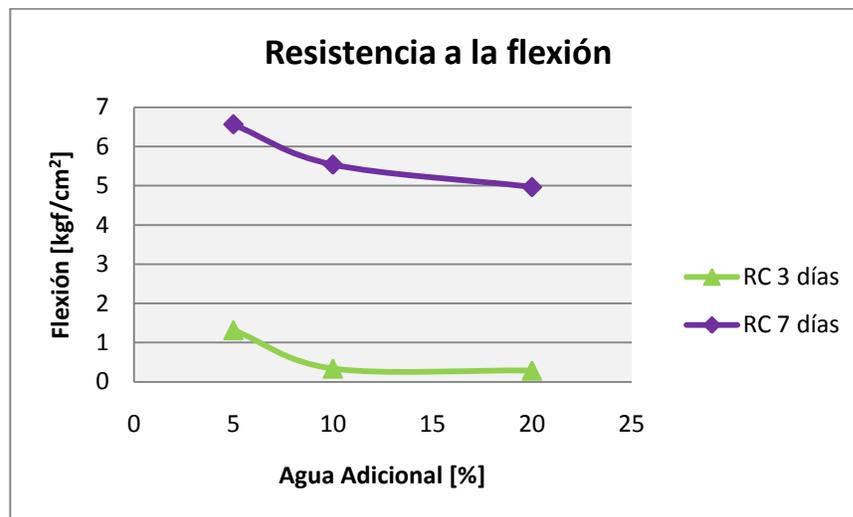


Figura 3.20: Resistencia a la flexión a 3 y 7 días en función del contenido de agua

De la Figura 3.3, se sabe que la fluidez inicial del mortero patrón es aproximadamente un 75%. Luego, la cantidad de agua extra necesaria para homologar la fluidez del mortero geopolimérico con la del mortero patrón, debe ser cercana a un 10%.

No obstante, para esta cantidad de agua adicional, las resistencias mecánicas obtenidas (tanto a flexión como a compresión) a 7 días están muy por debajo de las obtenidas para el mortero patrón según la Figura 3.5.

Así, es necesario agregar una variante extra para aumentar las resistencias mecánicas sin disminuir ni afectar considerablemente la fluidez del mortero fresco.

- Efecto del curado térmico en las propiedades mecánicas del geopolímero

Es sabido que una variable que mejora notablemente las resistencias mecánicas de los geopolímeros es la temperatura de curado de las probetas. (Díaz 2012) (Hardjito 2005).

Para cuantificar la ganancia de resistencias mecánicas en función de la temperatura de curado, se realizaron series de geopolímero con la misma cantidad de agua adicional (10%) y se curaron a 3 diferentes temperaturas.

Para la primera serie, el curado se realiza a ambiente de laboratorio a una temperatura de 20°C. Para la segunda y tercera serie, las primeras 24 [hrs] de curado se realizan en ambiente de laboratorio, y luego se realiza en horno a 40°C y a 80°C respectivamente.

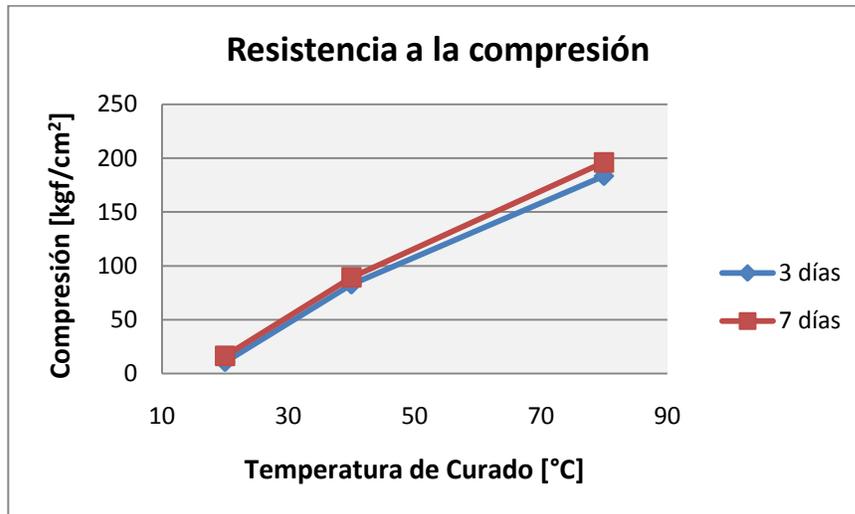


Figura 3.21: Resistencia a la compresión a 3 y 7 días en función de la temperatura de curado

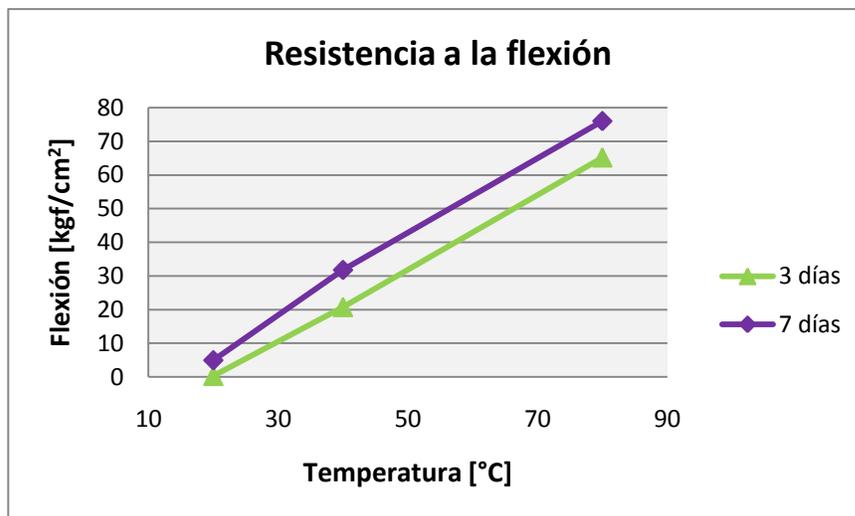


Figura 3.22: Resistencia a la flexión a 3 y 7 días en función de la temperatura de curado

De los gráficos anteriores se observa que las resistencias mecánicas aumentan considerablemente al incorporar temperatura en el proceso de curado.

Es sabido que el aumento de las resistencias mecánicas es prácticamente lineal hasta los 80°C, pero que al partir de este punto, la ganancia de resistencia disminuye notablemente (Hardjito 2005). Además, considerar un proceso de curado sobre los 80°C se considera poco práctico desde un punto de vista constructivo y operacional. Por lo mismo, la temperatura de curado máxima que se estudia son los 80°C.

Si bien las resistencias mecánicas aumentaron al incorporar la temperatura, la resistencia a compresión a 7 días se mantiene cercana a los 200 [kgf/cm²]. Luego, es necesario incluir otra variable de manera de aumentar las resistencias mecánicas de las probetas, para alcanzar resistencias mecánicas similares a las obtenidas para el mortero patrón.

- Variación de la molaridad de la solución de hidróxido de sodio (NaOH)

Otra variable que se sabe puede significar aumentos en la resistencia mecánica de los morteros geopoliméricos es el aumento en la molaridad de la solución de hidróxido de sodio. Es sabido que, conforme aumenta la concentración molar de esta solución, se obtienen mayores resistencias mecánicas tanto a flexión como a compresión (Hardjito 2005).

En la Figura 3.23 y en la Figura 3.24, se muestran los resultados de los ensayos a flexión y compresión además de la fluidez de la mezcla, obtenidos al variar la concentración molar de la solución de hidróxido de sodio.

Para estos ensayos, la temperatura de curado permaneció constante e igual a 80 °C, siguiendo el mismo proceso de curado explicado en la sección anterior.

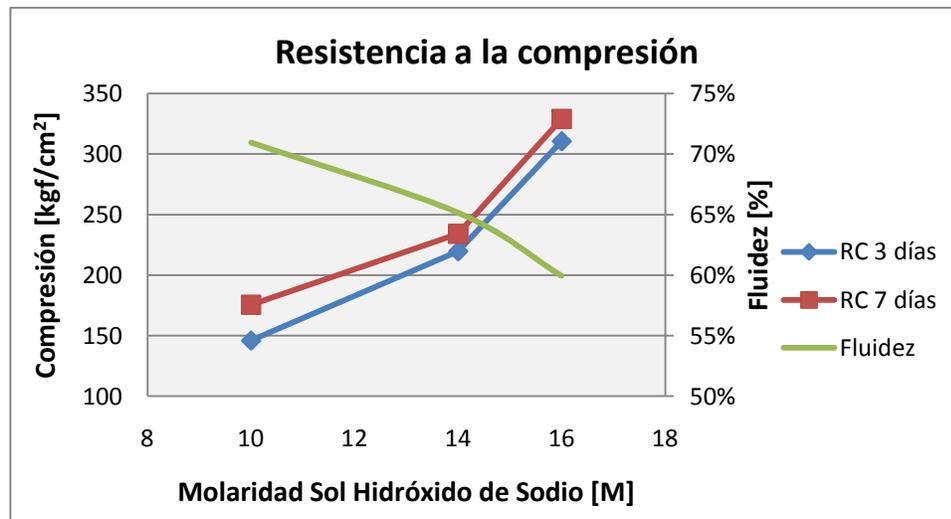


Figura 3.23: Resistencia a la compresión a 3 y 7 días en función de la Molaridad de la solución de hidróxido de sodio

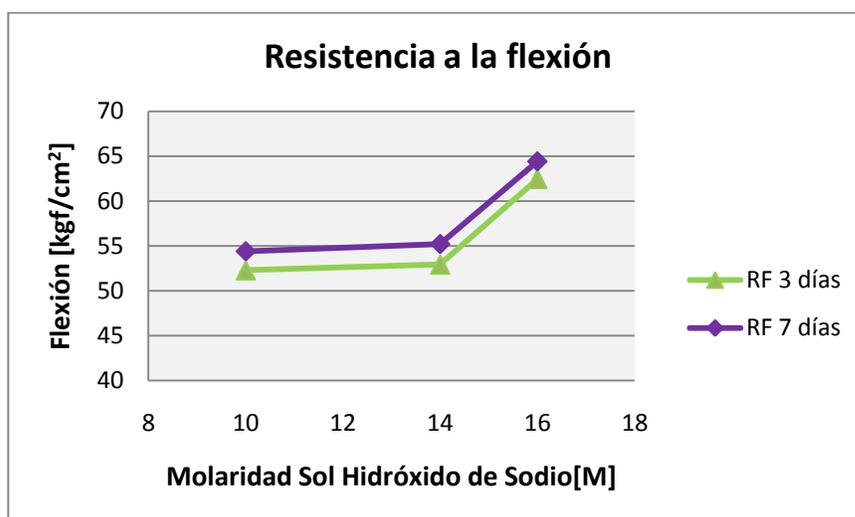


Figura 3.24: Resistencia a la flexión a 3 y 7 días en función de la Molaridad de la solución de hidróxido de sodio

- **Dosificación final:**

Finalmente, luego de los ajustes en la dosificación, métodos de curado, tiempos de mezclado, entre otros, se obtiene la dosificación final, la cual se muestra en la Tabla 3.21.

Tabla 3.21: Dosificación final para el mortero geopolimérico

Material	Símbolo	Cantidad [kg/m³]
Ceniza Volante	CV	480
Solución de Silicato de Sodio	SS	154,3
Solución de Hidróxido de Sodio 16M	HS	61,7
Agua adicional	A	48
Arena 1	Ar1	174,5
Arena 2	Ar2	246,4
Arena 3	Ar3	639,1
Arena 4	Ar4	339,5
Aditivo Superplastificante	Sp	9,6
Fibra	F	0,6
Densidad [kg/m³]	D	2.153,7

3.2.4.5. Ensayos de mortero en estado fresco (MG)

- Pérdida de fluidez en el tiempo

Al igual que para los morteros anteriores, se realiza el ensayo siguiendo los procedimientos indicados anteriormente. El resultado de este ensayo se presenta a continuación en la Tabla 3.22y gráficamente en la Figura 3.25.

Tabla 3.22: Pérdida de fluidez en el tiempo Mortero Geopolimérico

Pérdida de fluidez en el tiempo MG		
Tiempo [min]	Diámetro [mm]	Fluidez [%]
0	187	73,5
15	181	71,3
30	180	70,9
45	178	70,1
60	175	68,9
75	174	68,3
90	173	67,9
105	169	66,3
120	166	65,4
135	161	63,4
150	157	61,7
165	154	60,7
180	151	59,5

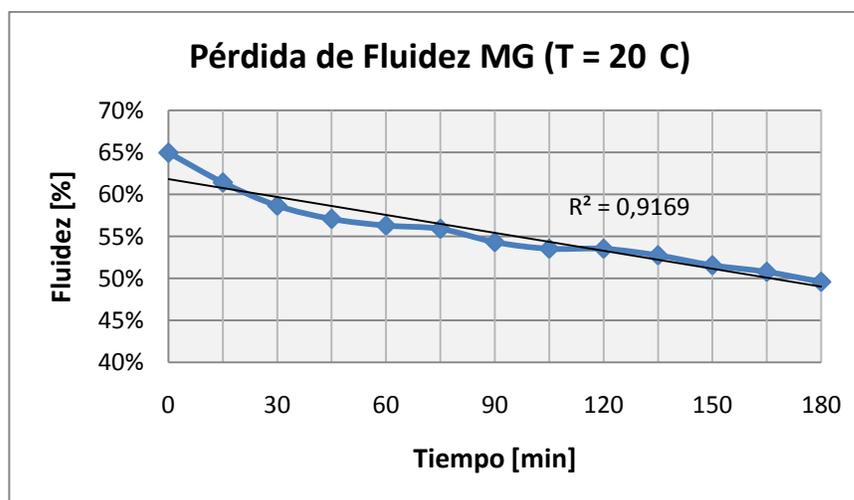


Figura 3.25: Pérdida de fluidez en el tiempo Mortero Geopolimérico

3.2.4.6. Ensayos de mortero en estado endurecido (MG)

Al igual que para los morteros anteriores, se realizan ensayos de mortero endurecido (probetas Rilem) al mortero geopolimérico. Estos resultados se muestran gráficamente en la Figura 3.26.

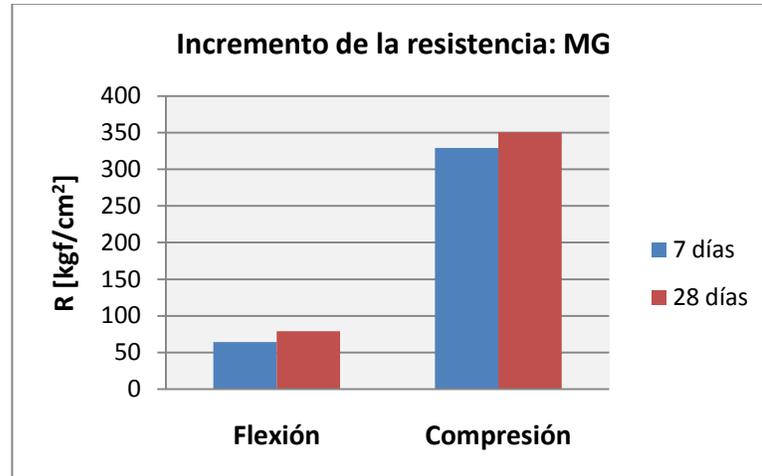


Figura 3.26: Resistencias mecánicas a 7 y 28 días (MG)

3.2.5. Comparación entre matrices cementíceas

Finalmente, luego de haber definido y evaluado los materiales, dosificaciones, métodos y tiempos de mezclado y condiciones de curado, se comparan cualitativa y cuantitativamente las propiedades finales que se obtienen para los distintos morteros que serán utilizados más adelante como matriz cementícea en la solución de refuerzo y reparación FRCM.

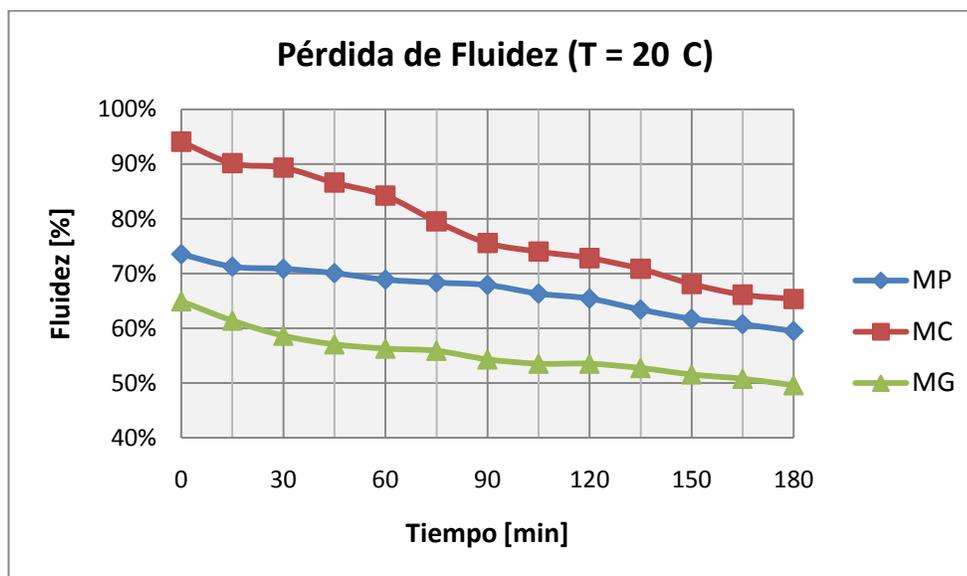


Figura 3.27: Pérdida de fluidez en el tiempo para los distintos morteros a utilizar como matriz cementícea

Tabla 3.23: Fluidez inicial, final y pérdida de fluidez total para los distintos morteros

Mortero	Fluidez inicial [%]	Fluidez final [%]	Pérdida de fluidez [%]
MP	73,5	59,5	14,1
MC	94,1	65,4	28,7
MG	65,0	49,6	15,4

De la Figura 3.27, se observa que el mortero con mayor fluidez inicial es el mortero cementícea, seguido por el mortero patrón y luego el mortero geopolimérico. Esto se debe a la gran dosis de aditivo reductor de agua que posee el primero. Sin embargo, esta alta fluidez es necesaria debido a la alto contenido de cemento que posee este mortero (ver Tabla 3.15), lo que hace que disminuya rápidamente su fluidez. En efecto, es el mortero que más disminuye su fluidez a lo largo de este ensayo.

Por otro lado, el mortero patrón posee la menor pérdida de fluidez, siendo un poco menor que el mortero geopolimérico. No obstante, para que el mortero pueda ser utilizado como matriz para el sistema de refuerzo FRCM debe tener una fluidez que permita la incorporación de la malla de refuerzo y obtener una adecuada penetración que asegure la adherencia matriz/refuerzo, lo que requeriría morteros de fluidez inicial mayores de 55%, lo que implica que para el mortero geopolimérico se tendría un tiempo de trabajabilidad de aproximadamente 1 hora.

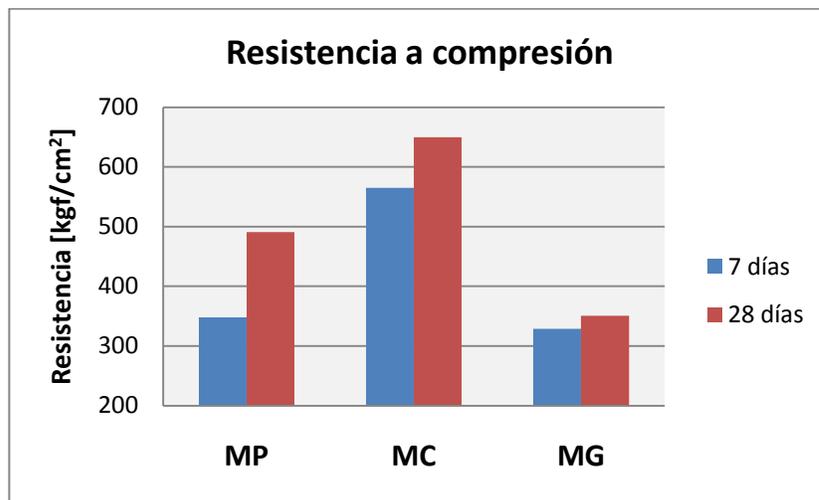


Figura 3.28: Resistencia a compresión a 7 y 28 días para los distintos tipos de mortero

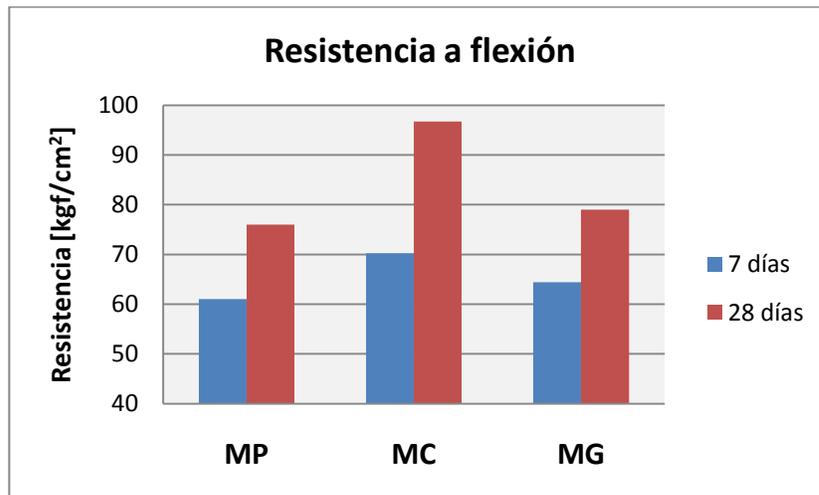


Figura 3.29: Resistencia a flexión a 7 y 28 días para los distintos tipos de mortero

De la Figura 3.28 y Figura 3.29, se observa que tanto para la resistencia a compresión como a flexión son mayores para el mortero cementíceo y menores para el mortero geopolimérico. Las altas resistencias del primero, se deben al alto contenido de cemento que posee, y su baja relación A/C, mientras que las bajas resistencias del segundo es debido a su propio origen geopolimérico.

CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL COMPUESTO FRCCM

En el siguiente capítulo se presentan dos tipos de ensayos para caracterizar las propiedades mecánicas del material compuesto FRCCM. El primero de ellos, corresponde al ensayo de tracción del material compuesto a través de una probeta estándar. Para esto, se somete a tracción pura una lámina de material compuesto hasta alcanzar la falla del material. El segundo, corresponde al ensayo de adherencia por arrancamiento (tracción directa) del mortero, que se realiza para estudiar la capacidad adherente de éste a un sustrato de hormigón.

