

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos



**Estudio del comportamiento de mallas
de fibras de carbono embebidas en
matriz cementosa (CFRCM) para el
refuerzo de estructuras de hormigón**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

María Rodríguez Marcos

Máster Universitario en Estructuras

Madrid, 2024



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos

**Doctorado en Ingeniería de Estructuras, Cimentaciones y
Materiales**

**Estudio del comportamiento de mallas
de fibras de carbono embebidas en
matriz cementosa (CFRCM) para el
refuerzo de estructuras de hormigón**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

María Rodríguez Marcos

Máster Universitario en Estructuras

Bajo la dirección de:

Dr. Jaime Fernández Gómez

Dra. Paula Villanueva Llauradó

Madrid, 2024

Título: Estudio del comportamiento de mallas de fibras de carbono embebidas en matriz cementosa (CFRCM) para el refuerzo de estructuras de hormigón

Autor: María Rodríguez Marcos

Programa de Doctorado: Ingeniería de Estructuras, Cimentaciones y Materiales

Dirección de tesis:

Dr. Jaime Fernández Gómez, Catedrático Universidad, Universidad Politécnica de Madrid (Director)

Dra. Paula Villanueva Llauradó, Contratado Doctor, Universidad Politécnica de Madrid (Director)

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

A mi familia

Agradecimientos

Quiero expresar mi gratitud a todas las personas que, de manera directa o indirecta, han contribuido durante el proceso de mi doctorado con su apoyo y ánimo.

En primer lugar, agradezco a mis directores Jaime Fernández Gómez y Paula Villanueva Llauro por brindarme la oportunidad de realizar esta tesis doctoral. Sin su guía, conocimientos y respaldo, esta investigación no habría sido posible.

Esta tesis no se habría concretado sin la colaboración de SIKA S.A.U y la Cátedra de Edificación y Prefabricación de la E.T.S.I de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid. Agradezco especialmente al equipo de demostradores de la escuela de SIKA S.A.U, cuya cooperación fue esencial para llevar a cabo las campañas experimentales. Además, extiendo mi agradecimiento al profesor Francisco González Ramos por su valiosa colaboración en la realización de los ensayos.

También quiero agradecer al grupo de investigación TIDOP de la Universidad de Salamanca, en particular a Jorge López, Javier Pisonero, Roberto García y Luis Javier Sánchez, por su indispensable ayuda en la monitorización y ejecución de los ensayos. Asimismo, agradezco al Laboratorio de Materiales de la E.T.S de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid por su disposición para realizar parte de la campaña experimental.

A la Cátedra y al cuerpo docente de Edificación y Prefabricación de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, les agradezco su constante apoyo y ánimo durante todo el proceso.

Un agradecimiento especial al profesor Daniel Oliveira por acogerme en su grupo de investigación de la Universidad de Minho y por su paciencia al ayudarme a desarrollar el método numérico de esta tesis.

Asimismo, quiero expresar mi gratitud al grupo de investigación ADIME de la Universidad de Granada, con quienes tuve el placer de colaborar durante la realización de mis trabajos fin de máster, y quienes me introdujeron en el mundo de la investigación.

Finalmente, agradezco a mi familia y amigos por todo el apoyo brindado. En especial, a aquellos que, sin pertenecer a este ámbito, se han interesado por gráficas, congresos y publicaciones solo para poder apoyarme. Muchas gracias por mostrarme su cariño.

Resumen

En la actualidad, el grado de concienciación sobre la sostenibilidad ha aumentado, así como la preocupación por el medio ambiente. En este contexto, el uso de materiales de reparación y refuerzo también ha crecido con el fin de aumentar la vida útil de las estructuras. Los materiales compuestos por fibras embebidas en una matriz son una opción viable en lugar de los métodos tradicionales de refuerzo, gracias a su alta resistencia en relación con su bajo peso. Los composites más utilizados son las fibras embebidas en matriz polimérica (FRP), que tienen un comportamiento elástico-lineal hasta la rotura, pero que no siempre pueden aplicarse. Como alternativa, existen los sistemas de fibras embebidos en matriz cementosa (FRCM) que tienen mayor compatibilidad con las estructuras de fábrica, mayor resistencia a altas temperaturas, e incluso una resistencia a fuego similar a las estructuras de hormigón o fábrica; además pueden ser aplicadas en soportes húmedos y permeabilidad al vapor de agua.

Las propiedades de los FRCM son variables, dependiendo de las características de los tejidos y la matriz que los forman, de la interfaz entre ellas, y de la interfaz con el soporte. Antes de su aplicación como refuerzo, es necesario estudiar sus propiedades mediante ensayos de tracción y de otro tipo que permitan caracterizar la interfaz con el soporte. Actualmente, aunque existen guías sobre el refuerzo con FRCM, no hay ensayos específicos estandarizados para estos composites.

Por todo lo expuesto anteriormente, se propone un estudio integral del comportamiento de las fibras de carbono embebidas en matriz cementosa (CFRCM), en el que se analicen las propiedades de las matrices, el comportamiento de las probetas aisladas y el comportamiento del material compuesto una vez aplicado como refuerzo. Además, se propone evaluar el impacto que tienen las propiedades de las mallas y de los morteros en el comportamiento global.

Se analizan las propiedades mecánicas y de durabilidad de los morteros empleados como matrices. El objetivo principal es estudiar la posible mejora en la durabilidad empleando morteros de reparación, a la vez que se refuerza. Las diferentes tecnologías de reparación base cemento de las que se estudian las propiedades mecánicas y prestaciones de durabilidad son morteros Portland tradicional, modificados con polímeros y poliuretanos. Los resultados revelan que los morteros de reparación presentan altas prestaciones a diferentes niveles, siendo apropiados para aplicaciones en las que tanto la durabilidad como las prestaciones estructurales son críticas.

El comportamiento de cada FRCM particular, como ya se ha comentado, depende de la malla y de la matriz que lo forman. Con el objetivo de evaluar la influencia de sus propiedades en el comportamiento global, se comparan sistemas de FRCM con dos mallas diferentes de carbono (con y sin impregnación) y seis morteros mediante ensayos de tracción uniaxial. Los resultados revelan un comportamiento remarcablemente mejor en los sistemas de malla impregnada, especialmente cuando esta se combina con morteros de alta resistencia.

Una vez obtenido el comportamiento de los composites aislados, se analiza el comportamiento de los sistemas aplicados como refuerzo. En esta investigación, se someten 16 vigas de hormigón reforzadas con tres sistemas diferentes de FRCM a ensayos de flexión de tres puntos para caracterizar la interfaz soporte-composite. La resistencia última de las vigas con el mismo volumen de fibras varía hasta un 60% dependiendo del mortero, y la carga última de las vigas reforzadas es de al menos dos veces la de control.

Debido la dificultad de realizar ensayos para estudiar la adherencia, se propone un modelo numérico de las vigas de hormigón reforzadas con FRCM con un enfoque macro en el *software* DIANA, que permita estimar su comportamiento. El modelo adoptado permite representar la fisuración del hormigón, la del FRCM y el comportamiento general de la viga.

Abstract

Nowadays, the level of awareness of sustainability has increased, parallel to the environmental concern. In this context, the use of structural repair and reinforcement materials has also grown with the aim of increasing the service life of the structures. Composite materials formed by fibres embedded in a matrix are a valid option instead of traditional reinforcement methods, thanks to their high strength-weight ratio. The most employed composite are fibres embedded in a polymer matrix (FRP), with an elastic-linear behaviour until rupture, although they are not always possible to apply. As an alternative, there are systems of fibres embedded in a cementitious matrix (FRCM) that have higher compatibility with masonry structures, higher temperature resistance, even a fire resistance similar to concrete and masonry structures; additionally, can be applied in wet supports and have vapour permeability.

FRCM properties are variable, depend on textile and matrix characteristics, as well as the interface between both and the interface reinforcement-support. It is necessary to assign the properties of the system through tensile tests and tests specific to characterise the interface before their application. Currently, there are guidelines on FRCM reinforcement, but no specific standardised test for these composites.

In accordance with the above, a comprehensive study of the behaviour of carbon fibres embedded in a cementitious matrix is proposed (CFRCM), in which the properties of the matrixes, the behaviour of the coupons and the behaviour once applied as reinforcement are analysed. In addition, it is proposed to evaluate the impact of the properties of the textiles and mortars on the overall behaviour.

Mechanical properties and durability of mortars employed as matrix are analysed. The main objective is to study the possible improvement in durability by using repair mortars while strengthening. The different cement-based technologies studied (mechanical properties and durability) are

traditional Portland mortars, polymer-modified and polyurethane-modified mortars. The results reveal that repair mortars have higher performance at different levels, making them suitable for applications where both durability and structural performance are critical.