4.1 ENSAYOS DE TRACCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO FRCCM

4.1.1. Introducción a ensayos de tracción de sistemas compuestos

Por las características físicas y mecánicas de la fibra de carbono y el sistema de refuerzo y reparación FRCCM, éstos están pensados y diseñados para trabajar bajo esfuerzos de tracción y corte dependiendo del tipo de elemento sometido a refuerzo.

Luego, nace la necesidad de estudiar el comportamiento a tracción de los compuestos (en concordancia con AC434 2011), para cuantificar y cualificar sus propiedades mecánicas, tales como, tensión - deformación de fisuración, tensión - deformación última.

Para los ensayos de tracción de compuestos de fibra y matriz cementícea, se distinguen 4 etapas (Figura 4.1) (Traducida de Alboreda et al 2012).

- Etapa I: comportamiento elástico - lineal, antes de la aparición de la primera fisura en el hormigón. En esta etapa, la deformación de la probeta es menor que la deformación de fisura de la matriz y la rigidez del compuesto es aproximadamente igual a la rigidez de la matriz.
- Etapa IIa: una vez iniciado el agrietamiento y hasta que éste finaliza. Luego de la primera fisura, la carga es transferida a través de la matriz hacia la fibra, produciéndose un agrietamiento progresivo de la matriz.
- Etapa IIb: desde el fin del agrietamiento hasta la rotura de la fibra. Una vez que la matriz pierde su capacidad de resistir carga, la fuerza es completamente resistida por la fibra, de manera que la rigidez del compuesto se es aproximadamente la rigidez de esta última.
- Etapa III: rotura del compuesto.

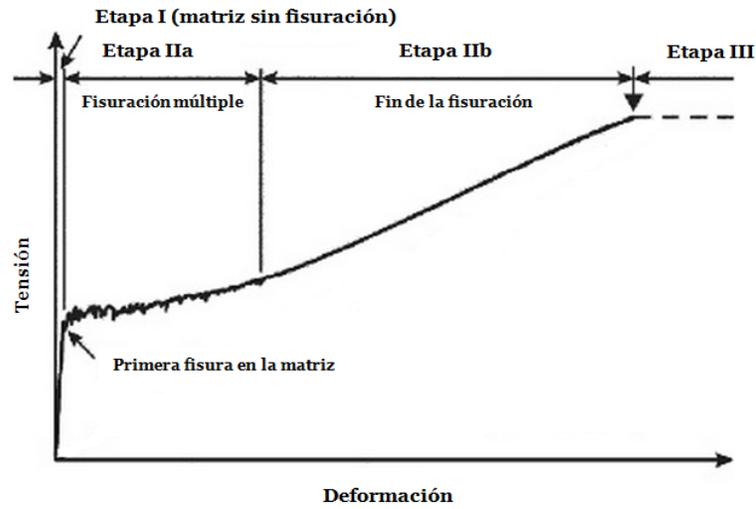


Figura 4.1: Curva tensión – deformación teórica para el material compuesto bajo ensayo de tracción

En la realidad, la adherencia entre matriz y fibra no es perfecta y la resistencia a tracción de la fibra no es alcanzada, debido a que el principal modo de falla de los compuestos FRCM en tracción es el deslizamiento de las fibras (Alboreda et al 2012).

La transición entre el Estado I y el Estado IIa antes de la primera fisura se ha denominado “punto de inclinación” (*bend-over point BOP*) (Alboreda et al 2012) y punto de transición (AC 434 2011).

La curva idealizada del comportamiento de los compuestos a tracción, corresponde a un comportamiento bilineal del material (Figura 4.2) (Traducida de Alboreda et al 2012).

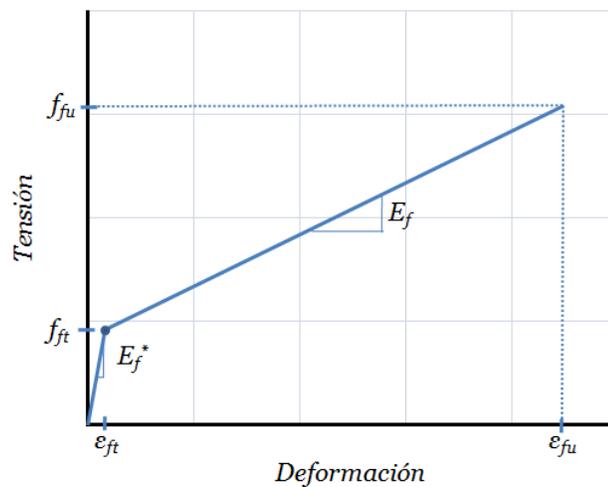


Figura 4.2: Curva tensión - deformación idealizada para el material compuesto bajo ensayo de tracción

E_t^* =	Módulo de elasticidad de la probeta no fisurada
E_f =	Módulo de elasticidad de la probeta fisurada
ε_{fu} =	Deformación última de tracción
ε_{ft} =	Deformación en el punto de transición
f_{fu} =	Tensión última de tracción
f_{ft} =	Tensión en el punto de transición

4.1.2. Método de ensayo

4.1.2.1. Descripción

Este ensayo de tracción, consiste en la fabricación, curado y ensayo de una lámina de material compuesto para obtener los valores de carga (tensión) de fisuración y última y deformación última para las distintas configuraciones, variando el tipo de mortero complementario a la fibra de carbono para formar el compuesto.

Las láminas de material compuesto utilizadas para este ensayo son de 40 [cm] de largo, 5 [cm] de ancho y 1,2 [cm] de espesor (Figura 4.3).

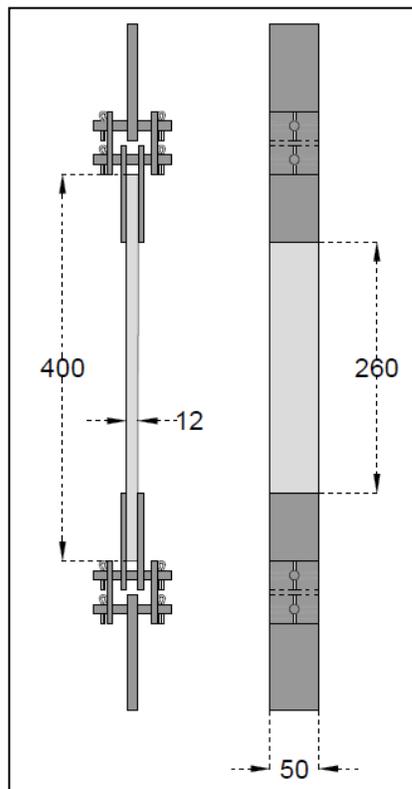


Figura 4.3: Esquema de ensayo de tracción (medidas en mm)

Un aspecto importante en este ensayo es la mordaza desde la cual se transfiere la fuerza de tracción sobre la probeta de ensayo.

En efecto, este dispositivo debe cumplir ciertas características: debe ser de tal forma que evite el contacto directo entre la máquina de ensayo y la probeta, de manera que esta última no falle o se rompa por aplastamiento. Además, debe hacer las veces de rótula para evitar inducir esfuerzos de momento sobre la probeta de ensayo, de modo que sobre ésta en todo instante se apliquen sólo esfuerzos de tracción.

Para esto, se diseñó una mordaza especialmente para este ensayo, cuyo detalle se muestra en la Figura 4.4. Como se observa en esta figura, las láminas de acero denominadas “Pieza 1”, son las que estarán en contacto con la probeta y transmitirán el esfuerzo de tracción desde la máquina de ensayo a la misma. Estas piezas se adhieren con resina epóxica para asegurar su correcta posición y la correcta transferencia de carga.

Las piezas denominadas “Pasador”, permiten la articulación de la mordaza, de manera de evitar la incorporación de momento sobre la probeta, como se mencionó anteriormente. Éstas además, permiten el acomodamiento de la probeta y que se asiente en la máquina, inmediatamente después de iniciado el ensayo.

El montaje del ensayo se muestra en la Figura 4.5. (Traducido de: Alboreda 2014).

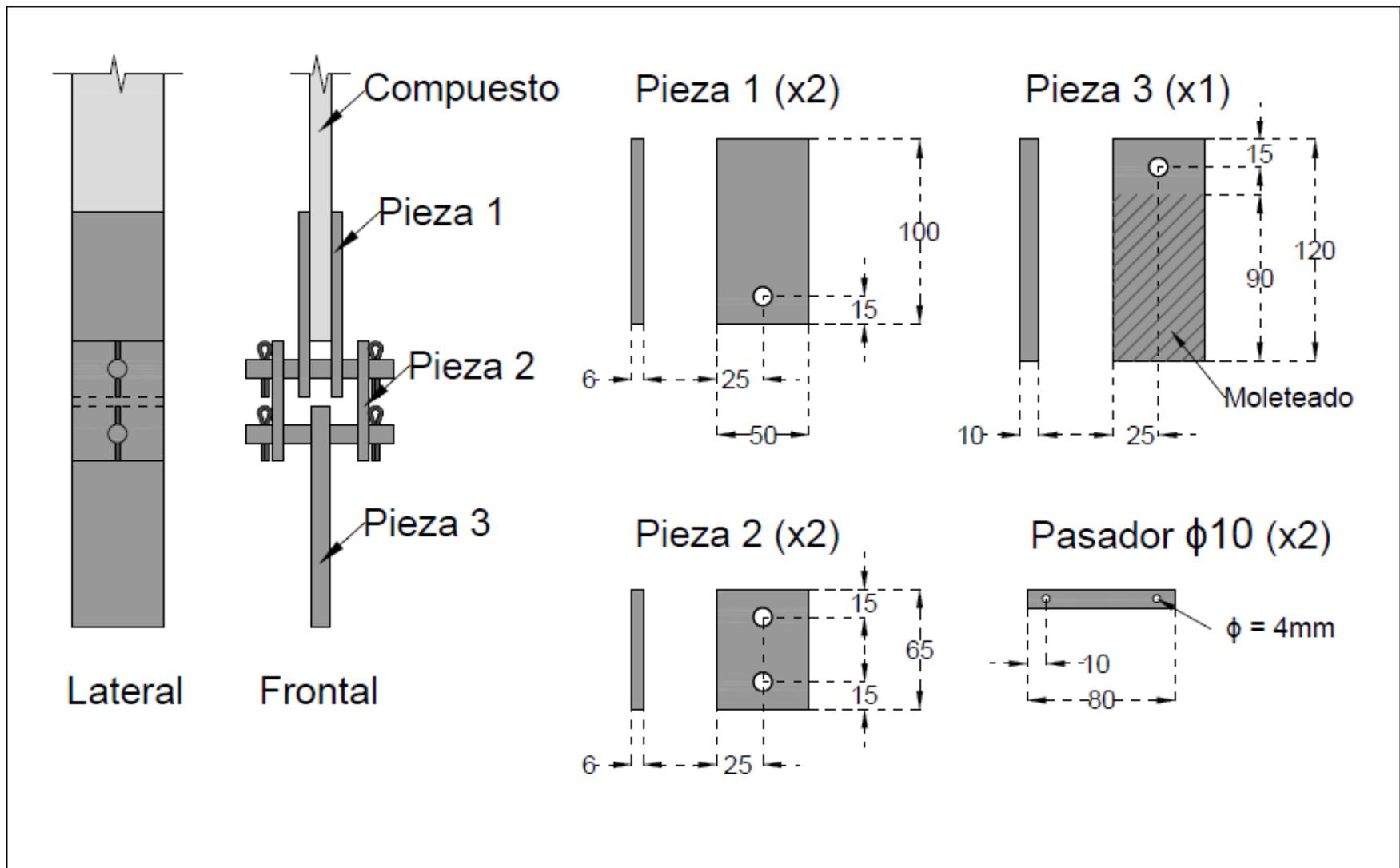


Figura 4.4: Sistema de mordaza para el ensayo de tracción del material compuesto

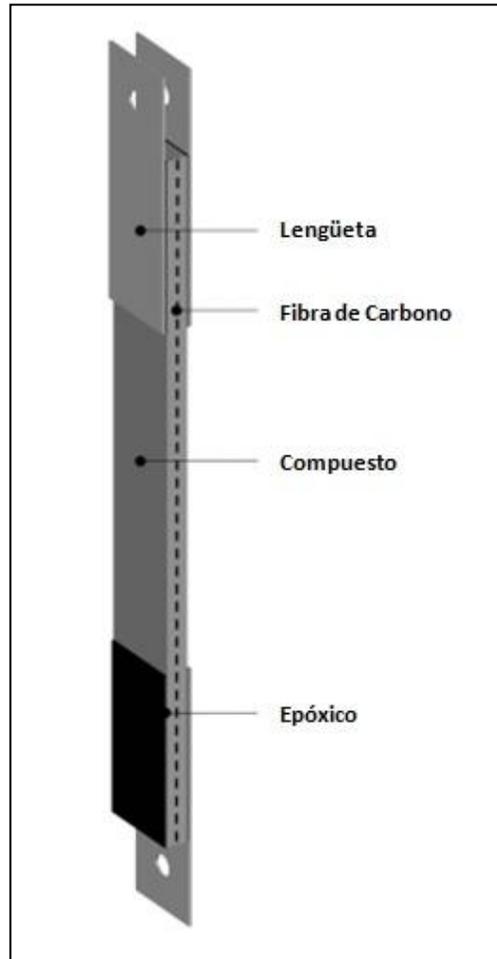


Figura 4.5: Esquema del ensayo de tracción del compuesto

4.1.2.2. Preparación de las probetas de ensayo

Para la preparación de las probetas de ensayo, se utiliza como moldaje una placa de madera contrachapada para moldaje de elementos de hormigón.

A fin de evitar la excesiva absorción de agua, se aplica una capa de barniz para madera tanto a la superficie como a los cantos. Además, para facilitar el desmolde y evitar la pérdida de agua, se coloca una lámina de polietileno en la base del molde (Figura 4.6).

Para asegurar el espesor uniforme tanto de la primera como de la segunda capa de matriz cementícea, se utilizan marcos de vidrio para otorgar la altura necesaria, de manera que la fibra de carbono se encuentre lo más centrada posible dentro del material compuesto.



Figura 4.6: Moldajes para las probetas de ensayo a tracción

La metodología desarrollada para la construcción de las probetas de ensayo a tracción se detalla a continuación:

- 1) Sobre la placa de madera se fijan con silicona la primera capa de marcos de vidrio, los cuales tienen un espesor de 6 [mm] (la mitad de la altura total del compuesto).
- 2) Se aplica la primera capa de matriz cementícea. Se distribuye uniformemente en todo el molde y se compacta con pisón metálico uniformemente para eliminar el aire interior y para esparcir completamente el mortero dentro del molde (Figura 4.7).
- 3) Se posiciona la fibra sobre la primera capa de matriz, y se presiona y embebe dentro de la matriz, análogamente como se muestra en la Figura 5.6: Posicionamiento y colocación de la fibra dentro de la matriz.
- 4) Se limpian los bordes de los marcos de vidrio y se montan la segunda capa de vidrios fijándolos con silicona.
- 5) Se repite el punto 2) para la segunda capa.
- 6) Se enrasan las probetas, se limpian los bordes y se cubre con lámina de polietileno para evitar la excesiva evaporación de agua.
- 7) Para los morteros en base a cemento (MP y MC), el curado se realiza en cámara húmeda ($T^{\circ} = 23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} \geq 90\%$), hasta alcanzar la edad de ensayo (28 días). Para el caso del mortero geopolimérico (MG), las primeras 24 [hrs] de curado se realiza a ambiente de laboratorio y las siguientes 24 [hrs] en horno a 80°C . Luego se desmoldan y se continúa el curado en ambiente de laboratorio hasta cumplir la edad de ensayo.



Figura 4.7: Compactación de la primera capa de matriz cementícea



Figura 4.8: Probetas de tracción

4.1.2.3. Montaje experimental

Los ensayos a tracción se realizan en las dependencias de la Unidad de Ensayos Estructurales de Idiem. Se utiliza una máquina de ensayo universal Amsler de 15.000 [kgf] de capacidad y que posee escalas de carga de hasta 500 [kgf], 1000 [kgf], 1.500 [kgf], 5.000 [kgf] y 15.000 [kgf]. La escala utilizada para todos los ensayos de tracción es la de 500 [kgf].

Para el ensayo, se registra la dimensión inicial de la probeta, la dimensión final de la probeta, la carga de fisuración, y la carga última para cada probeta.

Se realizan 3 ensayos por cada tipo de matriz cementícea estudiada.

4.1.2.4. Posibles modos de falla de los ensayos de tracción

Al igual que en el caso de los ensayos de flexión, para el caso de los ensayos de tracción de los compuestos existen distintos tipos de falla, dependiendo de las características mecánicas tanto de los materiales individuales como del compuesto.

Falla por rotura de fibra (RF)

Esta falla corresponde a lo esperado, y ocurre cuando, luego de agrietarse la matriz cementícea, la fibra de carbono empieza a ser solicitada hasta alcanzar su rotura.

Puede ser una falla dúctil, dependiendo de la capacidad de la matriz de agrietarse progresivamente, y de la fibra de absorber energía.

Falla por adherencia interna del compuesto o deslizamiento (DL)

Este tipo de falla corresponde a la deslaminación o movimiento relativo entre la matriz y la fibra. Se produce al existir mala compatibilidad entre la matriz y la fibra, y puede ser frágil o dúctil.

Falla por arrancamiento del sustrato (AS)

Esta falla se produce cuando el compuesto presenta una gran resistencia a la tracción, y la falla de la probeta se produce por arrancamiento del material compuesto debido a la acción de corte de la mordaza.

Falla por adherencia entre la mordaza y el compuesto (AD)

Esta falla se produce debido a la mala adherencia de la mordaza con el compuesto. Si se llegase a producir esta falla se debe descartar el ensayo, ya que no corresponde a una falla del material, sino del montaje del ensayo mismo.

4.1.3. Resultados

4.1.3.1. Variación entre las distintas matrices

En este punto, se presentan los resultados de los ensayos a tracción.