The behaviour of FRCM systems, as already mentioned, depends on the mesh and the matrix that form it. In order to evaluate the influence of their properties on the overall behaviour, FRCM systems with two different carbon textiles (with and without impregnation) and six mortars are compared using uniaxial tensile tests. The results reveal a markedly better performance of the impregnated mesh systems, especially when combined with high-strength mortars.

Once coupons behaviour has been set, the behaviour of the systems applied as reinforcement is analysed. In this research, 16 concrete beams reinforced with 3 different FRCM are three-points bending tested to characterised support-composite interface. The ultimate strength of the beams with the same fibres content varies by 60% depending on the mortar, and the ultimate load of reinforced beams is at least twice of the control beam.

Due to the difficulty of carrying out tests to study the bond, a numerical model of concrete beams reinforced with FRCM is proposed with a macro-modelling approach in *DIANA* software, which allows estimating their behaviour. The adopted model can represent concrete cracking, FRCM cracking and overall behaviour of the beam.

Índice

Agradecimientos	v
Resumen	vii
Abstract.....	ix
Índice de figuras	xv
Índice de tablas	xix
Notación	xxi
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Justificación de la tesis doctoral.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organización de la tesis.....	4
Capítulo 2. Estado actual del conocimiento	7
2.1 Introducción.....	7
2.2 Materiales compuestos.....	7
2.2.1 Definición	8
2.2.2 Constituyentes.....	9
2.2.3 FRCCM	15
2.3 Refuerzo de elementos estructurales con FRCCM	15
2.3.1 Refuerzos a compresión.....	16
2.3.2 Refuerzos a flexión	17
2.3.3 Refuerzos a cortante.....	17
2.4 Comportamiento mecánico y modos de fallo de los sistemas de FRCCM	18
2.5 Guías y códigos de diseño de refuerzos de FRCCM.....	23
2.5.1 CNR-DT 215(2018). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded Fibre Reinforced Inorganic Matrix Systems for Strengthening Existing Structures.....	23

2.5.2 AC434. Acceptance criteria for masonry and concrete strengthening using fiber-reinforced cementitious matrix (FRCM) composite systems	25
2.5.3 ACI 549.4R-20. Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix and Steel-Reinforced Grout Systems for Repair and Strengthening of Concrete Structures	26
2.5.4 ACI 549.6R-20. Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) and Steel-Reinforced Grout (SRG) Systems for Repair and Strengthening Masonry Structures.....	28
2.6 Sostenibilidad de las estructuras.....	29
Capítulo 3. Planteamiento de la investigación.....	31
Capítulo 4. Descripción de los materiales, plan experimental y resultados de los ensayos de durabilidad realizados a las matrices	35
4.1 Introducción.....	35
4.2 Tejidos	36
4.3 Matrices: morteros.....	36
4.3.1 Descripción de los morteros	37
4.3.2 Ensayos realizados.....	40
4.3.3 Resultados de la campaña experimental y discusión de resultados	43
4.3.4 Análisis del incremento de la vida útil.....	53
Capítulo 5. Plan experimental y resultados de los sistemas de FRCM ensayados a tracción	57
5.1 Introducción.....	57
5.2 Descripción de la campaña experimental.....	58
5.2.1 Materiales empleados	59
5.2.2 Ensayo e instrumentalización	60
5.3 Resultados de la campaña experimental.....	63
5.3.1 Resultados de desplazamientos y deformaciones	63

5.3.2	Curvas tensión-deformación	64
5.4	Discusión de resultados.....	67
5.4.1	Resistencia última a tracción	68
5.4.2	Módulo de elasticidad	70
5.4.3	Patrón de fisuración	71
5.4.4	Evaluación de los sistemas ensayados.....	73
5.5	Evaluación de los resultados obtenidos con relación a otros estudios mediante revisión sistemática.....	75
5.5.1	Base de datos	77
5.5.2	Discusión.....	80
Capítulo 6. Plan experimental y resultados de vigas de hormigón reforzadas con FRCM ensayadas a flexión		93
6.1	Introducción.....	93
6.2	Descripción de la campaña experimental.....	94
6.2.1	Materiales empleados	95
6.2.2	Ensayos e instrumentalización.....	96
6.3	Resultados de la campaña experimental y discusión	100
6.4	Comparación de la influencia del ancho de la viga en el comportamiento global.....	106
Capítulo 7. Simulación del comportamiento a flexión de vigas de hormigón reforzadas con FRCM mediante un macro-modelado de elementos finitos		109
7.1	Introducción.....	109
7.2	Resultados experimentales.....	111
7.3	Modelización mediante elementos finitos de vigas reforzadas con FRCM	113
7.4	Simulación de la respuesta de las vigas reforzadas con FRCM....	116
7.4.1	Viga de hormigón en masa.....	116
7.4.2	Viga de hormigón armado.....	119

7.4.3	Viga de hormigón armado reforzada con el sistema de FRCM GII-MA2 (V-1GII-MA2).....	121
7.4.4	Viga de hormigón armado con una entalla reforzada con el sistema de FRCM GII-MB (V-1GII-MB).....	124
7.5	Limitaciones del modelo propuesto.....	126
Capítulo 8. Conclusiones y futuras líneas de investigación		129
8.1	Introducción.....	129
8.2	Conclusiones del estudio de la durabilidad de los morteros.....	129
8.3	Conclusiones de los ensayos a tracción de las probetas de FRCM	131
8.4	Conclusiones de los ensayos a flexión de vigas reforzadas con FRCM	133
8.5	Conclusiones de la modelización numérica de las vigas de hormigón reforzadas con FRCM mediante técnicas de macro-modelización.....	134
8.6	Futuras líneas de investigación	136
Capítulo 9. Conclusions		137
9.1	Introduction.....	137
9.2	Conclusions from the study of the durability of the mortars	137
9.3	Conclusions from uniaxial tensile tests of FRCM systems	138
9.4	Conclusions from bending tests of concrete beams reinforced with FRCM	140
9.5	Conclusions from the numerical modelling of concrete beams reinforced with FRCM using a macro-modelling approach.....	142
9.6	Future works.....	143
Bibliografía		145

Índice de figuras

FIGURA 2.1. CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN TÍPICOS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS	10
FIGURA 2.2. TIPOS DE MATRICES UTILIZADAS EN LOS FRP Y LOS FRCM.....	14
FIGURA 2.3. CONFINAMIENTO DE PILARES.....	16
FIGURA 2.4. POSICIÓN DE LOS REFUERZOS A FLEXIÓN.....	17
FIGURA 2.5. ESQUEMA DE REFUERZOS A CORTANTE.....	18
FIGURA 2.6. CURVA TÍPICA TENSIÓN-DEFORMACIÓN PARA LOS SISTEMAS DE FRCM.....	19
FIGURA 2.7. MODOS DE FALLO.....	20
FIGURA 2.8. TIPOS DE ENSAYOS EN ELEMENTOS DE FÁBRICA REFORZADOS CON FRCM.....	22
FIGURA 3.1. FASES QUE FORMAN LA INVESTIGACIÓN.....	32
FIGURA 4.1. MALLAS DE CARBONO EMPLEADAS EN LA INVESTIGACIÓN: A) GI; B) GII.....	36
FIGURA 4.2. COMPONENTES DE LOS MORTEROS DE REPARACIÓN.....	39
FIGURA 4.3. CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO DE DIFUSIÓN DE CLORUROS.....	41
FIGURA 4.4. ENSAYO DE PERMEABILIDAD DE GASES.....	43
FIGURA 4.5. RESISTENCIA A FLEXIÓN (A) Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN (B).....	44
FIGURA 4.6. MEDICIÓN DIGITAL DE LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN TRAS LA APLICACIÓN DE UNA SOLUCIÓN DE FENOLFTALEÍNA EN LAS MEZCLAS MA, MA2, MB, MD Y ME.....	45
FIGURA 4.7. PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN.....	46
FIGURA 4.8. CONTENIDO TOTAL DE CLORUROS EN % A DIFERENTES PROFUNDIDADES.....	47
FIGURA 4.9. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LOS MORTEROS EN ΩM	48
FIGURA 4.10. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS Y RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LOS MORTEROS ESTUDIADOS.....	49
FIGURA 4.11. PERMEABILIDAD A GAS DE LOS MORTEROS.....	51
FIGURA 4.12. COMPARACIÓN ENTRE LA PERMEABILIDAD A GAS Y EL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE LOS CLORUROS.....	52
FIGURA 4.13. EVALUACIÓN DE LA VIDA ÚTIL EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN.....	54
FIGURA 4.14. EVALUACIÓN DE LA VIDA ÚTIL EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS.....	56
FIGURA 5.1. PROCESO DE FABRICACIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.....	59
FIGURA 5.2. MÁQUINA DE ENSAYO Y SISTEMA DE AGARRE. A) MÁQUINA DE ENSAYO B) PROBETA Y SISTEMA DE AGARRE.....	61
FIGURA 5.3. PROTOTIPO EN 2D DE BAJO COSTE A) PROTOTIPO DIC 2D B) PATRÓN MOTEADO APLICADO A UNA PROBETA DE FRCM.....	62
FIGURA 5.4. A) DESPLAZAMIENTO VERTICAL Y B) DEFORMACIONES OBTENIDAS CON N CORR.	64