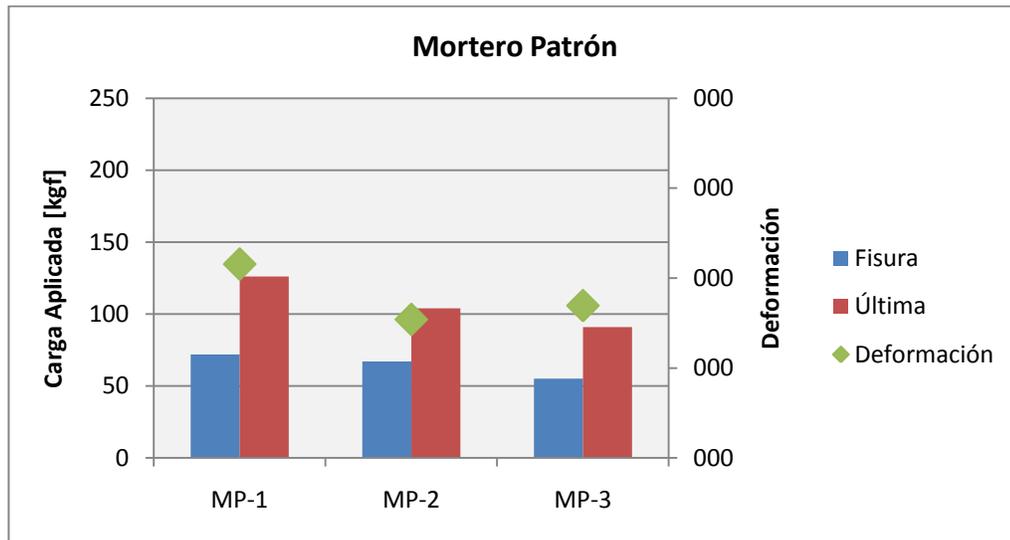


Figura 4.9: Resultados de ensayo de tracción para el mortero patrón

Tabla 4.1: Modo de falla para la serie MP

Probeta	Modo de Falla
MP-1	RF
MP-2	RF
MP-3	RF

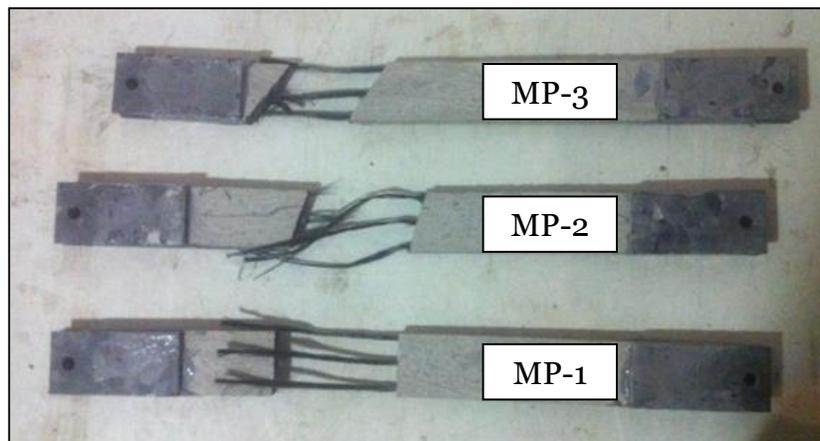


Figura 4.10: Probetas ensayadas serie MP

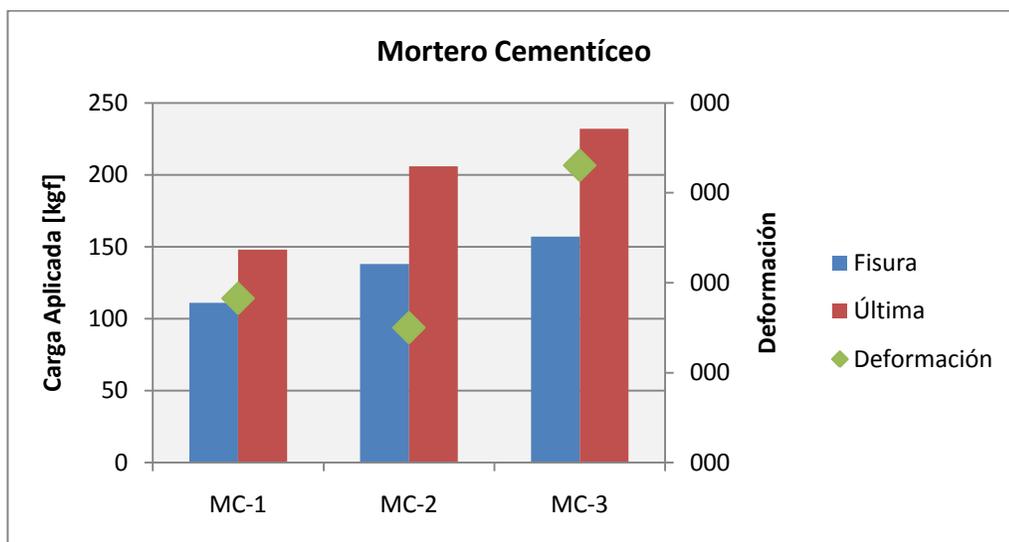


Figura 4.11: Resultados de ensayo de tracción para el mortero cementíceo

Tabla 4.2: Modo de falla para la serie MC

Probeta	Modo de Falla
MC-1	RF
MC-2	RF
MC-3	RF

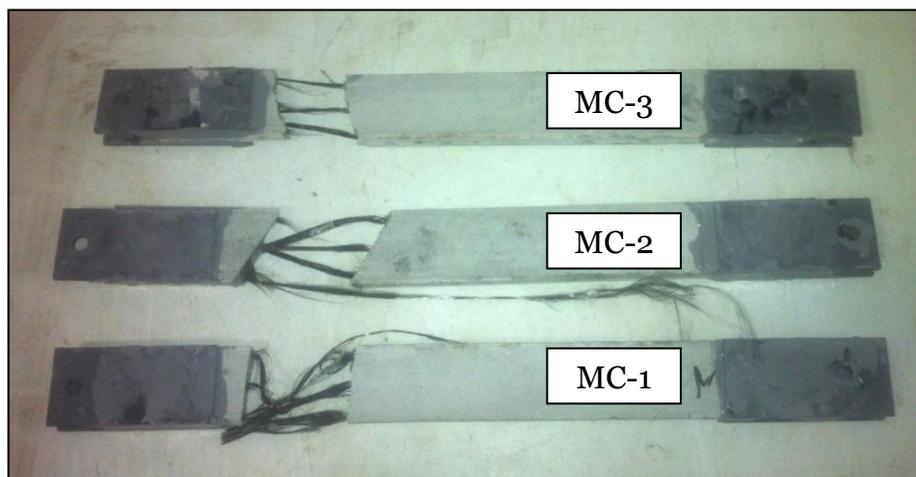


Figura 4.12: Probetas ensayadas serie MC

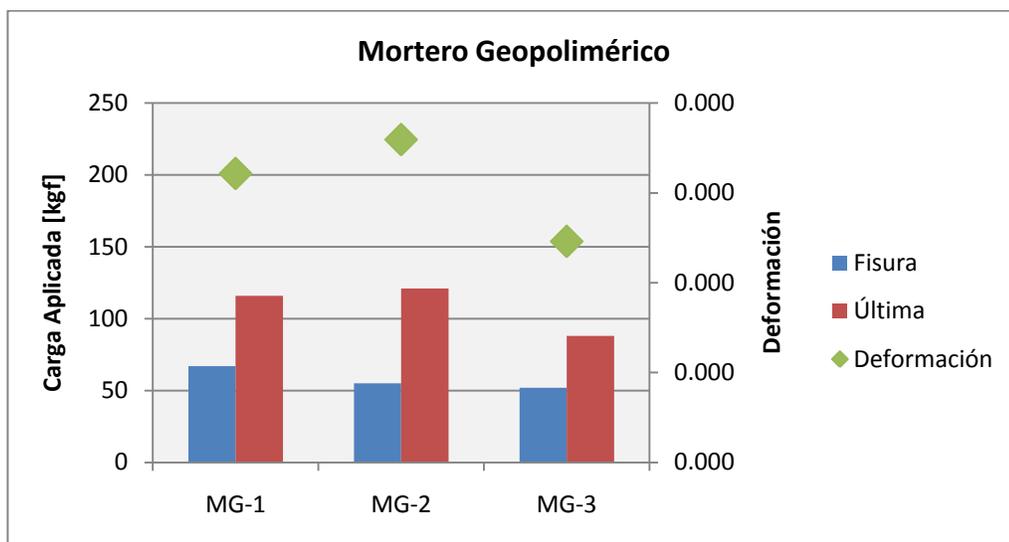


Figura 4.13: Resultados de ensayo de tracción para el mortero geopolimérico

Tabla 4.3: Modo de falla para la serie MG

Probeta	Modo de Falla
MG-1	DL
MG-2	DL
MG-3	DL

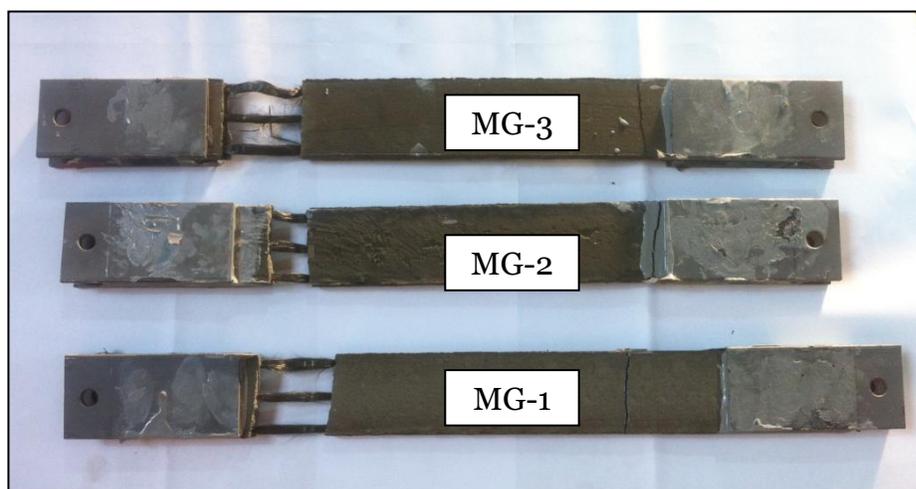


Figura 4.14: Probetas ensayadas serie MG

4.1.3.2. Comparación entre las distintas matrices

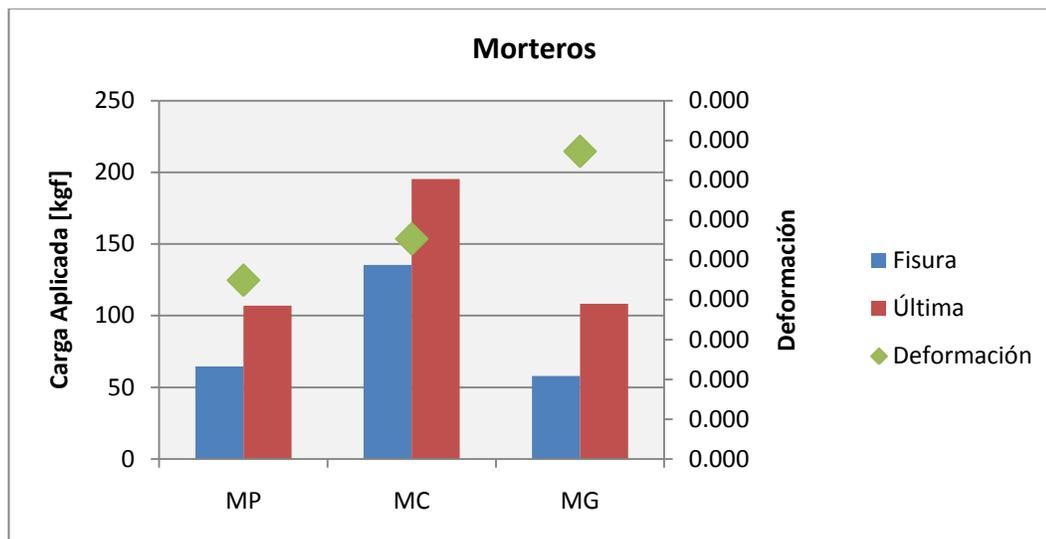


Figura 4.15: Resultados de ensayo de tracción promedio para las distintas matrices

4.2. ENSAYOS DE ADHERENCIA DE LOS MORTEROS

4.2.1. Método de ensayo

4.2.1.1. Descripción

Una de las propiedades más influyentes en el desempeño del sistema de refuerzo FRCM es la adherencia del mortero o matriz al sustrato y del refuerzo al mortero. Esta adherencia está determinada por la compatibilidad entre la matriz y la fibra, y la capacidad de formar un compuesto que trabaje como tal, y por otro lado, la adherencia entre la matriz y la superficie a reparar (típicamente hormigón o albañilería).

La compatibilidad de ambos materiales de refuerzo para formar el compuesto se detalla en el punto 2 de este capítulo, mediante los ensayos de tracción del compuesto. Por otro lado, la adherencia de la matriz a la superficie del elemento queda descrita en este punto, y se cuantifica mediante la norma NCh 2471 Of. 2000.

Esta norma se aplica para “determinar la adherencia de un recubrimiento sobre un sustrato mediante el método de tracción directa”¹⁵. Se entiende por adherencia la

¹⁵ NCh 2471 Of 2000.

“resistencia que opone un recubrimiento a ser separado de la superficie donde está colocado, al aplicarle una fuerza de tracción”¹⁶.

4.2.1.2. Metodología

Existe una metodología definida tanto para la preparación de las probetas como para el proceso de ensayo, las cuales se definen a continuación:

1) Preparación de las probetas

Para la preparación de las probetas de ensayo se sigue el siguiente procedimiento:

- El sustrato a utilizar corresponde a un pastelón de hormigón de 40 x 40 x 4 [cm]
- Antes de aplicar el recubrimiento sobre el sustrato, este último se sumerge en agua durante aproximadamente 5 [min] y se deja de forma vertical para eliminar el exceso de agua. Esto, para evitar que el sustrato absorba agua de amasado del mortero. (Figura 4.16)
- Se pesan y se mezclan todos los componentes de los diferentes morteros en la misma proporción, con los mismos tiempos de mezclado, y el mismo orden que el descrito anteriormente.
- El espesor del recubrimiento corresponde a 1,2 [cm], y ésta altura se logra uniformemente en todo el sustrato mediante un marco de madera no absorbente.
- Se aplica el recubrimiento, y se golpea suavemente para asentarlos y eliminar el aire atrapado.
- Se enrasa con regla metálica en movimiento de zigzag. (Figura 4.17)
- Se cubre el recubrimiento con una lámina de polietileno para evitar la pérdida de humedad, y luego de las primeras horas de fraguado, se cubre con una toalla húmeda para evitar el agrietamiento del mismo.
- Se repite el procedimiento para los 3 distintos morteros utilizados como matriz .

¹⁶ NCh 2471 Of 2000.

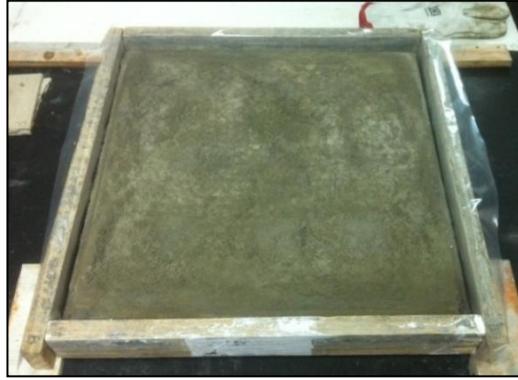


Figura 4.16: Sustrato antes de aplicar el recubrimiento



Figura 4.17: Enrase del recubrimiento sobre el sustrato



Figura 4.18: Diferentes tipos de recubrimientos para ensayo de adherencia

2) Ensayo

Para llevar a cabo el ensayo de tracción directa, se deben seguir las siguientes etapas:

- Al día N° 27 desde la confección de las probetas, se cortan con disco el contorno de la zona donde se adherirá el disco fijador para el ensayo (Figura 4.20).
- Se adhiere mediante resina epóxica el disco al recubrimiento cortado, donde se realizará el ensayo (Figura 4.21)
- Se conecta el equipo, y se aplica la carga de tracción hasta producir el despegue.
- Se obtiene la adherencia mediante la siguiente relación:

$$B = \frac{F}{A}$$

B = adherencia [MPa]

F = carga de rotura [N]

A = área de la probeta [mm²]

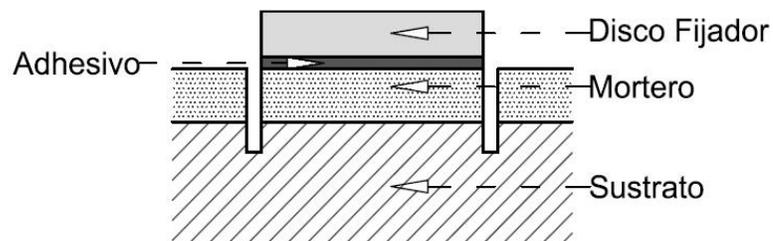


Figura 4.19: Esquema ensayo de tracción directa



Figura 4.20: Cortes sobre el recubrimiento

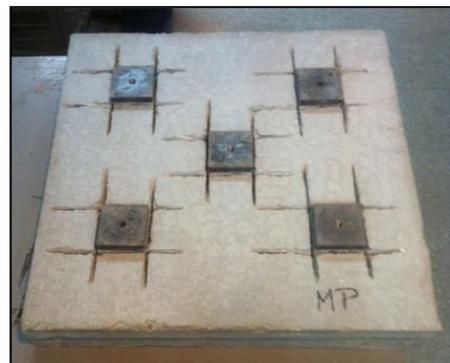


Figura 4.21: Aparatos para ensayo de tracción



Figura 4.22: Máquina de ensayo de tracción directa

4.2.1.3. Posibles modos de falla para los ensayos de adherencia

Al igual que los ensayos anteriores, para los ensayos de adherencia por tracción directa, existen distintos tipos de falla. Éstos dependen de las características tanto del revestimiento como del sustrato donde se esté aplicando.

Falla por adherencia (AD)

Se produce cuando se desprende el mortero de recubrimiento del sustrato.

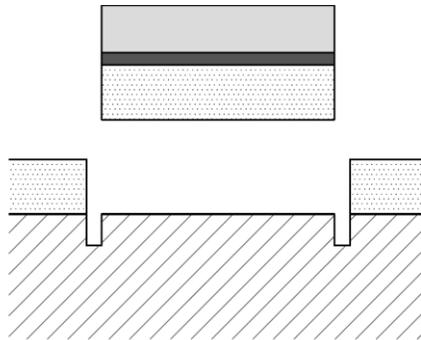


Figura 4.23: Falla por adherencia

Falla por rotura del recubrimiento (RR)

Se produce cuando la falla ocurre debido a la rotura del recubrimiento.

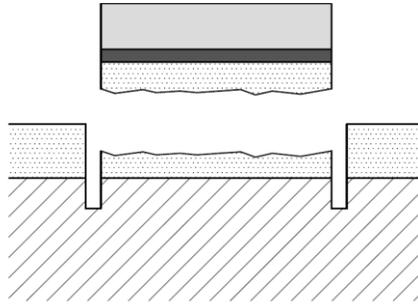


Figura 4.24: Falla por rotura del recubrimiento

Falla por rotura del sustrato (RS)

Se produce cuando la falla ocurre debido a la rotura o arrancamiento del sustrato.

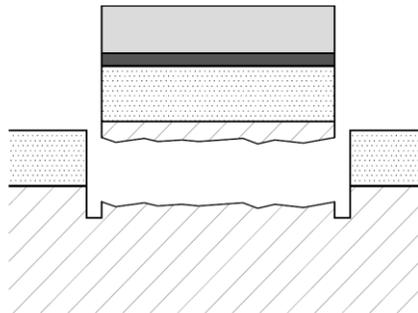


Figura 4.25: Falla por rotura del sustrato

Falla por despegue del adhesivo (DA)

Se produce cuando la falla ocurre debido al despegue del adhesivo entre el disco de tracción y el recubrimiento. Se llegase a ocurrir, se debe descartar el ensayo.

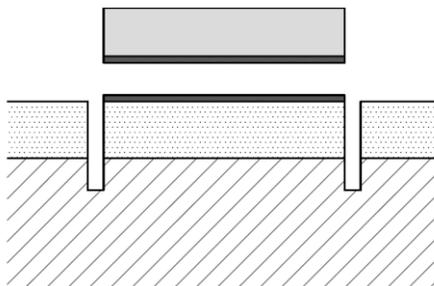


Figura 4.26: Falla por despegue del adhesivo

4.2.2. Resultados

4.2.2.1. Ensayos de adherencia al mortero patrón

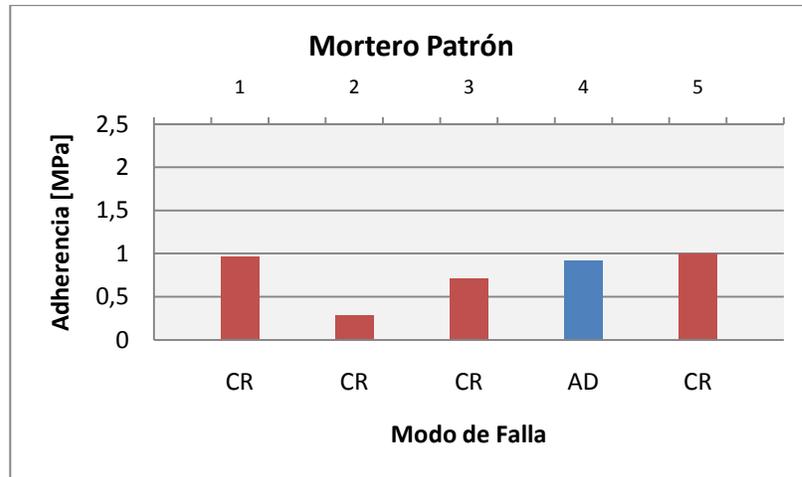


Figura 4.27: Ensayo de adherencia y modo de falla para el mortero patrón

4.2.2.2. Ensayos de adherencia al mortero cementíceo

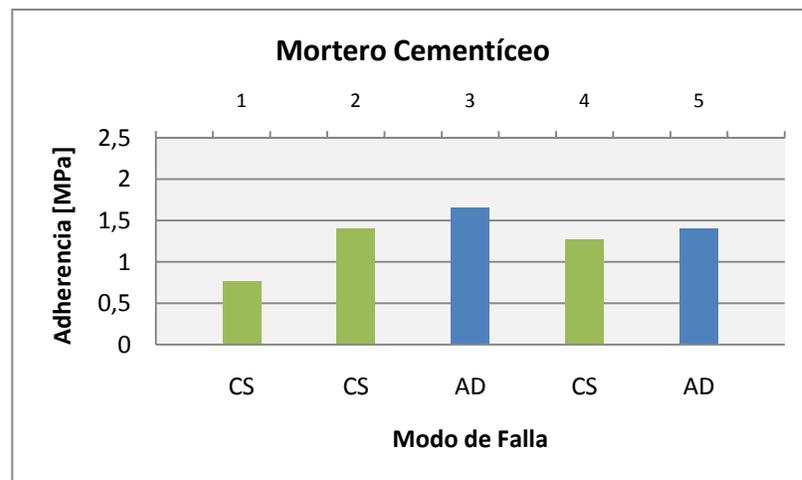


Figura 4.28: Ensayo de adherencia y modo de falla para el mortero cementíceo

4.2.2.3. Ensayos de adherencia al mortero geopolimérico

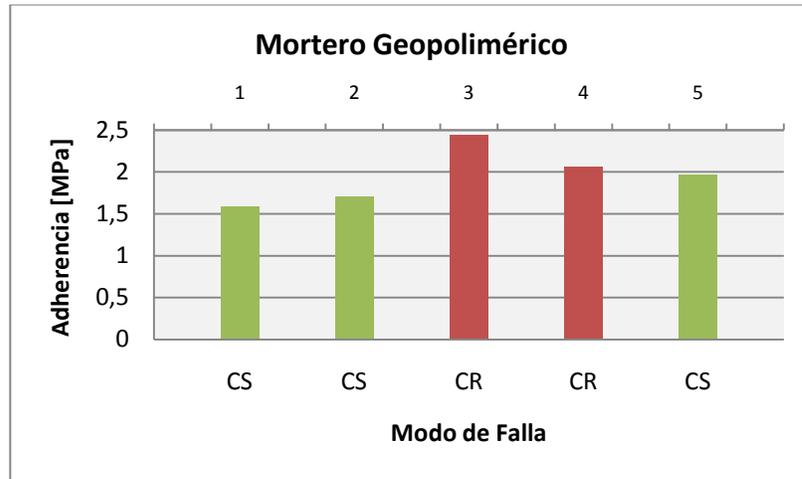


Figura 4.29: Ensayo de adherencia y modo de falla para el mortero geopolimérico

CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE REFUERZO FRCM MEDIANTE ENSAYO DE VIGA WHEST

5.1. INTRODUCCIÓN

Para estudiar la efectividad de la solución de refuerzo propuesta (FRCM), se realizan ensayos a flexión, usando la metodología de la Viga Whest (Wiberg 2003). Este método corresponde a un ensayo a tracción del compuesto (fibra de carbono y matriz cementícea), y cuando la resistencia a la tracción es excedida, se convierte en un ensayo de corte aplicada a la unión del mismo. El compuesto es aplicado en la parte inferior de la viga y es sometido a tracción cuando la viga es cargada a flexión.

El esquema de la viga a utilizar para los ensayos se muestra en la Figura 5.1.

Para materializar las singularidades de la viga, antes de hormigonar se deja una lámina de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) de 4 [mm] de espesor en el centro de la luz, lo que cumple la función de inductor de falla. Esto hace que el compuesto tome todo el esfuerzo de tracción en esa sección transversal al ser cargada la viga a flexión. Por otra parte, esta viga posee una rótula de acero al centro de la luz en la parte superior, lo que permite obtener la fuerza, el esfuerzo y la deformación del compuesto fácilmente, teniendo el momento aplicado (del análisis de fuerzas en la viga simplemente apoyada) y el brazo de palanca (de la geometría de la viga). En efecto, una vez que comienza a girar la rótula, el brazo de palanca del compuesto es 85 [mm], lo que corresponde a la distancia entre el centro del cilindro y el compuesto¹⁷.

Las ventajas de este ensayo son que es un ensayo a escala reducida, económico, reproducible y que entrega información relevante. Esto hace que sea posible hacer un gran número de ensayos y pruebas con diferentes matrices, fibras y configuraciones de fibras, para desarrollar un compuesto con características optimizadas..

Así, a través de este ensayo, se pretende estandarizar un método de caracterización para sistemas de refuerzos FRCM, que sea fácil de interpretar y fácil de reproducir, de manera de tener un método simple y sencillo de obtener cuantitativamente la adherencia tanto del material compuesto al sustrato, como la adherencia entre la fibra y la matriz cementícea dentro del mismo material compuesto.