FIGURA 5.5. CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE LOS SISTEMAS DE FRCM CON MALLA GI..	65
FIGURA 5.6. CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE LOS SISTEMAS DE FRCM CON MALLA GII	65
FIGURA 5.7. CURVAS IDEALIZADAS DE TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE LOS SISTEMAS DE FRCM.	
.....	66
FIGURA 5.8. RESISTENCIA ÚLTIMA DE LOS SISTEMAS DE FRCM.....	69
FIGURA 5.9. MÓDULO DE YOUNG DE LA PRIMERA RAMA DE LOS SISTEMAS DE FRCM	71
FIGURA 5.10. MÓDULO DE YOUNG ENTRE EL 60 Y 90% DE LA RESISTENCIA ÚLTIMA DE LOS SISTEMAS DE FRCM.....	71
FIGURA 5.11. DISTANCIA MEDIA ENTRE FISURAS DE LOS SISTEMAS DE FRCM.....	72
FIGURA 5.12. FACTOR DE EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS DE FRCM	74
FIGURA 5.13. RATIO DE EXPLOTACIÓN DEPENDIENDO DEL SISTEMA DE AGARRE	80
FIGURA 5.14. RATIO DE EXPLOTACIÓN DEPENDIENDO DEL RECUBRIMIENTO DE LAS MALLAS	81
FIGURA 5.15. CURVAS IDEALIZADAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE LOS SISTEMAS FRCM. LAS LÍNEAS AZULES CORRESPONDEN A TEJIDOS SIN RECUBRIMIENTOS, LAS ROJAS PARA TEJIDOS RECUBIERTOS Y LAS GRISES CUANDO NO ESTÁ ESPECIFICADO. LAS LÍNEAS DISCONTINUAS SON PARA CLEVIS Y LAS CONTINUAS PARA CLAMPING	82
FIGURA 5.16. CURVAS IDEALIZADAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN PARA SISTEMAS DE FRCM DE MALLAS SIN RECUBRIMIENTO. A) CLEVIS, B) CLAMPING	83
FIGURA 5.17. CURVAS IDEALIZADAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN PARA SISTEMAS DE FRCM DE MALLAS RECUBIERTAS. A) CLEVIS, B) CLAMPING.....	84
FIGURA 5.18. RESISTENCIA ÚLTIMA DEL FRCM VERSUS LA RESISTENCIA A TRACCIÓN DEL TEJIDO	84
FIGURA 5.19. RESISTENCIA DE FISURACIÓN Y ÚLTIMA A TRACCIÓN DEL FRCM VERSUS LA RESISTENCIA A TRACCIÓN DEL MORTERO	85
FIGURA 5.20. MODOS DE FALLO	86
FIGURA 5.21. RATIO DE CARGA ÚLTIMA/ CARGA DE CONTROL (ΔP_u) DEPENDIENDO DEL MODO DE FALLO.....	89
FIGURA 5.22. RATIO DE CARGA ÚLTIMA/ CARGA DE CONTROL (ΔP_u) DEPENDIENDO DE SI EXISTE ANCLAJE Y DE SU TIPO	89
FIGURA 5.23. RATIO DE CARGA ÚLTIMA/ CARGA DE CONTROL (ΔP_u) DEPENDIENDO DEL RECUBRIMIENTO DE LA MALLA	90
FIGURA 5.24. RATIO DE CARGA ÚLTIMA/ CARGA DE CONTROL (ΔP_u) DEPENDIENDO DEL NÚMERO DE CAPAS DE TEJIDO	91
FIGURA 5.25. RATIO DE CARGA ÚLTIMA/ CARGA DE CONTROL (ΔP_u) DEPENDIENDO VERSUS LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL SOPORTE.....	91
FIGURA 6.1. GEOMETRÍA DE LA VIGA (MM)	95
FIGURA 6.2. CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO.....	97
FIGURA 6.3. DOBLE ENFOQUE 2D-DIC: A) MACRO, B) MICRO.....	98

FIGURA 6.4. DEFORMACIÓN DEL FRCM MEDIDA CON DIC PARA V-2GII-MD A) CARGA DE 7,1 kN B) CARGA DE 13,4 kN	102
FIGURA 6.5. CURVAS CARGA-FLECHA DE LAS VIGAS REFORZADAS CON FRCM	102
FIGURA 6.6. TENSIÓN-DEFORMACIÓN DEL FRCM GII-MA2	103
FIGURA 6.7. TENSIÓN-DEFORMACIÓN DEL FRCM GII-MB	104
FIGURA 6.8. TENSIÓN-DEFORMACIÓN DEL FRCM GII-MD	104
FIGURA 6.9. TENSIÓN DE ADHERENCIA DEL FRCM RESPECTO A LA CARGA DEL FRCM	105
FIGURA 6.10. RESISTENCIA ÚLTIMA DE CADA SISTEMA DE FRCM.....	106
FIGURA 6.11. GEOMETRÍA DE LAS VIGAS ENSAYADAS Y POSICIÓN DEL REFUERZO.....	107
FIGURA 6.12. CURVAS CARGA-FLECHA OBTENIDAS EXPERIMENTALMENTE PARA LAS VIGAS REFORZADAS CON 2GII-MB	108
FIGURA 6.13. MODO DE FALLO DE LAS VIGAS 3V, A) INICIO DE DESPEGUE EN LA ENTALLA; B) DESPEGUE COMPLETO.....	108
FIGURA 7.1. CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN EXPERIMENTALES E IDEALIZADA DE LOS SISTEMAS DE GII-MA2	112
FIGURA 7.2. CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN EXPERIMENTALES E IDEALIZADA DE LOS SISTEMAS DE GII-MB	112
FIGURA 7.3. CURVAS CARGA-FLECHA DE LAS VIGAS REFORZADAS CON FRCM	113
FIGURA 7.4. MALLA DETALLADA.....	114
FIGURA 7.5. CURVAS CARGA-FLECHA DE LAS VIGAS DE HORMIGÓN EN MASA CON UNA ENTALLA	117
FIGURA 7.6. TENSIONES PRINCIPALES DE COMPRESIÓN DE LA VIGA DE HORMIGÓN EN MASA CON ENTALLA. A) COMPORTAMIENTO ELÁSTICO TÍPICO; B) CARGA PICO; C) RESPUESTA TRAS LA CARGA PICO.....	118
FIGURA 7.7. DEFORMACIONES PRINCIPALES DE TRACCIÓN DE LA VIGA DE HORMIGÓN EN MASA CON ENTALLA. A) COMPORTAMIENTO ELÁSTICO TÍPICO; B) CARGA PICO; C) RESPUESTA TRAS LA CARGA PICO	118
FIGURA 7.8. CURVAS CARGA-FLECHA DE LAS VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO CON UNA ENTALLA	119
FIGURA 7.9. TENSIONES PRINCIPALES DE COMPRESIÓN DE LA VIGA DE HORMIGÓN ARMADO CON ENTALLA. A) COMPORTAMIENTO ELÁSTICO TÍPICO; B) CARGA PICO; C) RESPUESTA TRAS LA CARGA PICO.....	120
FIGURA 7.10. DEFORMACIONES PRINCIPALES DE TRACCIÓN DE LA VIGA DE HORMIGÓN ARMADO CON ENTALLA. A) COMPORTAMIENTO ELÁSTICO TÍPICO; B) CARGA PICO; C) RESPUESTA TRAS LA CARGA PICO	121
FIGURA 7.11. CURVAS CARGA-FLECHA DE LAS VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO CON UNA ENTALLA REFORZADA CON EL SISTEMA GII-MA2.....	122