¹⁷ La distancia de 85 [mm], corresponde a la distancia entre el centro del cilindro de la rótula y la fibra más baja de la viga. La distancia real entre el centro del cilindro y el centro geométrico del compuesto es de 91 [mm] (considerando un espesor del material compuesto de 12 [mm])

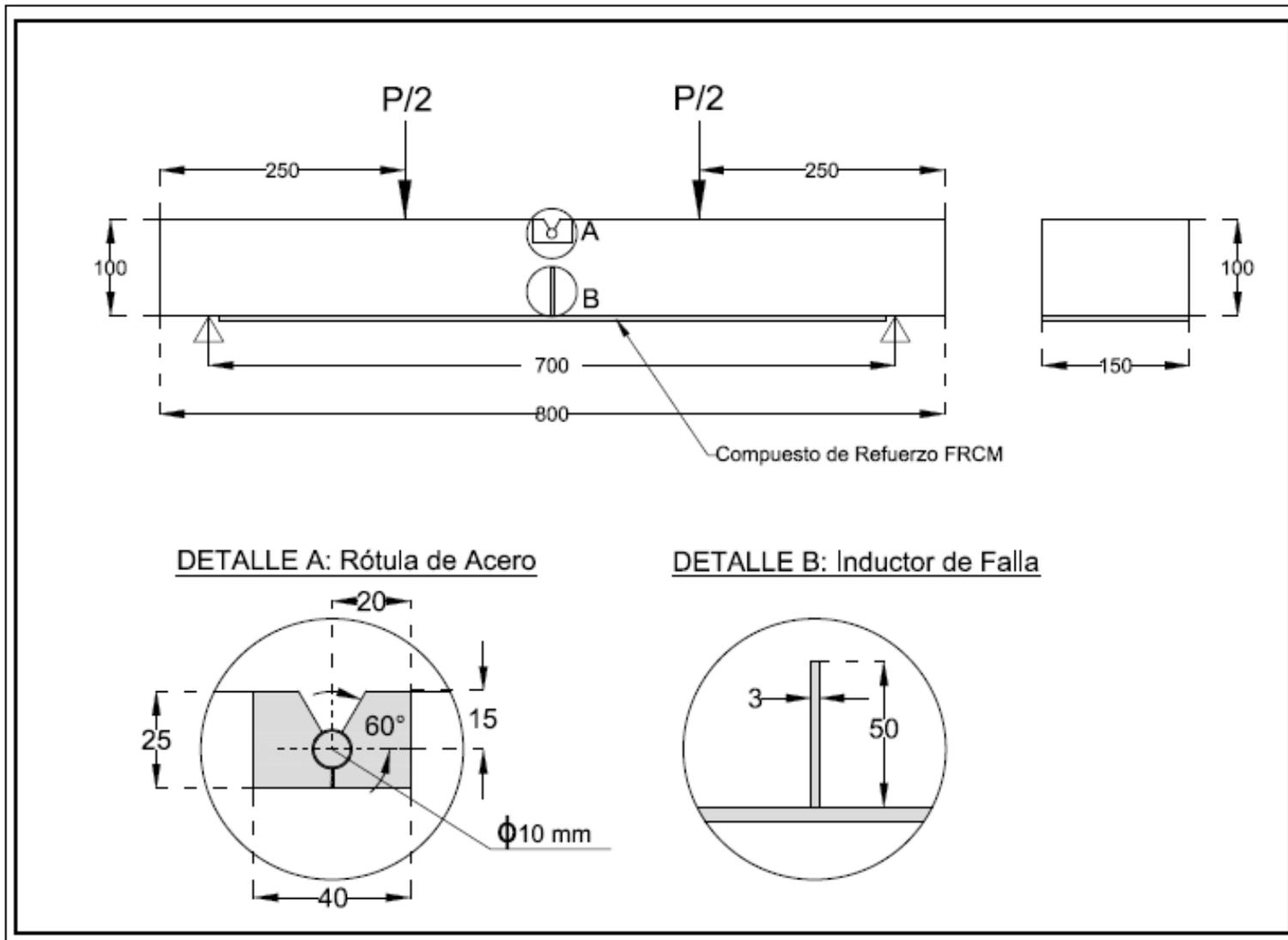


Figura 5.1: Esquema de la Viga Whest

5.2. INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE REFUERZO FRCM

Preparación de la superficie

Para asegurar la correcta adherencia del sistema compuesto de refuerzo con el elemento de hormigón, es necesario un proceso abrasivo para eliminar la lechada superficial, y con esto dejar los áridos a la vista y una superficie rugosa para asegurar la correcta adherencia del sistema y lograr, dentro de lo posible, monolitismo estructural entre ambos componentes (elemento de hormigón y sistema de refuerzo).

Cabe destacar la importancia de este proceso, el cual puede aumentar la resistencia final del ensayo hasta en un 45% (Wiberg 2003)

Para esto, lo más común es utilizar un proceso abrasivo en base a arenado, escobilla de acero manual o mecánica, agua a presión u otro proceso de decapado superficial.

Para este trabajo, se decide utilizar un proceso de ataque químico de la superficie mediante el uso de ácido clorhídrico (HCl) diluido en agua al 10% en peso de ambos componentes. De manera de estandarizar el proceso de ataque químico, se utiliza arena de mediana graduación saturada con la solución de ácido clorhídrico. El proceso de preparación de la superficie se detalla a continuación:

- Se lava la superficie de hormigón con bastante agua para eliminar el polvo y posibles contaminaciones.
- Se lava la arena para limpiar y eliminar el material fino, y se deja escurrir el agua en exceso.
- Se prepara la solución de ácido clorhídrico diluido en agua al 10% en peso.
- Se mezcla la arena previamente saturada con la solución de ácido clorhídrico, y se deja reposar por unos minutos.
- La mezcla se dispone sobre la superficie de las vigas formando un espesor de aproximadamente 2 [cm] en toda la parte inferior de la viga. (Figura 5.2)
- Se deja actuar durante 30 [min] y luego se retira.
- La viga se lava con abundante agua, se limpia con escobilla de acero, y se vuelve a lavar para eliminar todo el rastro de arena o ácido.
- El procedimiento se repite para todas las vigas de ensayo.



Figura 5.2: Aplicación de arena con ácido clorhídrico para la preparación de la superficie

Instalación del sistema de refuerzo FRCM a las vigas de ensayo

Una vez que se realizan todos los pasos previos y la preparación de la superficie, se procede con la instalación del sistema de refuerzo FRCM.

La cantidad de vigas a reforzar, y el tipo de refuerzo se muestra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Vigas a reforzar con la solución FRCM

Matriz	N° capas fibra	Viga N°	Nomenclatura
Mortero Patrón	1	1	MP – 1C – 1
		2	MP – 1C – 2
		3	MP – 1C – 3
	2	1	MP – 2C – 1
		2	MP – 2C – 2
		3	MP – 2C – 3
Mortero Cementíceo	1	1	MC – 1C – 1
		2	MC – 1C – 2
		3	MC – 1C – 3
	2	1	MC – 2C – 1
		2	MC – 2C – 2
		3	MC – 2C – 3
Mortero Geopolimérico	1	1	MG – 1C – 1
		2	MG – 1C – 2
		3	MG – 1C – 3
	2	1	MG – 2C – 1
		2	MG – 2C – 2
		3	MG – 2C – 3

La nomenclatura es del tipo: MX – YC – Z.

Donde,	X:	Tipo de matriz:	P: Patrón C: Cementícea G: Geopolimérica
	Y:	Nº mallas de fibra:	1: 1 malla 2: 2 mallas
	Z:	Nº de la viga de ensayo:	1, 2 o 3

El acondicionamiento de las vigas para los ensayos de flexión consta de 4 etapas: preparación de las probetas, instalación del sistema FRCM, curado e instrumentación, las cuales se describen a continuación.

Instalación del sistema de refuerzo FRCM

- 1) La cara inferior de las vigas se limpia del polvo y suciedad que pudiesen tener.
- 2) Se instala un marco de madera para asegurar un espesor uniforme del sistema de refuerzo. Este espesor se fija en 1,2 [cm] para todas las vigas de ensayo.
- 3) Se humedece la superficie con agua, para evitar que absorba agua de amasado del mortero y se seca el exceso en la superficie con un paño absorbente. (Figura 5.3)



Figura 5.3: Preparación de las probetas

- 4) Se aplica la primera capa de mortero sobre la viga, asegurando de tener un espesor aproximadamente constante en toda la extensión de la superficie. (Figura 5.4)
- 5) Se compacta el mortero usando un pisón de forma rectangular para que el mortero penetre en el sustrato, para ocupar todos los espacios de la viga y para eliminar las burbujas de aire atrapadas por el mezclado. (Figura 5.5)

- 6) Se posiciona la malla de fibra previamente cortada sobre la superficie, y se presiona dentro de la primera capa de matriz cementícea. (Figura 5.6)
- 7) Para el caso de las vigas reforzadas con una malla, se aplica el recubrimiento final según el punto 4), se compacta según el punto 5) y se enrasa la superficie usando una regla metálica.

Para el caso de las vigas reforzadas con dos mallas, se aplica la segunda capa de matriz según el punto 4), se compacta según el punto 5) y se coloca la segunda malla de fibra según el punto 6). Finalmente se aplica el recubrimiento final según el punto 4), se compacta según el punto 5) y se enrasa con regla metálica. (Figura 4.19).



Figura 5.4: Aplicación de la primera capa de matriz



Figura 5.5: Compactación de la capa de matriz



Figura 5.6: Posicionamiento y colocación de la fibra dentro de la matriz

- 8) El curado de las probetas, se realiza de forma distinta según el tipo de matriz utilizada. Para las matrices en base a cemento (MP y MC), luego de instalar el sistema FRCM, se cubren con polietileno para evitar la evaporación de agua, y se cubren con aspilleras húmedas para controlar el efecto de la temperatura sobre el sistema.

En el caso de la matriz geopolimérica (MG), se cubre durante 24 [hrs] con polietileno para evitar la excesiva evaporación de agua. Luego, se introduce en horno a 80 [°C] durante 24 [hrs], se retira, se deja enfriar en ambiente de laboratorio y se cubre con polietileno, para evitar posibles contaminaciones.

Para ambos casos, se mantiene la última condición hasta el día de ensayo; una vez que hayan alcanzado los 28 días de edad.

5.3. INSTALACIÓN DE LA RÓTULA E INSTRUMENTACIÓN DE LAS VIGAS DE ENSAYO

5.3.1. Instalación de la rótula de ensayo

Para la instalación de la rótula de ensayo (Figura 5.7) en las vigas se realiza el siguiente procedimiento:

- Se limpia la superficie y se raspa con escobilla de acero para eliminar posibles contaminaciones, y crear una superficie adecuada para adherir la rótula a la probeta.

- Se lava toda la superficie para eliminar el polvo y para humedecer la probeta antes de la instalación de la rótula.
- Se deja escurrir el exceso de agua y se aplica una pasta de cemento de relación A/C cercana a 0,35, como nivelación de la superficie donde se instalará la rótula
- Pasado unos 5 [min], se instala la rótula, se confirma la posición y el nivel y se deja escurrir una pasta de cemento, ahora más fluida, llenando todos los espacios entre la rótula de acero y la probeta de hormigón.



Figura 5.7: Rótula para ensayo de vigas



Figura 5.8: Viga antes de la instalación de la rótula de ensayo



Figura 5.9: Viga después de la instalación de la rótula de ensayo

5.3.2. Instrumentación

Para los ensayos a flexión se mide tanto la carga aplicada, como la deflexión (flecha) al centro de la luz de la viga. Para esto, se utiliza un medidor de carga y 2 LVDT de 25 [mm] de recorrido marca *TML*, los cuales son ubicados lo más cerca posible del centro de la luz de la viga, en lados opuestos entre ambas caras. La medición se realiza en un ángulo de aluminio que se adhiere a la viga mediante resina epóxica, como se muestra en la Figura 5.10.

Estas mediciones son recepcionadas y procesadas con un equipo *Data Logger TDS 620*, marca *TML*.



Figura 5.10: Ángulos para la instrumentación de las vigas de ensayo



Figura 5.11: Vista superior de la viga lista para ser ensayada

5.4. MONTAJE EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo los ensayos de las vigas, se utiliza la máquina de ensayo universal marca *Amsler* de 15.000 [kgf] de capacidad y distintas escalas de carga de la Unidad de Ensayos Estructurales de Idiem.

En la Figura 5.12, se muestra el montaje experimental de las vigas de ensayo.



Figura 5.12: Montaje experimental



Figura 5.13: Detalle de la instrumentación de las vigas de ensayo

5.5. POSIBLES MODOS DE FALLA DE LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN

Debido a las características físicas y mecánicas, tanto de la probeta de hormigón, como del sistema de refuerzo, al realizar los ensayos se pueden tener distintos tipos de falla, dependiendo de la resistencia individual y conjunta de los materiales ensayados.

Esto determinará tanto las resistencias últimas de las distintas probetas, así como también la forma de falla, reflejadas en gran parte en las curvas de interacción de carga aplicada y deflexión de la viga.

5.5.1. Falla por rotura de fibra (RF)

Este modo de falla se produce cuando la adherencia entre el material compuesto y el sustrato es la suficiente para que la matriz se agriete y la fibra alcance toda su capacidad mecánica hasta que falle por rotura.

En general corresponde a una falla frágil, y dependiendo de la cantidad de fibra que posea. El desplazamiento último puede ser hasta 10 veces el desplazamiento de fluencia.

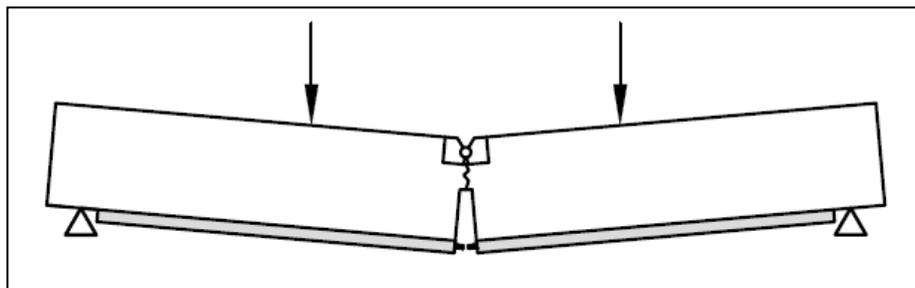


Figura 5.14: Falla de la probeta por rotura de la fibra

5.5.2. Falla por adherencia entre el material compuesto y el sustrato (AD)

Este modo de falla se produce cuando la adherencia entre el material compuesto y el sustrato no es suficiente, y antes de que la fibra alcance toda su capacidad, el material compuesto se desprende por completo del elemento de hormigón.

Corresponde a una falla frágil, con una grieta que avanza desde el extremo de la viga a gran velocidad hasta que se produce el colapso de forma repentina y brusca. El desplazamiento último es a lo más 2 veces el desplazamiento de rotura.

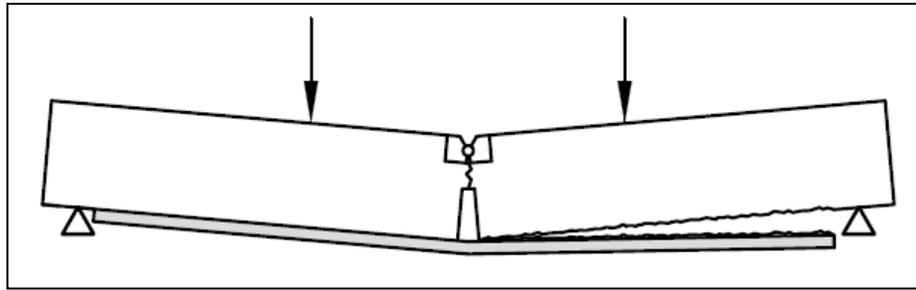


Figura 5.15: Falla de la probeta por adherencia entre el compuesto y el sustrato

5.5.3. **Falla por adherencia interna del material compuesto o deslaminación (DL)**

Esta falla se produce cuando existe poca adherencia interna entre la matriz y la fibra. Al no existir esta compatibilidad, tanto en deformación, como en deslizamiento relativo, se produce un desprendimiento de la matriz, quedando expuesta la fibra y se produce la falla pudiendo ésta llegar a la rotura o no.

Puede ser una falla frágil o dúctil, dependiendo de la capacidad de la fibra de absorber energía, antes de producirse el deslizamiento de los dos materiales que forman el compuesto.

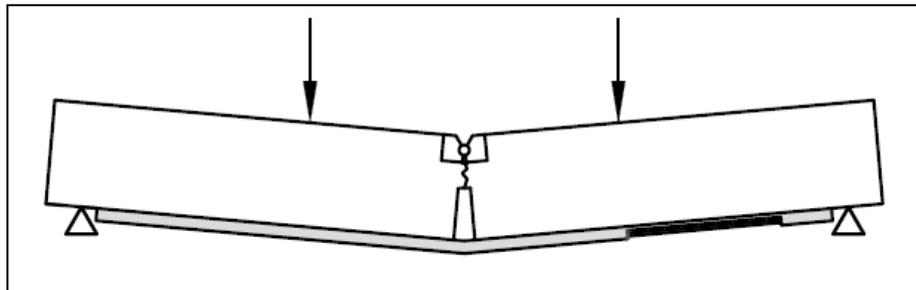


Figura 5.16: Falla de la probeta por deslaminación

5.5.4. **Falla por arrancamiento del sustrato (AS)**

Este modo de falla se produce cuando la adherencia en los anclajes entre el material compuesto y el sustrato es suficiente como para arrancar parte del sustrato antes de que falle la fibra.

Se produce cuando los anclajes del material compuesto posee una gran adherencia, ya sea por una imprimación de la superficie antes de la instalación del compuesto, o bien, por realizar anclajes con la misma fibra al introducirla dentro del sustrato.

Puede ser una falla frágil o dúctil, dependiendo de la capacidad del compuesto a deformarse (flexibilidad) y de si la viga posee o no armadura interna.

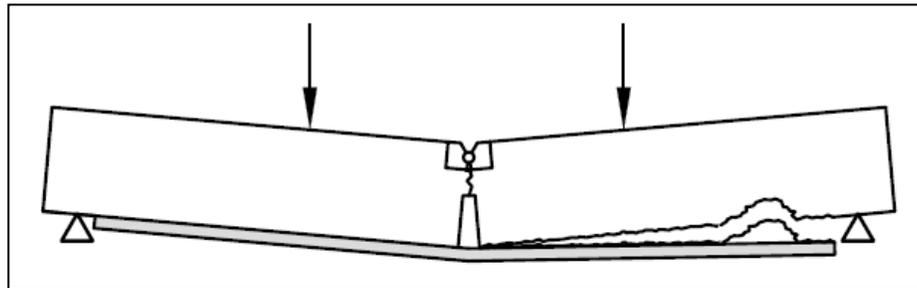


Figura 5.17: Falla de la probeta por arrancamiento del sustrato

5.5.5. Falla por corte de la viga (CV)

Este modo de falla se produce cuando la resistencia a flexión del material compuesto supera a la resistencia que presenta la viga al corte.

En este caso, se produce una grieta de corte (cercana a los 45°), la cual puede ser frágil o dúctil si la viga presenta refuerzo para corte, tanto interno (estribos) como externos (tipo *U-Wraps*).

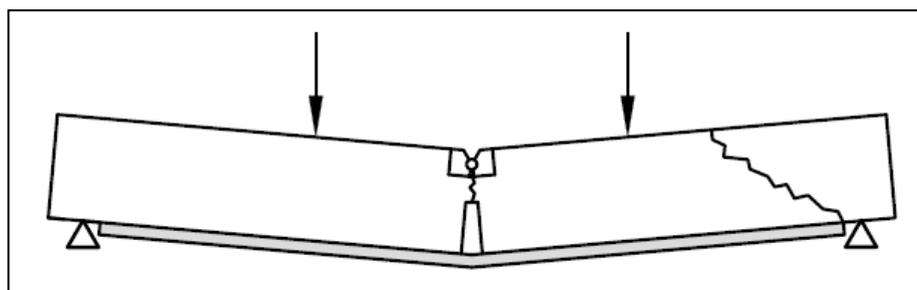


Figura 5.18: Falla de la probeta por corte en la viga

5.6. RESULTADOS

5.6.1. Antecedentes previos

En primer lugar, se ensayan los distintos tipos de matrices con 1 y 2 capas de fibra, utilizando distintas escalas de carga dependiendo de la capacidad estimada de las distintas configuraciones.

Las vigas ensayadas se muestran en la Tabla 5.2, junto con las escalas utilizadas y el tiempo de duración del ensayo.

Tabla 5.2: Vigas ensayadas, escala y tiempo de ensayo

Probeta	Escala de carga [kgf]	Tiempo de ensayo [MM:SS]
Mortero Patrón		
MP-1C-1	1.500	2:57
MP-1C-2	1.500	4:19
MP-1C-3	1.500	4:11
MP-2C-1	1.500	2:47
MP-2C-2	1.500	5:06
MP-2C-3	1.500	4:23
Mortero Cementíceo		
MC-1C-1	1.500	2:07
MC-1C-2	1.500	2:00
MC-1C-3	1.000	8:43
MC-2C-1	1.500	14:55
MC-2C-2	1.500	5:02
MC-2C-3	1.500	5:33
Mortero Geopolimérico		
MG-1C-1	1.000	3:17
MG-1C-2	1.000	3:05
MG-1C-3	1.000	2:57
MG-2C-1	5.000	4:50
MG-2C-2	5.000	4:43
MG-2C-3	1.500	6:29

A continuación se muestran los resultados de los ensayos de flexión de vigas reforzadas con las distintas matrices y distintas cantidades de refuerzo.

Además, se hace una comparación entre las distintas configuraciones utilizando el promedio de los 3 ensayos realizados para cada configuración.

5.6.2. Variación entre las distintas matrices, usando 1 malla de fibra

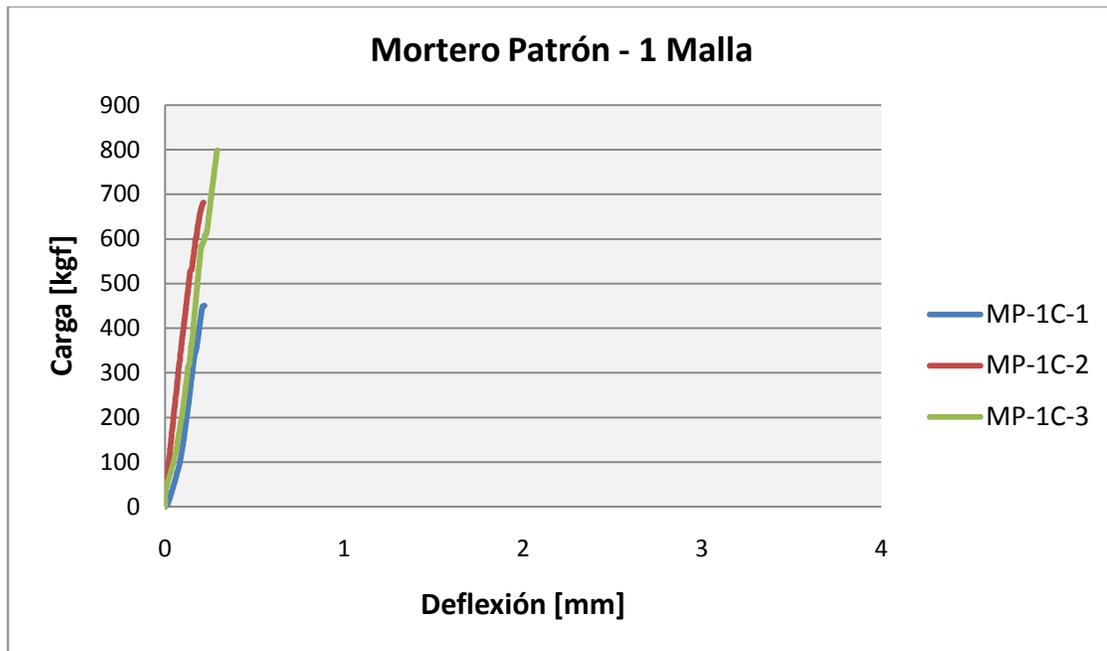


Figura 5.19: Mortero Patrón y 1 malla de fibra

Tabla 5.3: Resumen de resultados de ensayo MP-1C

		MP-1C-1	MP-1C-2	MP-1C-3	MP-1C-Prom
Carga de Primera Fisura [kgf]	Pf	449	682	799	574
Carga Máxima [kgf]	Pmax	451	683	800	579
Carga Última [kgf]	PU	452	683	800	579
Momento Máximo [kN m]	Mmax	0,45	0,68	0,80	0,58
Deflexión Máxima [mm]	[mm]	0,22	0,23	0,30	0,25
Carga Máxima en el compuesto [kgf]	PC	531	804	941	681
Modo de Falla	MF	AD	RF	RF	-



Figura 5.20: Modo de falla por adherencia (MP-1C-1)



Figura 5.21: Modo de falla por rotura de fibra (MP-1C-2 y MP-1C-3)

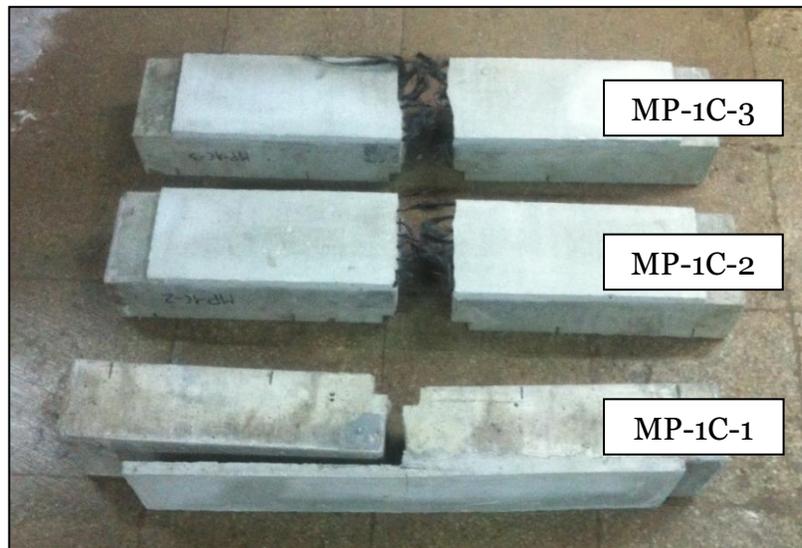


Figura 5.22: Probetas ensayadas serie MP-1C

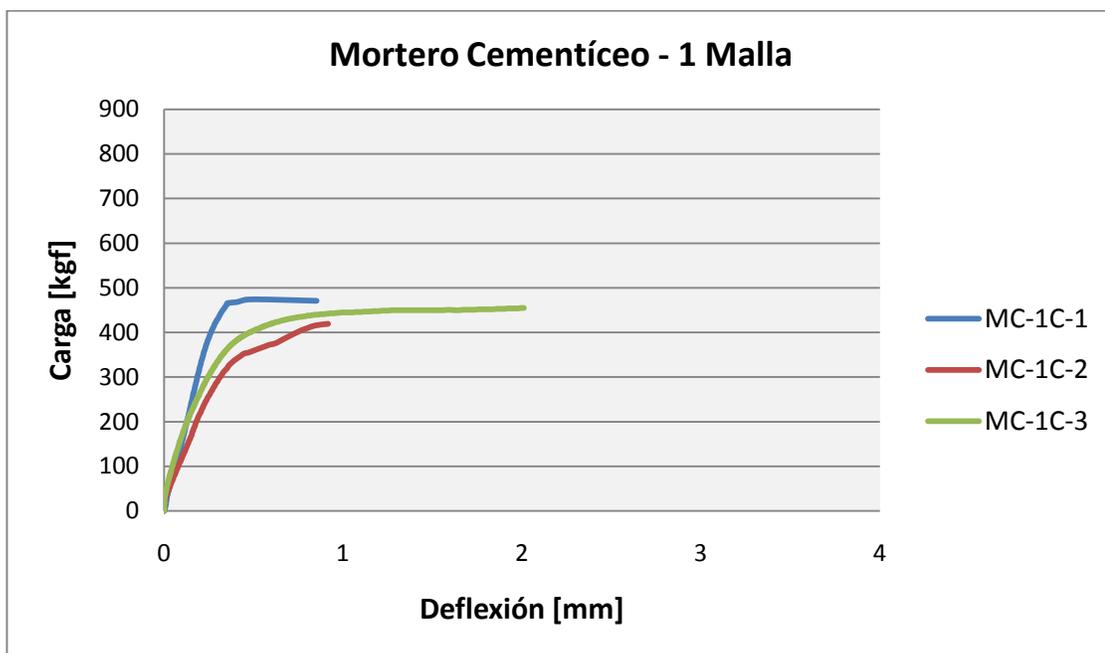


Figura 5.23: Mortero Cementicio y 1 malla de fibra

Tabla 5.4: Resumen de resultados de ensayo MC-1C

		MC-1C-1	MC-1C-2	MC-1C-3	MC-1C-Prom
Carga de Primera Fisura [kgf]	Pf	377	347	343	381
Carga Máxima [kgf]	Pmax	474	419	457	442
Carga Última [kgf]	PU	471	419	457	442
Momento Máximo [kN m]	Mmax	0,47	0,42	0,46	0,44
Deflexión Máxima [mm]	dmax	0,85	0,92	2,10	1,29
Carga Máxima en el compuesto [kgf]	PC	558	493	538	520
Modo de Falla	MF	AD	AD	RF	-



Figura 5.24: Modo de falla por adherencia (MC-1C-1 y MC-1C-2)



Figura 5.25: Modo de falla por rotura de fibra (MC-1C-3)

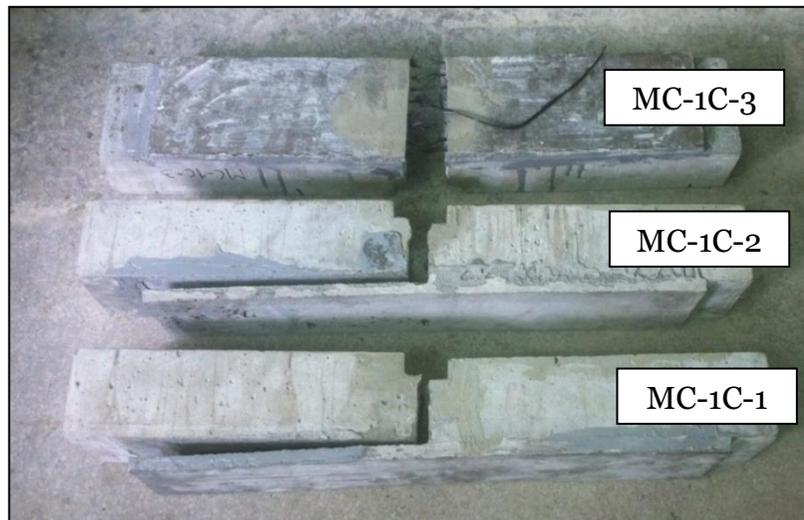


Figura 5.26: Probetas ensayadas serie MC-1C

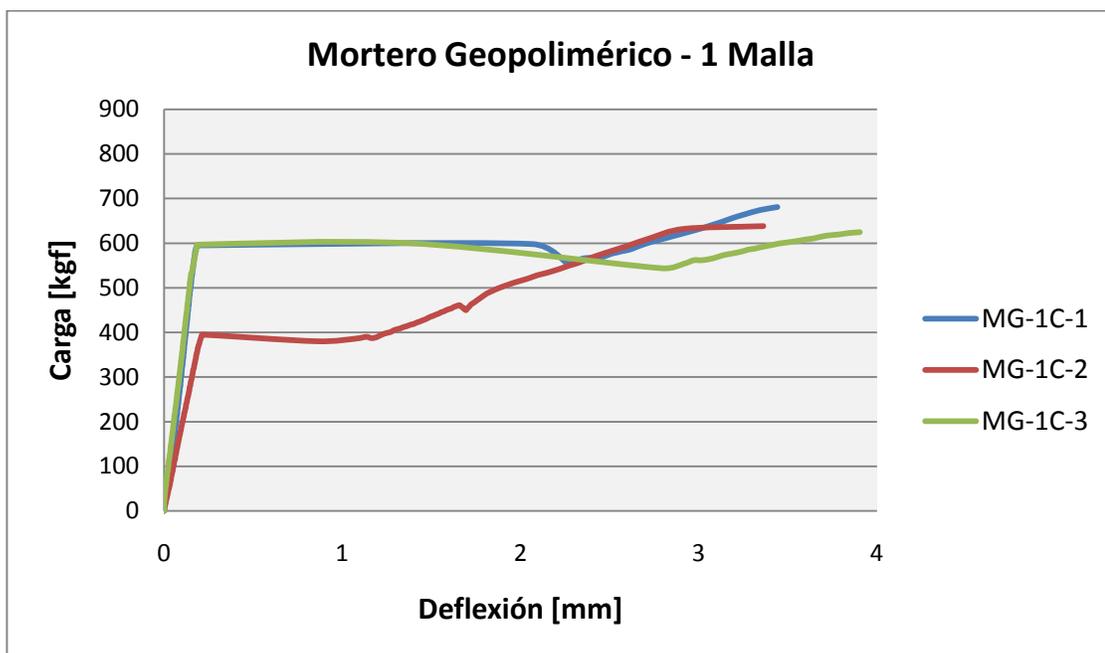


Figura 5.27: Mortero Geopolimérico y 1 malla de fibra

Tabla 5.5: Resumen de resultados de ensayo MG-1C

		MG-1C-1	MG-1C-2	MG-1C-3	MG-1C-Prom
Carga de Primera Fisura [kgf]	Pf	595	395	597	527
Carga Máxima [kgf]	Pmax	681	638	625	635
Carga Última [kgf]	PU	681	638	625	635
Momento Máximo [kN m]	Mmax	0,68	0,64	0,63	0,64
Deflexión Máxima [mm]	dmax	3,44	3,36	3,90	3,57
Carga Máxima en el compuesto [kgf]	PC	801	751	735	747
Modo de Falla	MF	RF	RF	RF	-



Figura 5.28: Modo de falla por rotura de fibra (MG-1C-1, MG-1C-2 y MG-1C-3)

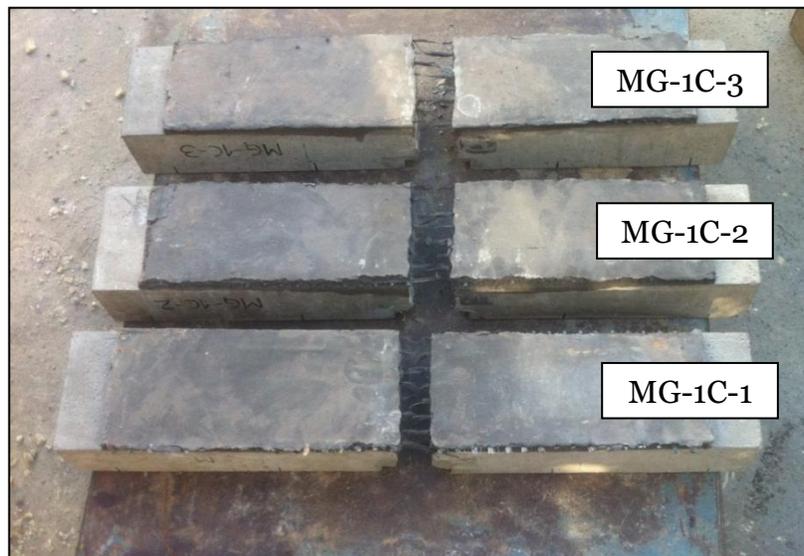


Figura 5.29: Probetas ensayadas serie MG-1C

5.6.3. Variación entre las distintas matrices, usando 2 mallas de fibra

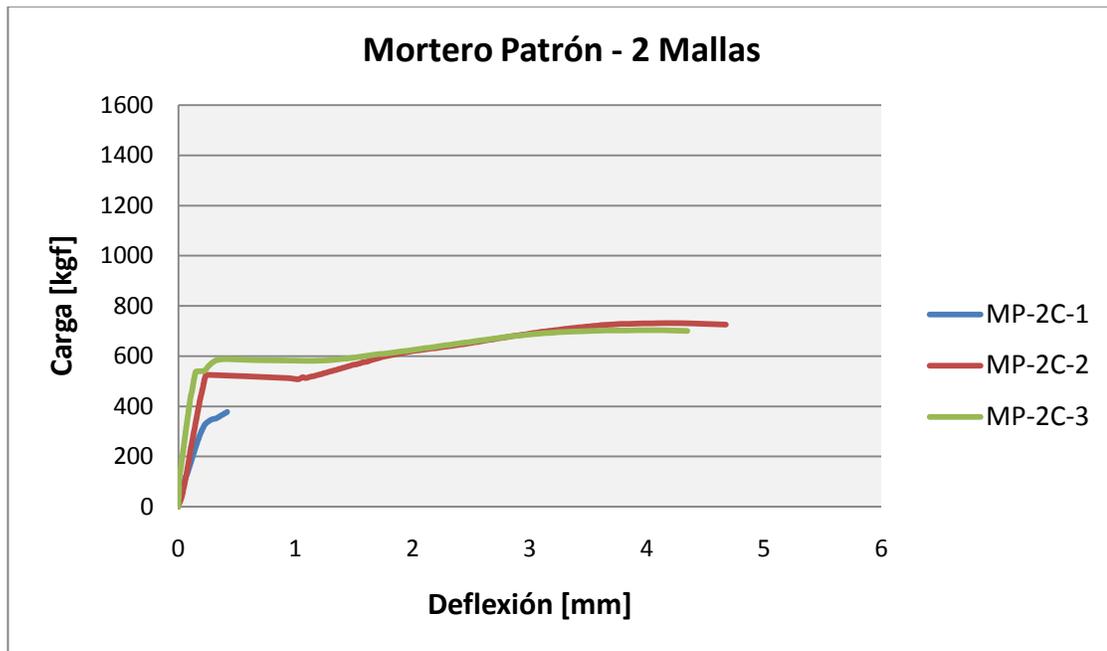


Figura 5.30: Mortero Patrón y 2 mallas de fibra

Tabla 5.6: Resumen de resultados de ensayo MP-2C

		MP-2C-1	MP-2C-2	MP-2C-3	MP-2C-Prom ¹⁸
Carga de Primera Fisura [kgf]	Pf	311	526	539	535
Carga Máxima [kgf]	Pmax	378	732	703	717
Carga Última [kgf]	PU	378	726	700	712
Momento Máximo [kN m]	Mmax	0,38	0,73	0,70	0,72
Deflexión Máxima [mm]	dmax	0,42	4,67	4,34	4,51
Carga Máxima en el compuesto [kgf]	PC	445	861	827	844
Modo de Falla	MF	AD	RF	RF	-

¹⁸ Al tomar el promedio de los datos, no se considera la Probeta MP-2C-1, debido al diferente modo de falla que presenta al realizarse el ensayo.



Figura 5.31: Modo de falla por adherencia (MP-2C-1)



Figura 5.32: Modo de falla por rotura de fibra (MP-2C-2 y MP-2C-3)

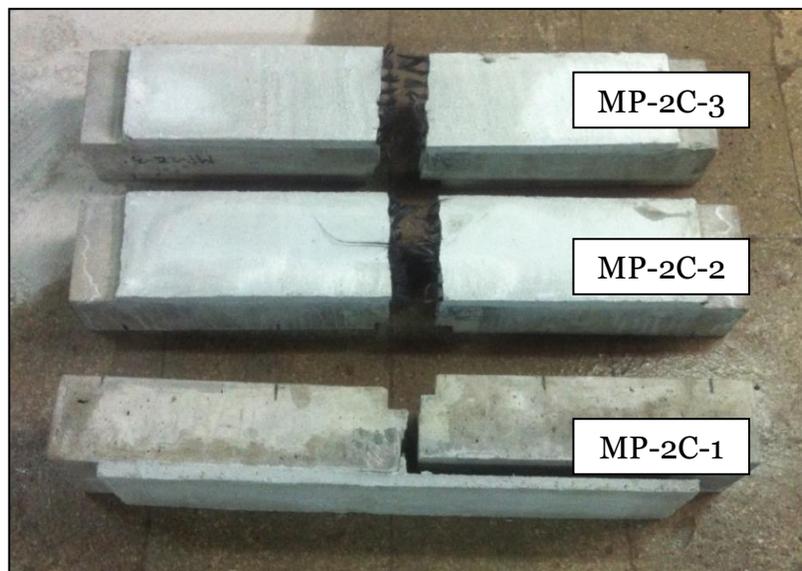


Figura 5.33: Probetas ensayadas serie MP-2C

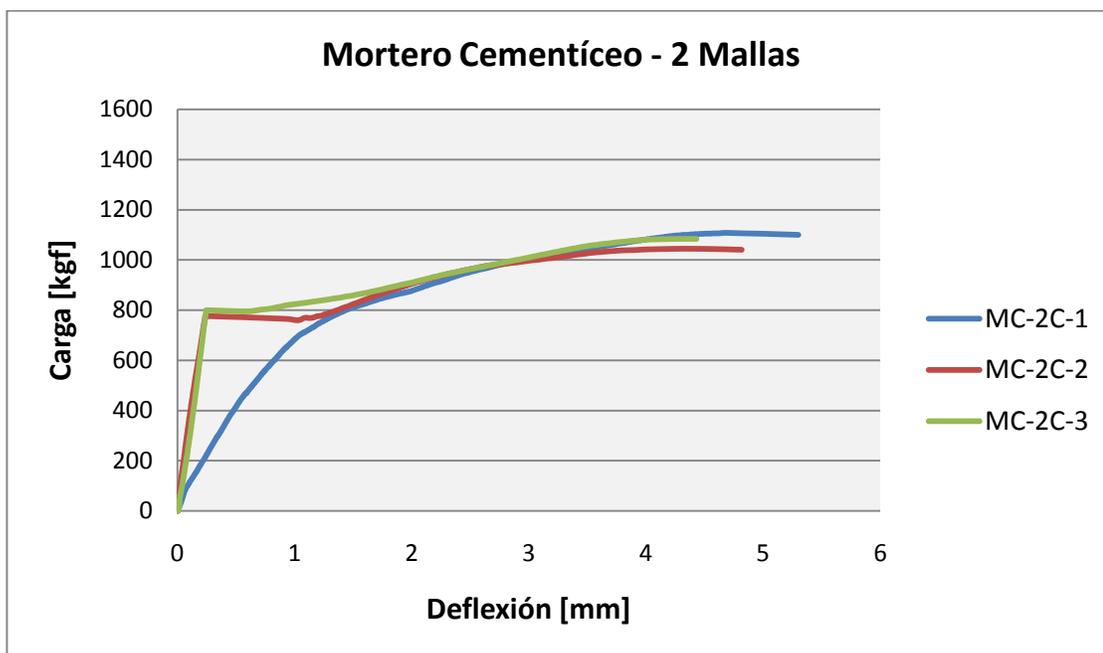


Figura 5.34: Mortero Cementicio y 2 mallas de fibra

Tabla 5.7: Resumen de resultados de ensayo MC-2C

		MC-2C-1	MC-2C-2	MC-2C-3	MC-2C-Prom ¹⁹
Carga de Primera Fisura [kgf]	Pf	645	776	800	786
Carga Máxima [kgf]	Pmax	1.108	1.044	1.084	1.064
Carga Última [kgf]	PU	1.100	1.040	1.084	1.063
Momento Máximo [kN m]	Mmax	1,11	1,04	1,08	1,06
Deflexión Máxima [mm]	dmax	5,30	4,82	4,43	4,63
Carga Máxima en el compuesto [kgf]	PC	1.304	1.228	1.275	1.252
Modo de Falla	MF	RF	RF	RF	-

¹⁹ Al tomar el promedio de los datos, no se considera la Probeta MC-2C-1. Si bien posee el mismo modo de falla que el resto de las probetas, la forma de ascendencia de la curva es distinta, lo que hace variar el promedio final de los resultados, tanto en la forma como en el valor numérico.