FIGURA 7.12. TENSIONES PRINCIPALES DE COMPRESIÓN DE LA VIGA DE HORMIGÓN EN MASA CON ENTALLA REFORZADA CON EL SISTEMA GII-MA2. A) FISURACIÓN DEL HORMIGÓN; B) FISURACIÓN DEL FRCM; C) POST-FISURACIÓN DEL FRCM.....	123
FIGURA 7.13. TENSIONES PRINCIPALES DE TRACCIÓN DE LA VIGA DE HORMIGÓN EN MASA CON ENTALLA REFORZADA CON EL SISTEMA GII-MA2. A) FISURACIÓN DEL HORMIGÓN; B) FISURACIÓN DEL FRCM; C) POST-FISURACIÓN DEL FRCM.....	123
FIGURA 7.14. CURVAS CARGA-FLECHA DE LAS VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO CON UNA ENTALLA REFORZADA CON EL SISTEMA GII-MB.....	124
FIGURA 7.15. TENSIONES PRINCIPALES DE COMPRESIÓN DE LA VIGA DE HORMIGÓN EN MASA CON ENTALLA REFORZADA CON EL SISTEMA GII-MB. A) FISURACIÓN DEL HORMIGÓN; B) FISURACIÓN DEL FRCM; C) POST-FISURACIÓN DEL FRCM	125
FIGURA 7.16. TENSIONES PRINCIPALES DE TRACCIÓN DE LA VIGA DE HORMIGÓN EN MASA CON ENTALLA REFORZADA CON EL SISTEMA GII-MB. A) FISURACIÓN DEL HORMIGÓN; B) FISURACIÓN DEL FRCM; C) POST-FISURACIÓN DEL FRCM	126

Índice de tablas

TABLA 2.1. PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIAS DE LAS FIBRAS.....	13
TABLA 4.1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MALLA.....	36
TABLA 4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS MORTEROS.....	39
TABLA 4.3. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS (D_A).....	47
TABLA 5.1. MATRIZ DE ENSAYOS DE TRACCIÓN.....	60
TABLA 5.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A TRACCIÓN DE LOS COMPOSITES.....	67
TABLA 5.3. MEDIA, DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y COMPARACIÓN ESTADÍSTICA DE LA RESISTENCIA ÚLTIMA DE LOS SISTEMAS DE FRCM.....	69
TABLA 5.4. MEDIA, DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y COMPARACIÓN ESTADÍSTICA DE LA DISTANCIA ENTRE FISURAS DE LOS SISTEMAS DE FRCM.....	72
TABLA 5.5. MEDIA, DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y COMPARACIÓN ESTADÍSTICA DEL FACTOR DE EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS DE FRCM.....	74
TABLA 5.6. BASE DE DATOS DE LOS ENSAYOS A FLEXIÓN.....	78
TABLA 5.7. BASE DE DATOS DE ENSAYOS A FLEXIÓN.....	79
TABLA 6.1. MATRIZ DE ENSAYOS DE LAS VIGAS REFORZADAS CON FRCM.....	96
TABLA 6.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	101
TABLA 7.1. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS A TRACCIÓN DE LAS PROBETAS DE FRCM.....	112

Notación

a	Parámetro adimensional para el cálculo de K_c
A_e	Área de superficie de contacto en el ensayo de resistividad eléctrica
A_f	Área de la fibra
A_p	Área transversal de la probeta en el ensayo de permeabilidad a gas
b	Parámetro adimensional para el cálculo de K_c
b_f	Dimensión del FRCM en el plano de flexión
c	Espesor del recubrimiento nominal del hormigón
c_{air}	Coefficiente debido al empleo de aireadores
c_{env}	Coefficiente de agresividad medioambiental
C_b	Contenido de cloruros proporcionado por los materiales empleados en la fabricación del hormigón
C_i	Concentración inicial de cloruros
C_s	Contenido de cloruros superficial
C_{th}	Límite de contenido de cloruros antes de que comience la corrosión
D_a	Coefficiente de difusión aparente de cloruros
$D_{app,c}$	Coefficiente aparente de difusión de cloruros
d_k	Profundidad de carbonatación
E_f	Módulo de elasticidad de la fibra
E_{mor}	Módulo de elasticidad del mortero
E_{FRCM}	Módulo de elasticidad del FRCM
$E_{I,FRCM}$	Módulo de elasticidad del FRCM sin fisurar (estado A)
erf	Función de error definida en ASTM C 1556-03 para ensayo de difusión de cloruros
f_{cd}	Resistencia de cálculo a compresión del hormigón
f_{ck}	Resistencia característica a compresión del mortero u hormigón
$f_{c,mor}$	Resistencia a compresión del mortero
$f_{f,mor}$	Resistencia a flexión del mortero de la matriz
K	Coefficiente de permeabilidad del oxígeno