Figura 5.35: Modo de falla por rotura de fibra (MC-2C-1, MC-2C-2 y MC-2C-3)

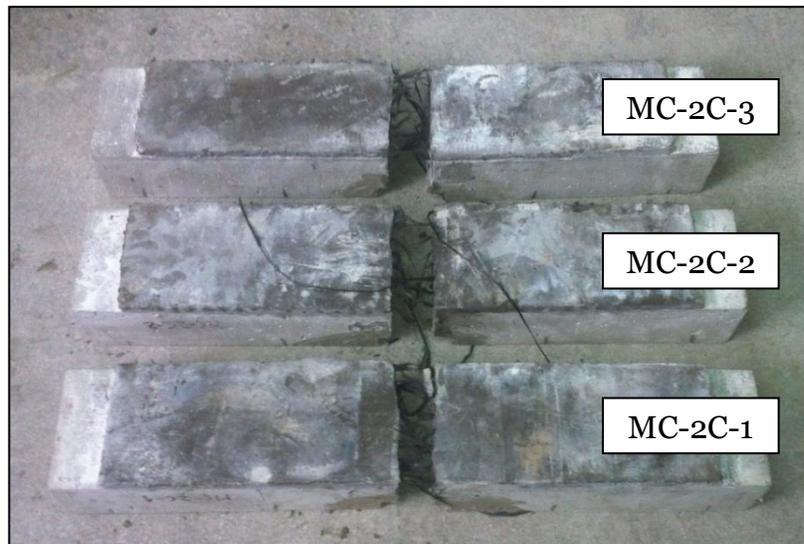


Figura 5.36: Probetas ensayadas serie MC-2C

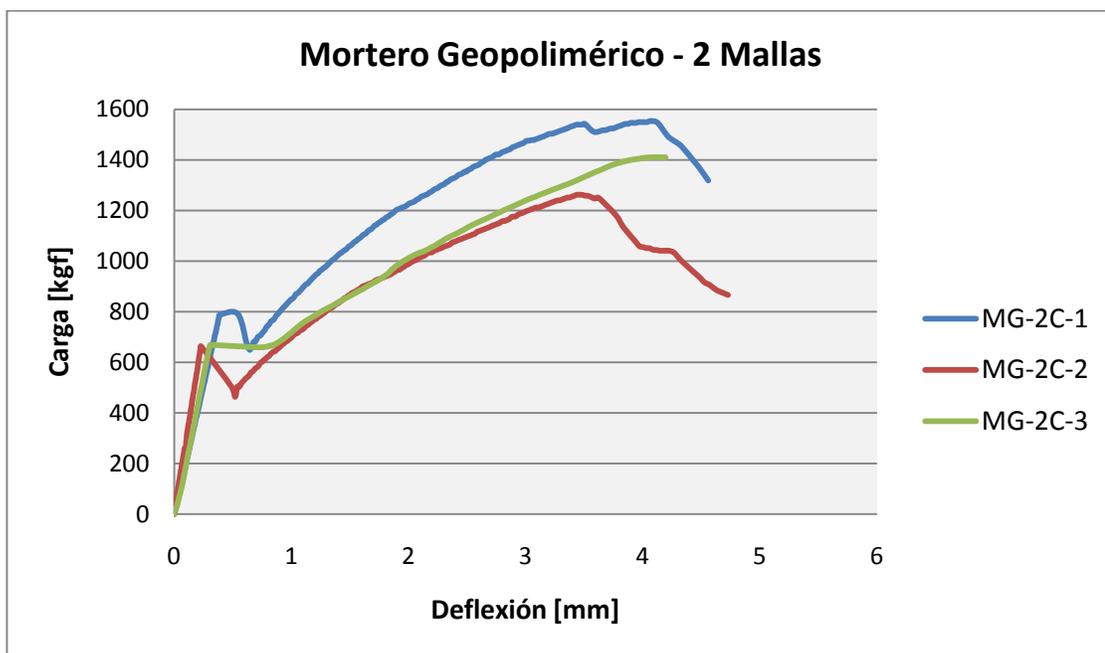


Figura 5.37: Mortero Geopolimérico 2 mallas de fibra

Tabla 5.8: Resumen de resultados de ensayo MG-2C

		MG-2C-1	MG-2C-2	MG-2C-3	MG-2C-Prom
Carga de Primera Fisura [kgf]	Pf	788	663	669	668
Carga Máxima [kgf]	Pmax	1.554	1.262	1.410	1.306
Carga Última [kgf]	PU	1.319	866	1.410	1.258
Momento Máximo [kN m]	Mmax	1,55	1,26	1,41	1,31
Deflexión Máxima [mm]	dmax	4,56	4,73	4,20	4,50
Carga Máxima en el compuesto [kgf]	PC	1.828	1.485	1.659	1.536
Modo de Falla		RF	RF	RF	-



Figura 5.38: Modo de falla por rotura de fibra (MG-2C-1, MG-2C-2 y MG-2C-3)

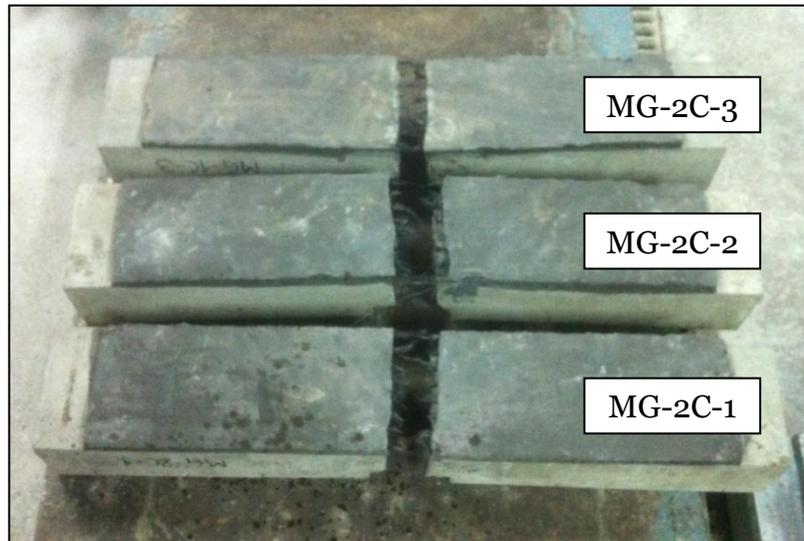


Figura 5.39: Probetas ensayadas serie MG-2C

5.6.4. Comparación entre distintas cuantías de fibra para la misma matriz

En esta sección se presenta la comparación entre la cuantía de fibra utilizando el mismo mortero como matriz del sistema.

Para facilitar la comparación, se utiliza el promedio de las tres probetas ensayadas para cada configuración.

Para calcular este promedio, y para suavizar las curvas de los ensayos, se discretizan las curvas por tramos, y se obtienen las curvas de tendencia lineales o polinómicas, dependiendo de la forma que tiene la curva en cada tramo en que se divide.

Luego, se calcula la curva suavizada para cada ensayo, evaluando el desplazamiento en la ecuación resultante de la discretización de la curva. Así, se obtiene la curva promedio para cada configuración de matriz y cuantía de fibra, tomando el promedio entre la carga aplicada

Este promedio se calcula sólo hasta la deflexión máxima en que se tienen tres datos para carga aplicada, de manera de promediar siempre tres resultados de ensayo. Las excepciones a este punto son las probetas que poseen otro tipo de falla (típicamente por adherencia), las cuales son descartadas al momento de obtener el promedio, debido a que alcanzan deflexiones mucho más bajas en comparación con las probetas que fallan por rotura de la fibra.

A continuación se muestran los gráficos para los distintos morteros y distinta cantidad de fibra.

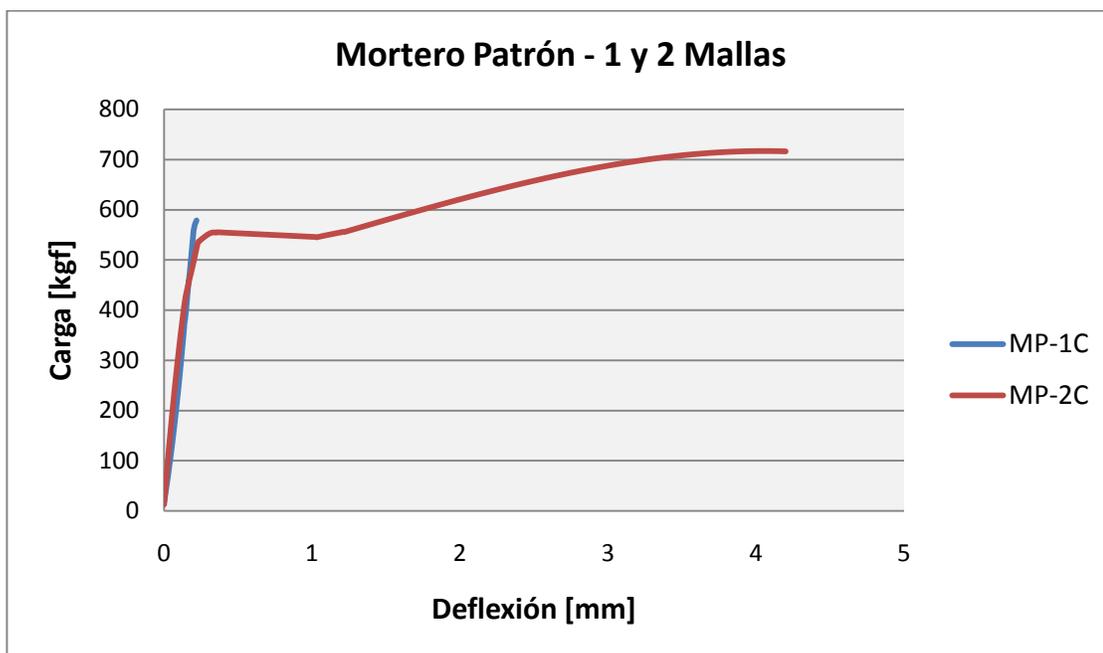


Figura 5.40: Curvas de ensayo suavizadas y promediadas para el Mortero Patrón

Tabla 5.9: Resumen de resultados de ensayo MP-1C y MP-2C

		MP-1C	MP-2C	Diferencia
Carga de Primera Fisura [kgf]	Pf	574	535	-7%
Carga Máxima [kgf]	Pmax	579	717	24%
Carga Última [kgf]	PU	579	712	23%
Momento Máximo [kN m]	Mmax	0,58	0,72	24%
Deflexión Máxima [mm]	dmax	0,25	4,51	1704%
Carga Máxima en el Compuesto [kgf]	PC	681	844	24%

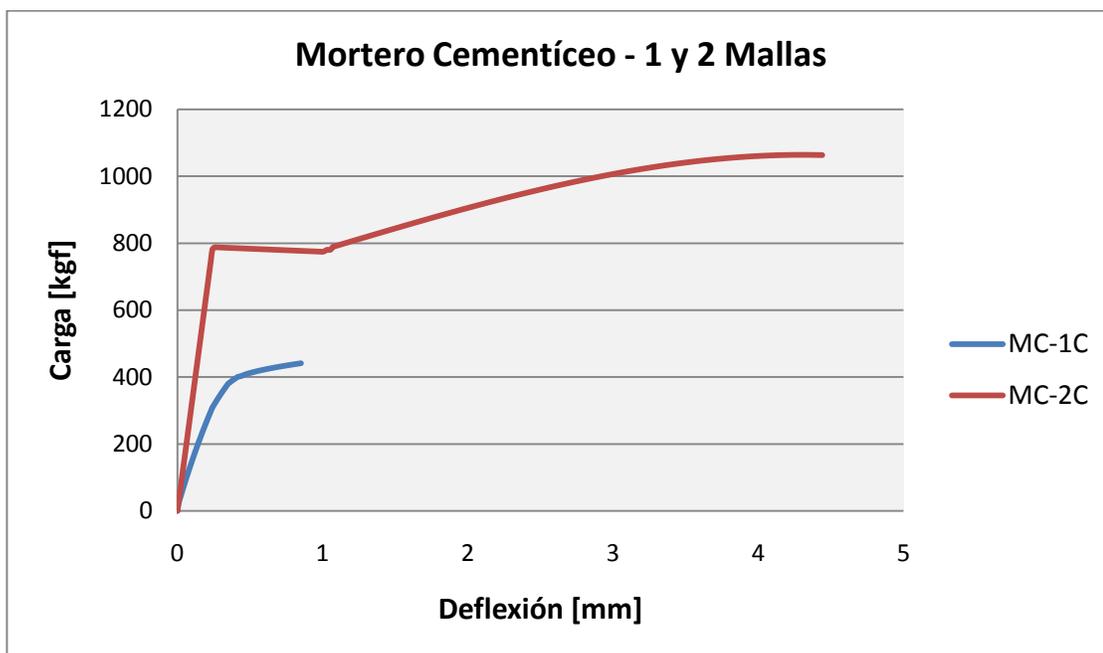


Figura 5.41: Curvas de ensayo suavizadas y promediadas. Mortero Cementicio

Tabla 5.10: Resumen de resultados de ensayo MC-1C y MC-2C

		MC-1C	MC-2C	Diferencia
Carga de Primera Fisura [kgf]	Pf	381	786	106%
Carga Máxima [kgf]	Pmax	442	1.064	141%
Carga Última [kgf]	PU	442	1.063	140%
Momento Máximo [kN m]	Mmax	0,44	1,06	141%
Deflexión Máxima [mm]	dmax	1,29	4,63	259%
Carga Máxima en el Compuesto [kgf]	PC	520	1.252	141%

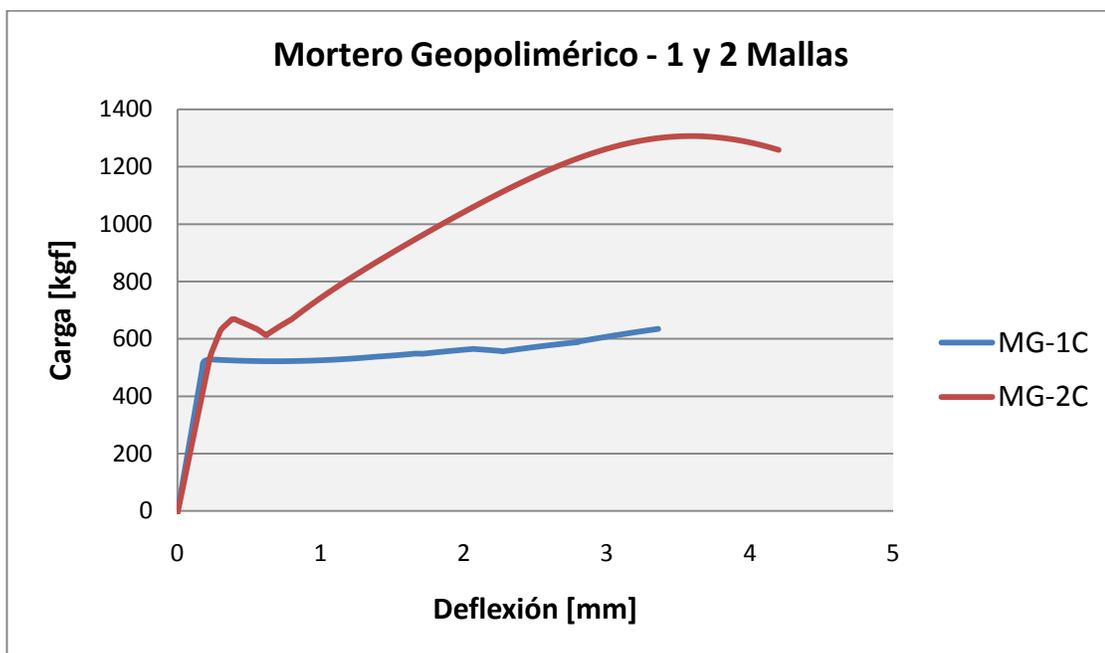


Figura 5.42: Curvas de ensayo suavizadas y promediadas. Mortero Geopolimérico

Tabla 5.11: Resumen de resultados de ensayo MG-1C y MG-2C

		MG-1C	MG-2C	Diferencia
Carga de Primera Fisura [kgf]	Pf	527	668	27%
Carga Máxima [kgf]	Pmax	635	1.306	106%
Carga Última [kgf]	PU	635	1.258	98%
Momento Máximo [kN m]	Mmax	0,64	1,31	106%
Deflexión Máxima [mm]	dmax	3,57	4,50	26%
Carga Máxima en el Compuesto [kgf]	PC	747	1.536	106%

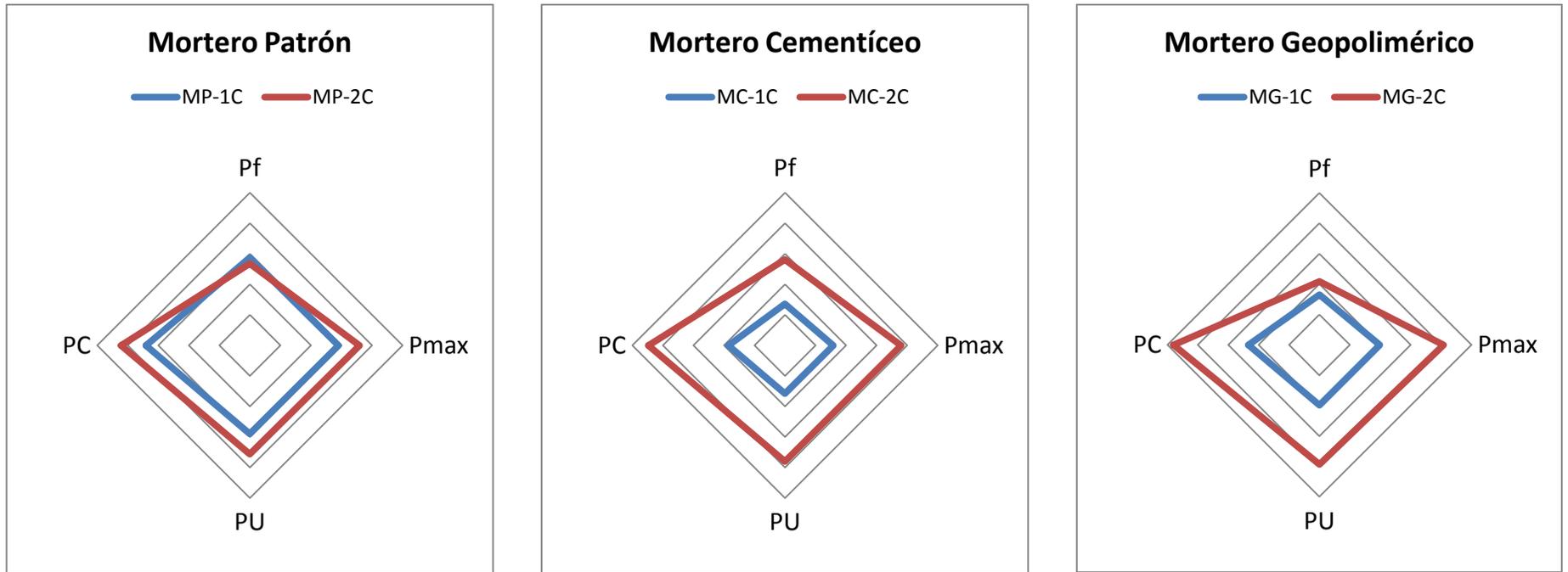


Figura 5.43: Representación cualitativa del comportamiento de los distintos morteros variando la cuantía de fibra

- Pf: Carga de Primera Fisura
- Pmax: Carga Máxima
- PU: Carga Última
- PC: Carga Máxima en el Compuesto

5.6.5. Comparación entre distintas matrices

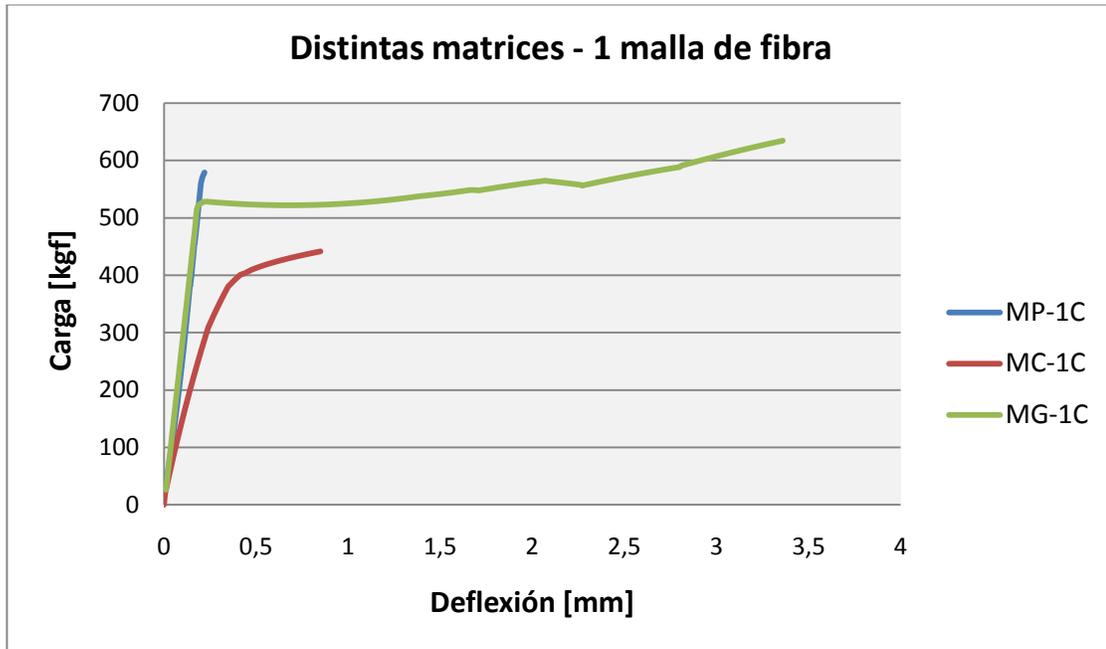


Figura 5.44: Curvas de ensayo suavizadas y promediadas para 1 malla de fibra y distintos morteros como matriz

Tabla 5.12: Resumen de resultados de ensayo MP-1C, MC-1C y MG-1C

		MP-1C	MC-1C	MG-1C
Carga de Primera Fisura [kgf]	Pf	574	381	527
Carga Máxima [kgf]	Pmax	579	442	635
Carga Última [kgf]	PU	579	442	635
Momento Máximo [kN m]	Mmax	0,58	0,44	0,64
Deflexión Máxima [mm]	dmax	0,25	1,29	3,57
Carga Máxima en el Compuesto [kgf]	PC	681	520	747

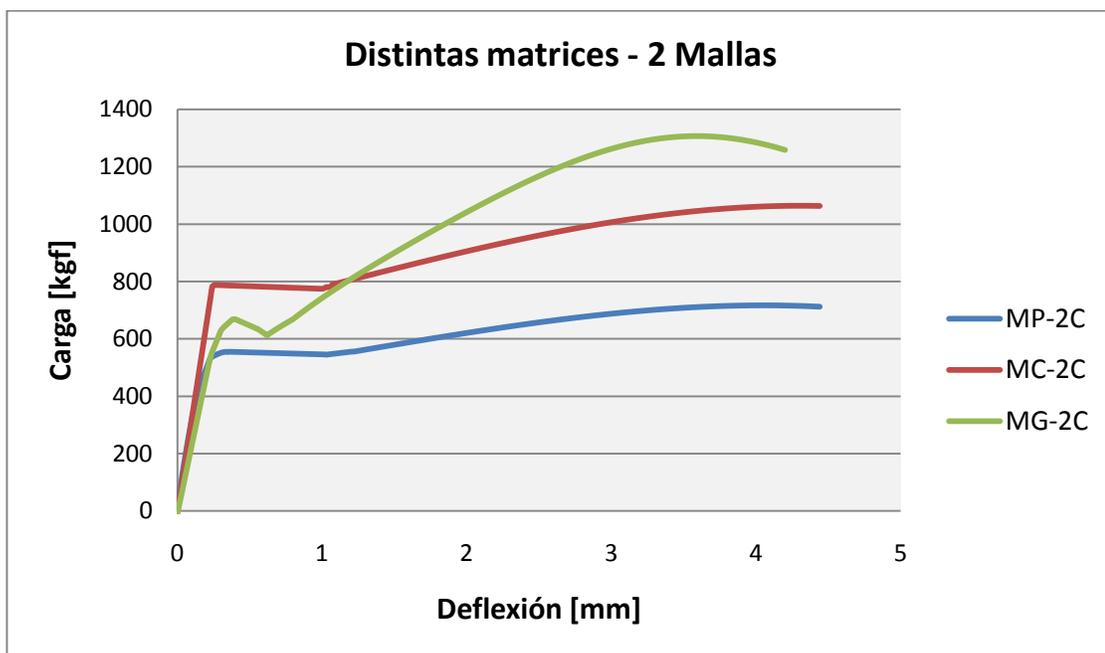


Figura 5.45: Curvas de ensayo suavizadas y promediadas para 2 mallas de fibra y distintos morteros como matriz

Tabla 5.13: Resumen de resultados de ensayo MP-2C, MC-2C y MG-2C

		MP-2C	MC-2C	MG-2C
Carga de Primera Fisura [kgf]	Pf	535	786	668
Carga Máxima [kgf]	Pmax	717	1.064	1.306
Carga Última [kgf]	PU	712	1.063	1.258
Momento Máximo [kN m]	Mmax	0,72	1,06	1,31
Deflexión Máxima [mm]	dmax	4,51	4,63	4,50
Carga Máxima en el Compuesto [kgf]	PC	844	1.252	1.536

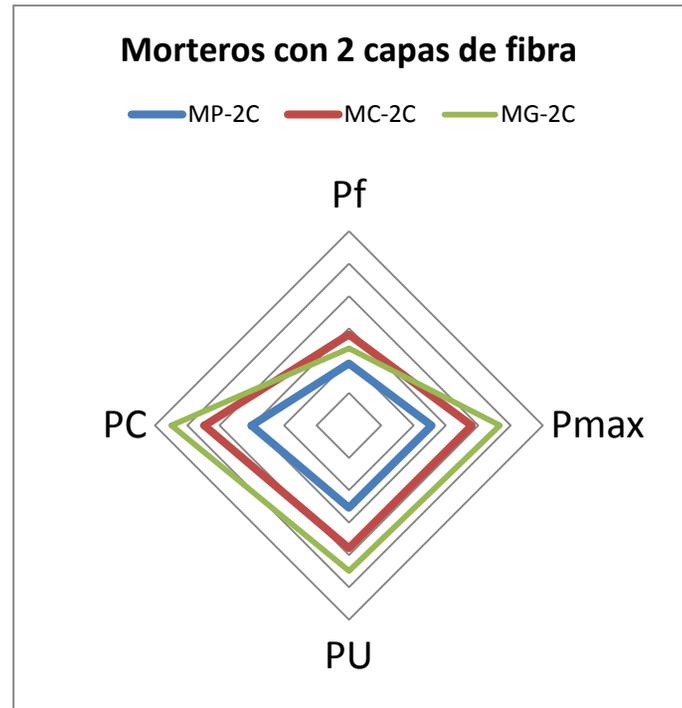
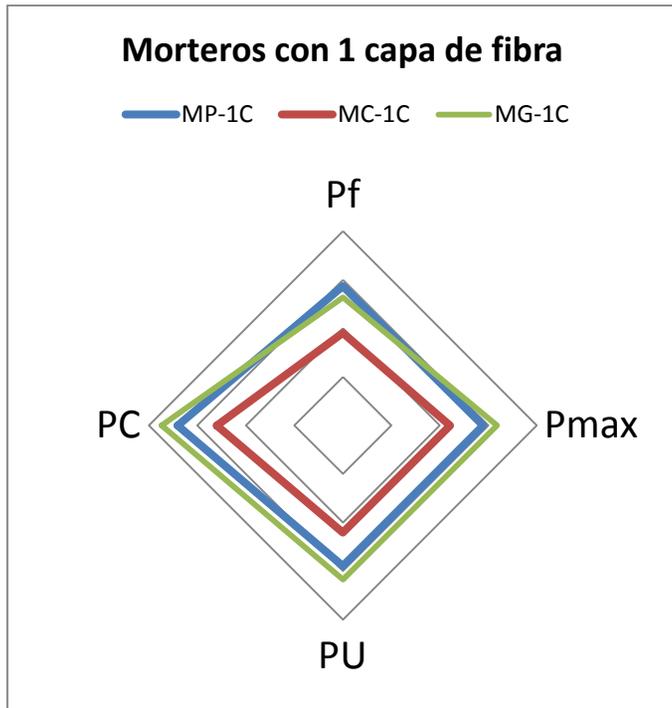


Figura 5.46: Representación cualitativa del desempeño de los distintos morteros

- Pf: Carga de Primera Fisuración
- Pmax: Carga Máxima
- PU: Carga Última
- PC: Carga Máxima en el Compuesto

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

Como en todo sistema compuesto, el desempeño de la solución de refuerzo y reparación FRCM desarrollada últimamente como alternativa a los sistemas tradicionales (FRP y placas de acero adheridas), está altamente influenciado por las características, propiedades y desempeño de sus materiales constituyentes. Estos materiales son la fibra de carbono y la matriz cementícea que hace las veces de soporte, adhesivo, recubrimiento y medio para transferir cargas entre el refuerzo (compuesto) y el elemento reforzado.

En este estudio, la fibra utilizada (malla de fibra de carbono C-NET 170) se mantiene como refuerzo único, mientras que la matriz cementícea varía fundamentalmente en el tipo de material cementíceo utilizado: cementos portland puzolánicos modificados con polímero y geopolímero.

Para el caso del mortero patrón, el comportamiento en estado fresco da cuenta de un mortero fluido, altamente tixotrópico, y con un tiempo abierto bastante amplio, que permite realizar el trabajo de reparación sin inconvenientes. De los morteros diseñados en esta memoria, el mortero cementíceo posee una muy alta fluidez inicial, la cual se ve fuertemente disminuida a los pocos minutos debido al alto contenido de cemento utilizado. Por otro lado, para el mortero geopolimérico se obtiene una matriz de consistencia menos fluida que las anteriores, con un tiempo abierto similar al del mortero patrón.

En cuanto a las resistencias mecánicas observadas, el mortero cementíceo es el que presenta las mayores resistencias tanto a compresión como a flexión, explicadas por sus características de composición que incluyen aditivos reductores de agua, microsílíce y látex polimérico. Para el caso del mortero geopolimérico, se logran menores resistencias, pero debido al proceso de curado (80°C durante 24 hrs.) la ganancia de resistencia es bastante rápida, obteniendo el 94% de su resistencia a compresión a 28 días a los 7 días de edad.

De los ensayos de flexión en vigas whest reforzadas con el sistema FRCM, se puede observar que para el mortero patrón con una malla de fibra, la falla ocurre luego de un proceso de deformación casi 100% lineal, lo que da cuenta de la fragilidad del sistema para esta solución. Sin embargo, para las matrices cementícea y geopolimérica con una malla de refuerzo, se observa una ganancia de resistencia y deformación luego de alcanzado el punto de fisuración de la matriz, otorgando ductilidad y absorción de energía a esta solución de refuerzo y reparación.

La situación de fragilidad y de poca deformación cambia considerablemente al incorporar una segunda malla de fibra a la solución. En efecto, al incorporar una segunda malla de fibra se produce un material compuesto mucho más flexible, capaz de

proveer aumento de resistencia mecánica sobre un 100%, y de deformación máxima por sobre el 1000%, con respecto a la solución con una malla de fibra. El límite de fisuración del material compuesto está determinado por la aparición de la primera fisura en la matriz cementícea. Para la solución con una malla de fibra, la capacidad de resistir carga y/o absorber energía luego de ese punto es considerablemente menor que la capacidad que posee la solución con dos mallas de fibra, debido a la alta capacidad de la fibra de carbono para resistir esfuerzos de tracción.

Así, para el caso de soluciones que no requieran de gran ductilidad y que quedarán sometidas a cargas estáticas como elementos no estructurales o arquitectónicos, sería suficiente el uso de sólo una malla de fibra, a fin de disminuir los costos de la solución de refuerzo. Por el contrario, para elementos que requieran recuperar resistencia y ductilidad, como pilares, muros, vigas de marcos, arriostramientos, fundaciones, pedestales, etc., el comportamiento dúctil y la capacidad de absorber energía y daño sísmico toma vital importancia en el diseño, por lo que la solución con dos mallas de fibra o más sería la que se imponga según el nivel de seguridad requerido.

Por otro lado, en el caso de la serie de vigas MP-1C y MC-1C reforzadas con mortero patrón y mortero cementíceo respectivamente y con una malla de fibra, se observó que por un secamiento prematuro del refuerzo se generó fisuración en el plano de la unión refuerzo/viga, lo que después se vio reflejado en la falla por adherencia de algunas de estas vigas en los ensayos de flexión.

Por esto, se recomienda poner especial atención al proceso de curado del sistema de refuerzo en el caso de utilizar matrices en base a cemento, especialmente si se trata de morteros con alto potencial de retracción.

Cabe destacar que este efecto se ve disminuido cuando el refuerzo incluye dos mallas de fibra. Esto explica aun más el efecto de deslaminación que se produce en los extremos de las vigas, ya que al estar la malla más cercana al plano de unión con respecto al eje central del refuerzo, esto hace que la tendencia a la deslaminación que se genera por la retracción de secado sea equilibrado por el mismo refuerzo interno otorgado por la malla.

En cuanto al comportamiento observado en los ensayos estándar a tracción de los distintos FRCM estudiados, se puede observar que la carga de fisuración de los morteros corresponde entre un 50% - 60% de su carga última. A partir de ese punto, se produce una gran disminución en la carga que resiste el compuesto, y se observa un notorio deslizamiento entre fibra y matriz.

En términos de ductilidad, se observa que la solución que mayor elongación genera es la solución con mortero geopolimérico, y la más frágil aquella con el mortero cementíceo, encontrándose en un caso intermedio la solución con mortero patrón.

Al evaluar la adherencia de los distintos morteros, se observa que sólo para el caso de los morteros patrón y cementíceo se alcanza niveles de falla por adherencia. Sin embargo, lo más recurrente en este ensayo es que la forma de falla corresponde ya sea por rotura del recubrimiento o por rotura del sustrato. De las matrices estudiadas, se observa que la mayor adherencia la presenta la solución con mortero geopolimérico, seguido por la solución con mortero cementíceo y luego la solución con mortero patrón, independiente de su modo de falla.

Considerando el desempeño de las distintas soluciones en forma integral, se concluye que el mortero geopolimérico posee un mayor potencial como matriz cementícea del sistema FRCM, que amerita mayor investigación. Un aspecto que toma especial relevancia es su carácter sustentable, al ser un producto que se obtiene principalmente a partir de materiales de desecho (ceniza volante, escoria, entre otros). Sin embargo, una limitación importante sería la necesidad de introducir tratamiento térmico en el proceso de curado, para suplir su baja resistencia mecánica a edades tempranas, sobre todo en condiciones de temperatura ambiente.

CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA

1. AC434, “Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening Using Fiber-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Systems”, 2011.
2. Alboreda D., “Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites for Infrastructure Strengthening and Rehabilitation: Characterization Methods”, 2014.
3. Alboreda D.; Loreto G.; De Luca A.; Nanni A., “Material Characterization of Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Laminates”, 2012.
4. Aldea M., “Thin Fiber and Textile Reinforced Cementitious Systems”, American Concrete Institute, 2007.
5. Balaguru P.N., “Geopolymer for Repair and Rehabilitation of Reinforced Concrete Beams”, 1997.
6. Banholzer B., “Bond Behavior of a Multi-Filament Yarn Embedded in a Cementitious Matrix”, 2004.
7. Bentur & Mindess, “Fibre Reinforced Cementitious Composites”, 2007.
8. Berardi F.; Focacci F.; Mantegazza G.; Miceli G., “Rinforzo di un viadotto ferroviario con PBO-FRCM”, 2011.
9. Bisby L.; Stratford T.; Smith J.; Halpin S., “Comparative Performance of Fibre Reinforced Plymer and Fibre Reinforced Cementitious Mortar Strengthening Systems in Elevated Temperature Service Environments”, 2010.
10. Blanksvärd T.; Täljsten B.; Orosz K., “Strengthening of Concrete Beams in Shear with Mineral Based Composites Laboratory Tests and Theory”, 2006
11. Colajanni P.; Di Trapani F.; Fossetti M.; Macaluso G.; Papia M. “Cyclic Axial Testing of Columns Confined with Fiber Reinforced Cementitious Matrix”, 2012.
12. De Caso y Basalo F; Matta F.; Nanni A, “Fiber Reinforced Cementitious Matrix Composites for Infrastructure Rehabilitation”, 2009.
13. Díaz P., “Estudio de Factibilidad de Obtención de Hormigones Geopoliméricos a Partir de Desechos Minerales”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, 2012.

14. Dubey A., "Textile-Reinforced Concrete", American Concrete Institute, 2008.
15. Hardjito D.; Rangan B. V., "Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete", 2005.
16. Mindess S.; Young J.F.; Darwin D., "Concrete", 2003.
17. Lavelle J. A., "Acrylic latex-modified Portland cement". ACI Material Journal 85, 1988.
18. Nanni A., "Concrete Repair with Externally Bonded FRP Reinforcement" Concrete International, V17, No 6, 1995, pp. 22-26.
19. Nanni A., "Carbon FRP Strengthening: New Technology Becomes Mainstream" Concrete International, V19, No 6, 1997, pp. 19-23
20. Nanni A., "A New Tool for Concrete and Masonry Repair", 2012.
21. NCh 148 Of 68, "Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales", Instituto Nacional de Normalización, 1968.
22. NCh 158 Of 67, "Cementos – Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento", Instituto Nacional de Normalización, 1968.
23. NCh 163 Of 79, "Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales", Instituto Nacional de Normalización, 1979.
24. NCh 165 Of 77, "Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría", Instituto Nacional de Normalización, 1977.
25. NCh 1018 Of 75, "Hormigón – Preparación de mezclas de prueba en laboratorio", Instituto Nacional de Normalización, 1975.
26. NCh 1498 Of 77, "Hormigón – Agua de amasado – Requisitos", Instituto Nacional de Normalización, 1977.
27. NCh 2257 Of 96, "Morteros – Determinación de la consistencia – Parte 1: Método del extendido en la mesa de sacudidas", Instituto Nacional de Normalización, 1996.
28. NCh 2471 Of 2000, "Morteros – Ensayo de adherencia – Método de tracción directa", Instituto Nacional de Normalización, 2000.

29. Kolsch H., "Carbon Fiber Cement Matrix (CFCM) Overlay System for Masonry Strengthening", 1998.
30. Ohama Y., "Handbook of polymer-modified concrete and mortars. Properties and process technology.", 1995.
31. Ombres L., "Flexural Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened With a Cement Based High Strength Composite Material", 2011.
32. Ortlepp R.; Ortlepp S.; Curbach M.; "Stress Transfer in the Bond Joint of Subsequently Applied Textile Reinforced Concrete Strengthening", 2004.
33. Triantafillou T.; Papanicolau C.; Zissinopoulos P.; Laourdekis T., "Concrete Confinement with Textile-Reinforced Mortar Jackets", ACI Structural Journal, V103, No 1, 2006, pp 28-37.
34. Triantafillou T.; Papanicolau C., "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Members with Textile Reinforced Mortar (TRM) Jackets", Materials and Structures, V39, No1, 2006, pp. 93-103.
35. Vijaya Rangan B., "Geopolymer concrete for environmental protection", 2014.
36. Wiberg A., "Strengthening of Concrete Beams Using Cementitious Carbon Fibre Composite", 2003.
37. Wu HC.; Sun P., "Fiber Reinforced Cement Based Composite Sheets for Structural Retrofit", 2005.

ANEXO A: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PRELIMINARES A LOS MORTEROS

A.1. RESULTADOS ENSAYOS MORTERO PATRÓN

Tabla A.1: Resultados ensayos a 7 y 28 días Mortero Patrón

Mortero MP			
N°	Edad	7 días	
		Flexión kN	Compresión kN
1	2,653	53,8	54,4
2	2,486	54,2	54
3	2,478	55,5	55,4
R [kgf/cm²]		61	348
N°	Edad	28 días	
		Flexión kN	Compresión kN
1	3,026	77,6	77,1
2	3,144	76,1	76,7
3	3,34	76,6	77,7
R [kgf/cm²]		76	491

A.2. RESULTADOS ENSAYOS MORTERO CEMENTÍCEO

Tabla A.2: Resultados ensayos a 3 días para mortero cementíceo sin desaireante

P/C	Flexión [kN]	Flexión [kgf/cm ²]	Compresión [kN]		Compresión [kgf/cm ²]
			1	2	
0	3,490	82	82,2	81,7	522
	3,403		80,9	82,9	
0,05	2,219	52	34	32,8	213
	2,180		32,9	34,1	
0,1	1,428	36	21,03	21,82	129
	1,603		19,82	18,01	
0,15	1,397	35	17,46	17,19	110
	1,499		17,72	16,8	
0,2	1,372	33	14,67	14,69	94
	1,38		15,23	14,12	
0,5	0,2878	7	2,78	2,01	17
	0,2976		2,91	3,01	

Tabla A.3: Resultados ensayos a 7 días para mortero cementíceo sin desaireante

P/C	Flexión [kN]	Flexión [kgf/cm ²]	Compresión [kN]		Compresión [kgf/cm ²]
			1	2	
0	3,884	92	103,9	100,4	642
	3,807		100,1	98,7	
0,05	2,500	61	44,8	46,3	280
	2,631		44,1	40,6	
0,1	1,913	44	28,3	28,9	179
	1,782		26,4	28,9	
0,15	1,725	42	23,3	21,6	152
	1,814		25,0	25,5	
0,2	1,801	41	20,05	20,01	127
	1,645		19,90	19,53	
0,5	0,4656	11	4,11	4,12	25
	0,4186		3,76	3,55	

Tabla A.4: Resultados ensayos a 3 días para mortero cementíceo con desaireante

P/C	Flexión [kN]	Flexión [kgf/cm ²]	Compresión [kN]		Compresión [kgf/cm ²]
			1	2	
0	2,447	57	70,2	71,3	446
	2,361		68,7	69,6	
0,03	2,982	70	66	67,4	425
	2,901		65,9	67,1	
0,05	2,731	63	48,9	49,5	333
	2,582		55,5	54,9	
0,1	2,401	57	41,2	40,8	267
	2,379		42,6	43,1	

Tabla A.5: Resultados ensayos a 7 días para mortero cementíceo con desaireante

P/C	Flexión [kN]	Flexión [kgf/cm ²]	Compresión [kN]		Compresión [kgf/cm ²]
			1	2	
0	3,699	76	89,5	95,8	589
	2,686		92,3	91,8	
0,03	2,942	70	89,9	87,6	565
	2,946		87	90	
0,05	2,837	68	72,9	73,1	460
	2,83		71,6	71	
0,1	2,968	66	59,3	59,3	374
	2,584		59,5	56,8	

Tabla A.6: Resultados ensayos a 7 y 28 días Mortero Cementíceo

Mortero MC			
N°	Edad	7 días	
		Flexión kN	Compresión Kn
1	2,942	89,9	87,6
2	2,946	87	90
3	-	-	-
R [kgf/cm²]	70	565	
Mortero MC			
N°	Edad	28 días	
		Flexión kN	Compresión Kn
1	3,634	96,4	103,9
2	4,473	107,1	100,5
3	3,631	98,6	101,9
R [kgf/cm²]	97	650	

A.3. RESULTADOS ENSAYOS MORTERO GEOPOLIMÉRICO

Tabla A.7: Resultados ensayos a 3 días variando el contenido de agua adicional para mortero geopolimérico

Agua adicional [%]	Flexión [kN]	Flexión [kgf/cm ²]	Compresión [kN]		Compresión [kgf/cm ²]
			1	2	
5	0,0552	1,4	2,22	2,3	14
	0,0613		2,14	2,15	
10	0,0141	0,3	1,98	1,9	12
	0,0152		1,92	1,88	
15	0,012	0,3	1,72	1,7	11
	0,011		1,68	1,7	

Tabla A.8: Resultados ensayos a 7 días variando el contenido de agua adicional para mortero geopolimérico

Agua adicional [%]	Flexión [kN]	Flexión [kgf/cm ²]	Compresión [kN]		Compresión [kgf/cm ²]
			1	2	
5	0,2728	6,6	3,87	3,82	25
	0,2773		3,9	3,92	
10	0,2319	5,5	3,1	3,12	20
	0,2323		3,05	3,1	
15	0,2089	5,0	2,5	2,58	16
	0,2074		2,58	2,66	

Tabla A.9: Resultados ensayos a 3 días variando la temperatura de curado para mortero geopolimérico

Temperatura de curado [°C]	Flexión [kN]	Flexión [kgf/cm ²]	Compresión [kN]		Compresión [kgf/cm ²]
			1	2	
20	0,012	0,3	1,72	1,68	11
	0,011		1,70	1,73	
40	0,872	21	13,02	13,97	83
	0,867		12,24	12,68	
80	2,600	65	29,99	26,29	183
	2,863		29,58	29,2	

Tabla A.10: Resultados ensayos a 7 días variando la temperatura de curado para mortero geopolimérico

Temperatura de curado [°C]	Flexión [kN]	Flexión [kgf/cm ²]	Compresión [kN]		Compresión [kgf/cm ²]
			1	2	
20	0,2089	5	2,5	2,58	16
	0,2074		2,66	2,58	
40	1,287	31	14,99	14,16	89
	1,302		13,15	13,8	
80	3,254	74	29,83	31,65	196
	2,96		31,27	30,29	

Tabla A.11: Resultados ensayos a 3 días variando la concentración molar de la solución NaOH para mortero geopolimérico

Concentración Molar [M]	Flexión [kN]	Flexión [kgf/cm ²]	Compresión [kN]		Compresión [kgf/cm ²]
			1	2	
10	2,191	52	27,8	26,3	146
	2,179		18,00	19,20	
14	2,218	53	33,4	35,5	220
	2,184		34,3	35,1	
16	2,593	62	48,3	49,1	310
	2,617		47,9	49,1	

Tabla A.12: Resultados ensayos a 7 días variando la concentración molar de la solución NaOH para mortero geopolimérico

Concentración Molar [M]	Flexión [kN]	Flexión [kgf/cm ²]	Compresión [kN]		Compresión [kgf/cm ²]
			1	2	
10	2,338	54	25,8	25,9	175
	2,22		31	27,4	
14	2,392	55	34,5	35,7	234
	2,234		37,7	39	
16	2,779	64	51,2	51,5	329
	2,62		51,7	52	

Tabla A.13: Resultados ensayos a 7 y 28 días Mortero Geopolimérico

Mortero MG			
N°	Edad	7 días	
	Flexión kN	Compresión kN	
1	2,779	51,2	51,5
2	2,62	51,7	52
3	-	-	-
R [kgf/cm²]	64	329	
N°	Edad	28 días	
	Flexión kN	Compresión kN	
1	3,21	55,9	55,1
2	3,634	53,5	53
3	3,09	56,3	56
R [kgf/cm²]	82	347	

ANEXO B: ELABORACIÓN DE VIGUETAS

B.1. Preparación de moldajes para las vigas de ensayo

Para la construcción de los moldajes se utiliza madera contrachapada para moldajes de hormigón, las cuales son atornilladas y fijadas de manera de asegurar su correcta posición en la etapa de hormigonado de las probetas.

Para materializar el inductor de falla, se usa una Geomembrana de Polietileno (HDPE) de 1,5 [mm] de espesor, así, para lograr el espesor requerido se usan dos capas de este material, el cual se fija a los paneles laterales del moldaje.

Por otro lado, para dejar el espacio para luego instalar las rótulas de acero, se deja un trozo de madera de las dimensiones requeridas y especificadas, de manera de dejar un receso en el hormigón y así, una vez endurecido, instalar la rótula metálica en este espacio asegurándola con resina epóxica.

Para evitar que los cantos de la madera y la madera misma absorban agua de amasado, se le aplica una capa de barniz de manera de impermeabilizar los bordes y para facilitar en parte el proceso de descimbre.

Finalmente, para evitar que se pierda agua por las uniones de las placas, se le aplica silicona a estas uniones para impermeabilizar 100% el moldaje para las vigas de hormigón.



Figura B.1: Vista lateral moldajes



Figura B.2: Vista frontal moldajes



Figura B.3: Vista interior moldaje

B.2. Hormigón

Para asegurar la correcta colocación del hormigón en las vigas de ensayo, se requiere que éste sea fluido, de alta trabajabilidad para facilitar el vibrado (asentamiento de cono 20 ± 3 [cm]), con áridos pequeños (tamaño máximo nominal menor a 20 [mm]) para evitar nidos de piedras, y con una curva granulométrica amplia para evitar la segregación y asegurarse que todos los espacios queden cubiertos y sean llenados por áridos y aglomerados por la pasta de cemento.

Debido al volumen de materiales utilizados, y a la capacidad y disponibilidad propia del laboratorio, se realizan 4 amasadas, para 5 vigas de ensayo cada una, y 4 cubos que se ensayan a 7 y 28 días, como probetas de control (2 cubos por cada edad de ensayo).

B.2.1. Materiales

- Cemento:

El cemento utilizado es de Clasificación Portland Puzolánco y Grado Alta Resistencia según la norma NCh 148 Of 68, y su marca comercial es *Melón Extra – Alta Resistencia*.

Las características técnicas se muestran a continuación en la Tabla B.1.

Tabla B.1: Características técnicas del cemento para vigas²⁰

Variable de control	
Fraguado Inicial [min]	100
Fraguado Final [min]	150
Superficie Específica Blaine [cm²/g]	5.000
Peso específico [g/dm³]	2,95
Resistencia a Compresión [kgf/cm²]	
7 días	440
28 días	540
Resistencia a Flexotracción [kg/cm²]	
7 días	65
28 días	75
Pérdida por Calcinación [%]	2,0
Residuo Insoluble [%]	12

²⁰ Datos obtenidos de catálogo Cementos Melón. www.melon.cl

- **Áridos:**

Para asegurar una correcta graduación de los áridos, y facilitar el proceso de dosificación, se usan áridos separados en 3 fracciones, correspondientes a *gravilla*, *arena gruesa* y *arena fina*, cumpliendo cada una de estas fracciones con los requisitos para ser usados en morteros y hormigones según la norma NCh 163 Of 79.

Estos áridos se almacenan en recipientes estancos, y tapados, para evitar cualquier contaminación o pérdida. Además, para obtener la misma relación A/C para cada amasada (y para obtener hormigones lo más homogéneamente posible) se hacen las correcciones por humedad y por absorción de agua correspondientes a cada una de las fracciones de los áridos, según el estado de humedad de cada árido para cada amasada.

A continuación, en la Tabla 4.2 se muestran las características físicas de los áridos utilizados en la confección de hormigones.

Tabla B.2: Características físicas de los áridos utilizados en la confección de hormigón para las vigas de ensayo

Fracción de Árido	Gravilla
Procedencia	Río Maipo
Contenido de Material Fino Menor a 0,080 [mm]	0,2%
Densidad Real Seca [kg/m ³]	2.694
Densidad Real SSS [kg/m ³]	2.719
Densidad Neta [kg/m ³]	2.762
Absorción de Agua	0,92%
Densidad Aparente Suelta [kg/m ³]	1.523
Densidad Aparente Compactada [kg/m ³]	1.649
Huecos [%]	43,5
Fracción de Árido	
Fracción de Árido	Arena Gruesa
Procedencia	Río Maipo
Contenido de Material Fino Menor a 0,080 [mm]	3,1%
Densidad Real Seca [kg/m ³]	2.657
Densidad Real SSS [kg/m ³]	2.699
Densidad Neta [kg/m ³]	2.775
Absorción de Agua	1,60%
Densidad Aparente Suelta [kg/m ³]	1.721
Densidad Aparente Compactada [kg/m ³]	1.853
Huecos [%]	35,2
Fracción de Árido	
Fracción de Árido	Arena Fina
Procedencia	Duna Concón
Contenido de Material Fino Menor a 0,080 [mm]	0,5
Densidad Real Seca [kg/m ³]	2.592
Densidad Real SSS [kg/m ³]	2.629
Densidad Neta [kg/m ³]	2.691
Absorción de Agua	1,42%
Densidad Aparente Suelta [kg/m ³]	1.343
Densidad Aparente Compactada [kg/m ³]	1.482
Huecos [%]	48,2

Para asegurar la correcta colocación y terminación del hormigón, se utiliza una granulometría bien graduada y con gran cantidad de árido fino.

Se determina la granulometría de cada fracción de árido por separado, en concordancia con la norma NCh 165 Of 77.

En la Tabla B.3 y en la Figura B.4, se muestra la granulometría en porcentajes, junto con el módulo de finura y de forma gráfica, respectivamente.

Tabla B.3: Granulometría de áridos utilizados en la confección de las vigas de ensayo

Tamaño [mm]	Porcentaje que pasa			
	Gravilla 19 mm	Arena Gruesa 4 mm	Arena Fina	Árido Combinado (*)
25,0	100%	100%	100%	100%
19,0	98%	100%	100%	100%
12,5	72%	100%	100%	92%
9,5	41%	100%	100%	86%
4,8	6%	86%	100%	69%
2,36	1%	64%	100%	55%
1,18	0%	46%	100%	47%
0,6	0%	31%	100%	39%
0,315	0%	16%	97%	31%
0,15	0%	6%	21%	7%
Módulo de Finura	6,54	3,10	0,82	3,66
(*) 24% (Gravilla) + 52% (Arena Gruesa) + 24% (Arena Fina)				

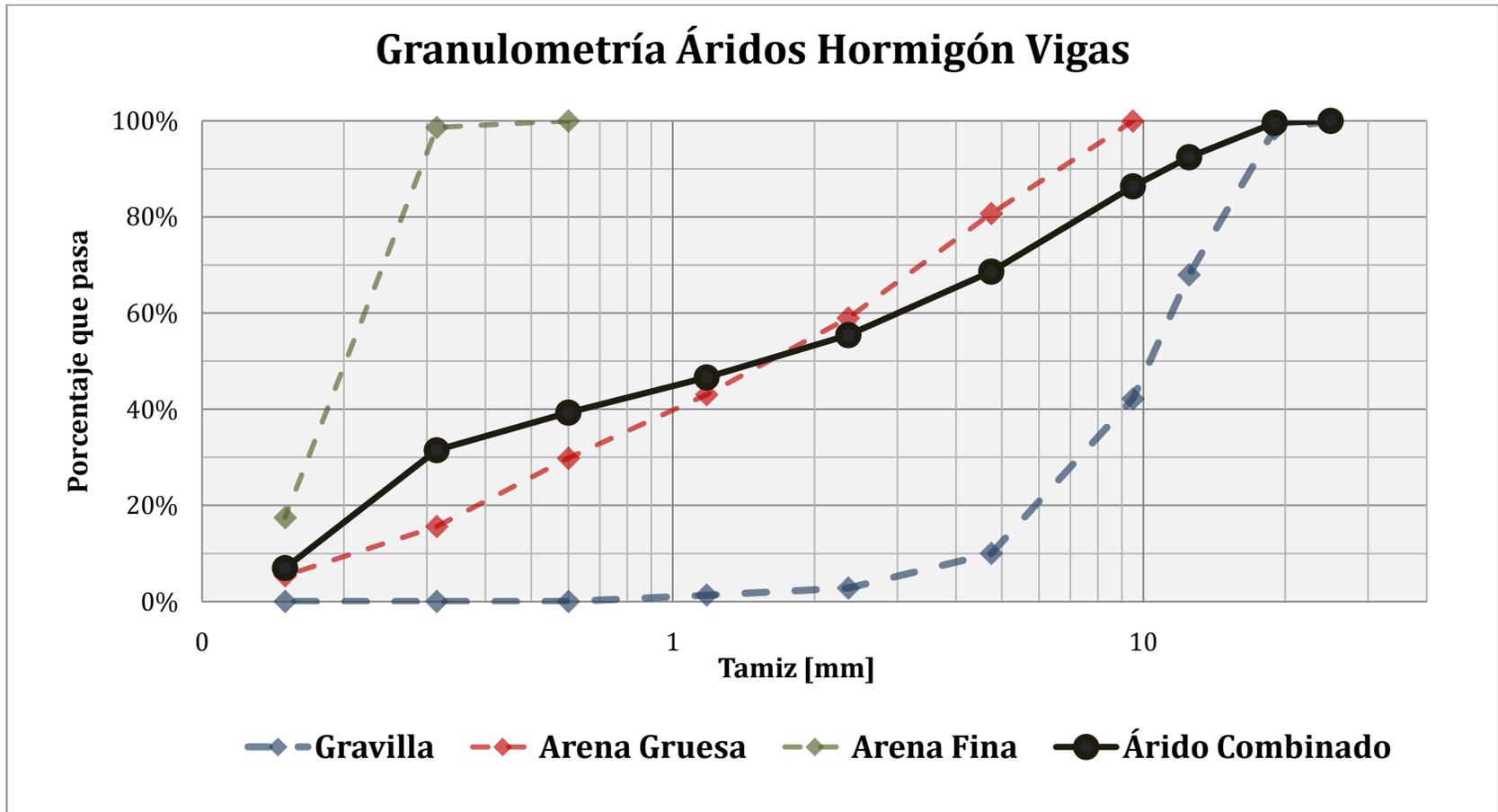


Figura B.4: Granulometría de áridos utilizados en la confección de las vigas de ensayo

- **Agua:**

El agua utilizada corresponde a Agua Potable, y se usa en un rango de temperatura de 20 ± 3 °C. Cumple además con los requisitos para ser utilizada en amasado de morteros y hormigones, según la norma NCh 1498 Of 82.

- **Aditivo Superplastificante:**

Para asegurar la trabajabilidad del hormigón antes mencionada, sin aumentar la relación A/C, se utiliza un Aditivo Superplastificante de de marca comercial *Viscocrete 20 HE*, de la empresa *Sika*, en una dosis de 1% del peso de cemento.

Este aditivo, es de Tipo Policarboxilato modificado en base acuosa, de consistencia poco viscosa y color miel. Posee una densidad igual a $1,085$ [g/cm³], contenido de sólidos de aprox. 40% y ph de aprox. 4,5.²¹

En la Figura B.5, se muestran los materiales utilizados en la confección de las vigas de ensayo.



Figura B.5: Materiales utilizados para hormigón de vigas de ensayo

²¹ Datos obtenidos de la ficha técnica del producto: chl.sika.com

B.2.2 . Dosificación

La dosificación utilizada para el hormigón de las vigas se adjunta en la Tabla B.4.

Tabla B.4: Dosificación para las vigas de hormigón

Material	Símbolo	Peso [kg/m ³]
Cemento	C	450
Agua	A	180
Aire	a	0
Gravilla	G ₂₀	400
Arena gruesa	F _G	900
Arena fina	F _F	400
Aditivo superplastificante	Ad	4,5

B.2.3. Preparación, confección y curado de muestras

- Preparación:

La preparación del hormigón se lleva a cabo según la norma NCh 1018 Of 77. Para esto, se utiliza un mezclador mecánico de eje inclinado basculante, con una capacidad máxima aproximada de 150 [L].

Los pasos seguidos se listan a continuación:

- Homogeneización y pesado de los materiales
 - El cemento se homogeniza y se tamiza por el tamiz de 1,25 mm, para eliminar posibles grumos, y se pesa.
 - Los áridos se homogenizan las 3 fracciones por separado en estado húmedo, y se pesan.
 - Se pesa el Aditivo Superplastificante.
 - Se pesa un 80% del agua requerida y se diluye en ella el Aditivo Superplastificante.

- Mezclado
 - Se mezcla el cemento, junto con la arena gruesa y fina, hasta obtener una mezcla homogénea.
 - Se agrega la gravilla a la mezcla, hasta que ésta sea homogénea.
 - Se agrega el 80% del agua requerida, junto con el aditivo superplastificante.
 - Se mide el asentamiento de cono. Si no se cumple con el cono de diseño, se agrega agua en pequeñas dosis hasta obtener el cono de diseño.
 - Se mezcla durante 5 [min].

- **Confección:**

La confección de las vigas de hormigón se lleva a cabo según la norma NCh 1018 Of 75. El procedimiento se detalla a continuación:

- Una vez alcanzado el cono de diseño se llenan los moldes de las vigas con una capa de hormigón (Figura B.6).
- Se compacta mediante un vibrador externo (mesa vibradora) durante 60 [s], con el fin de eliminar el aire contenido, y de asegurar la correcta colocación del hormigón.
- Se enrasa la superficie y se etiquetan las probetas (Figura B.7).
- Como probetas de control, se confeccionan 4 cubos para determinar la resistencia a compresión a 7 y 28 días, siguiendo el mismo procedimiento anterior. (Figura B.8)



Figura B.6: Llenado de moldes de vigas



Figura B.7: Enrase de las probetas



Figura B.8: Confección de 4 cubos como probetas de control para cada amasada

- Curado:

El curado se realiza según la norma NCh 1017 Of 75.

Para el curado inicial de 24 [hrs.], se cubre la superficie con láminas de material impermeable y se protegen mediante aspilleras húmedas.

Para el curado de las probetas desmoldadas, se sumergen en agua tranquila y saturada con cal entre 17 °C y 23 °C.

B.2.4. Desmolde de las vigas de ensayo

- Desmolde:

Entre 3 a 4 días luego de la confección del hormigón, se procede al desmolde de las vigas. Para esto, se desarma el molde por todas sus caras y se retira el trozo de madera utilizado para materializar la rótula.

Al llevar a cabo el desmolde, se puede observar que debido al inductor de falla, se ha pre-fracturado la probeta en 2 por la concentración de tensiones que se generan por la presencia del inductor en la sección crítica. Esto introduce una etapa de reparación mediante adhesivo epóxico (Figura B.9).

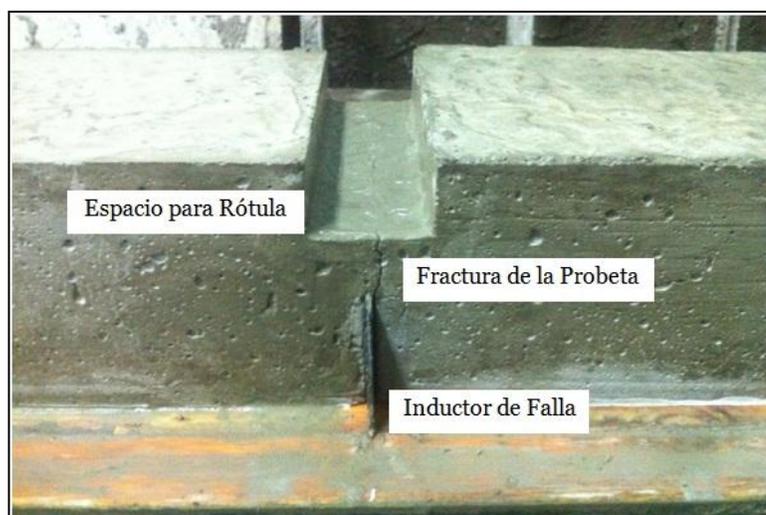


Figura B.9: Desmolde de vigas de ensayo

- Reparación de las vigas de ensayo

Luego del desmolde de la viga, se etiquetan ambas partes con las identificaciones A_i y B_i , donde “A” o “B” denotan qué mitad de la viga corresponde e “i” denota el número de la viga, en orden ascendiente desde su confección, yendo de 1 a 20.

A continuación, para restituir y asegurar la integridad estructural de las vigas de ensayo, se adhieren ambas partes de éstas utilizando el producto epóxico de 2 componentes *Sikadur 32 Gel*, de la empresa *Sika*.

Antes de aplicar dicho producto, las superficies de hormigón a pegar son limpiadas del polvo con aire comprimido, posteriormente se elimina la lechada superficial y las partes sueltas mediante escobilla de acero y finalmente se limpia todo con aire comprimido y se lava con agua.



Figura B.10: Superficie de las vigas antes de ser reparadas

La superficie se deja secar, y se aplica una capa de aproximadamente 2 [mm] de adhesivo epóxico a ambas superficies. A continuación se dispone verticalmente la viga, para asegurar una presión uniforme en toda el área de pegado sobre en una superficie horizontal. (Figura B.11). Cada cierto tiempo se asegura el plomo de la viga, con el fin de que queden lo más verticalmente posibles ambas partes.



Figura B.11: Pegado de las vigas de ensayo

El procedimiento se repite para todas las vigas de ensayo, y se lleva a cabo en series de entre 5 a 6 vigas por proceso de pegado, como se muestra en la Figura B.12.



Figura B.12: Serie de vigas reparadas

Luego de 24 [hrs] de forma vertical, las vigas, se llevan nuevamente a la forma horizontal para continuar con el proceso de curado.

Una vez finalizado este proceso, las vigas se encuentran listas para realizar la instalación del sistema de refuerzo FRCM.

ANEXO C: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A CUBOS DE CONTROL POR COLADA DE HORMIGÓN PARA VIGAS

Tabla C.1: Resistencia a compresión de las probetas de control

Colada	Edad [días]	Resistencia a Compresión [kgf/cm ²]	Resistencia Promedio [kgf/cm ²]
1	7	435	444 ± 25
2		441	
3		419	
4		479	
1	28	608	621 ± 24
2		620	
3		602	
4		656	

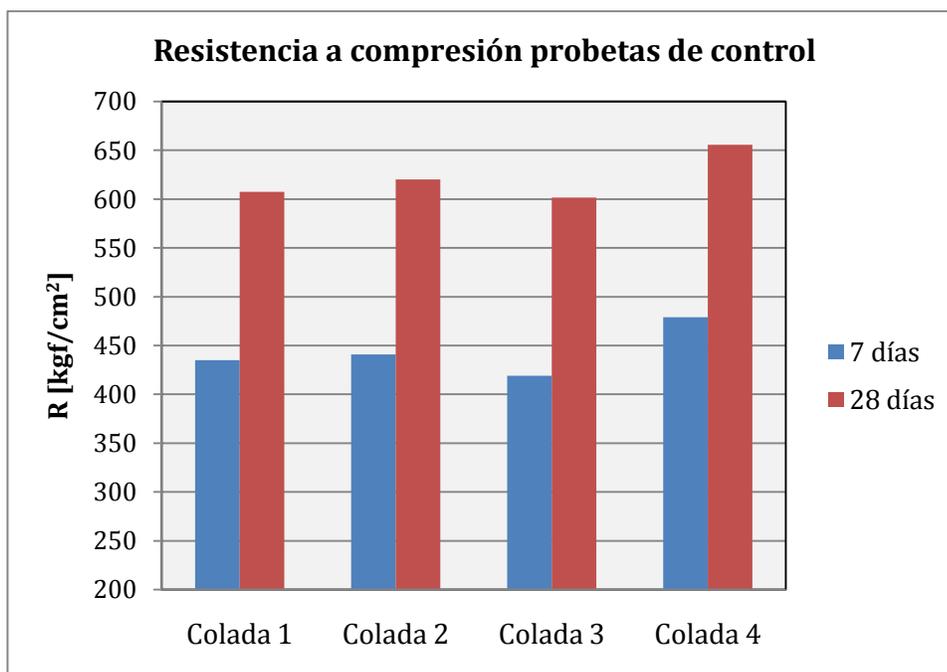


Figura C.1: Resistencia a compresión de las probetas de control por colada de hormigón

ANEXO D: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A PROBETAS RILEM DE LOS MORTEROS PARA REFUERZOS DE VIGAS DE HORMIGÓN

Tabla D.1: Ensayos Rilem de control por viga reforzada

Mortero Patrón		
Edad	28 días	
Viga	Flexión [kgf/cm ²]	Compresión [kgf/cm ²]
MP-1C-1	73	494
MP-1C-2	79	499
MP-1C-3	81	501
Promedio	78 ± 4	498 ± 4
MP-2C-1	67	489
MP-2C-2	77	498
MP-2C-3	79	495
Promedio	74 ± 6	494 ± 5
Mortero Cementíceo		
Edad	28 días	
Viga	Flexión [kgf/cm ²]	Compresión [kgf/cm ²]
MC-1C-1	95	641
MC-1C-2	91	638
MC-1C-3	98	644
Promedio	95 ± 4	641 ± 3
MC-2C-1	97	640
MC-2C-2	94	645
MC-2C-3	99	648
Promedio	87 ± 3	644 ± 4
Mortero Geopolímero		
Edad	28 días	
Viga	Flexión [kgf/cm ²]	Compresión [kgf/cm ²]
MG-1C-1	76	348
MG-1C-2	68	341
MG-1C-3	74	351
Promedio	73 ± 4	347 ± 5
MG-2C-1	81	355
MG-2C-2	77	347
MG-2C-3	80	348
Promedio	82 ± 3	350 ± 4