K_c	Coeficiente de carbonatación
K_e	Coeficiente dependiente de la temperatura para el cálculo de $D_{app,c}$
L_e	Longitud de la probeta en el ensayo de resistividad eléctrica
L_p	Espesor del disco en el ensayo de permeabilidad a gas
n	Coeficiente de envejecimiento
n_f	Número total de capas de FRCM
p	Presión aplicada en el ensayo de permeabilidad a gas
p_0	Presión para Q en el ensayo de permeabilidad a gas
p_a	Presión atmosférica
Q	Flujo de oxígeno que atraviesa la probeta en el ensayo de permeabilidad a gas
R	Resistividad eléctrica
t_{est}	Tiempo estimado de vida útil
t_f	Espesor equivalente del FRCM proporcionado por el fabricante
t_{inic}	Periodo de iniciación del daño en la estimación de la vida útil
t_{mat}	Espesor de la matriz del FRCM
t_{prop}	Periodo de propagación del daño hasta un determinado umbral en la estimación de la vida útil
x	Profundidad bajo la superficie expuesta del coeficiente de difusión de cloruros
ε_{FRCM}	Deformación a tracción del FRCM
$\varepsilon_{u,FRCM}$	Deformación última a tracción del FRCM
$\varepsilon_{u,f}$	Deformación última a tracción de las fibras
μ	Viscosidad del oxígeno
ρ	Resistencia eléctrica
σ_{FRCM}	Tensión a tracción del FRCM
$\sigma_{u,FRCM}$	Tensión última a tracción del FRCM
$\sigma_{u,f}$	Tensión última a tracción de las fibras

Capítulo 1. Introducción

1.1 Justificación de la tesis doctoral

Los materiales compuestos están formados por una fibra de alta resistencia embebida en una matriz y su uso se está extendiendo como una alternativa a los métodos de refuerzo de estructuras tradicionales. Los composites más usados son los FRP, aunque debido a su matriz polimérica existen limitaciones en su aplicación como la utilización en soportes húmedos o, especialmente, la resistencia en caso de incendio. A raíz de las limitaciones, se han desarrollado nuevos composites como los FRCM cuya matriz es cementosa.

El empleo de los sistemas FRCM como método de refuerzo está condicionado principalmente por la variabilidad de sus propiedades al cambiar alguno de sus componentes. Las propiedades mecánicas de los FRCM dependen de las características de las fibras, de la matriz y de la interfaz entre ellas y con el soporte. Además, el comportamiento de los sistemas no es lineal. Estos factores influyen en que su uso esté limitado a sistemas comerciales en los cuales el comportamiento se haya ensayado previamente.

Otro de los aspectos que influyen en limitar el uso de los FRCM es la falta de normativas. Actualmente, solo existen guías y códigos de diseño de refuerzos de FRCM en Italia y en Estados Unidos, y no son de obligado cumplimiento. Adicionalmente, existe una gran variedad de configuración de ensayos de los cuales se obtienen diferentes resultados para un mismo sistema FRCM. Las investigaciones presentes en la literatura son limitadas, y debido en parte la gran diversidad en los materiales ensayados y sus métodos,

impiden generar modelos de los que pueda extrapolarse el comportamiento de un FRCM.

La posibilidad de formar nuevos sistemas de FRCM adecuándose más a la reparación sería una gran ventaja, si fuera posible sustituir el mortero del sistema por otro con unas propiedades concretas más propicias, tales como mayor resistencia a la carbonatación o contra la penetración de cloruros, ayudaría a proteger las estructuras además de repararlas. Aportar una protección extra a las estructuras ayuda a aumentar su durabilidad, contribuyendo a que sean más sostenibles. Además, debe tenerse en cuenta que en obras de rehabilitación reparación y refuerzo muchas veces van de la mano, por lo que usar materiales compatibles para ambos propósitos es fundamental.

La presente tesis busca estudiar la influencia de los materiales que forman el FRCM en el comportamiento global. Por un lado, se estudia la repercusión del recubrimiento de las mallas y las características de los morteros (composición y propiedades mecánicas). Con los resultados obtenidos, se seleccionan los sistemas que serán estudiados a flexión para comprobar el efecto de los morteros en el comportamiento global de una viga reforzada con FRCM y el impacto del número de capas. Por último, se propone un modelo numérico que permita obtener el comportamiento global de una viga reforzada a partir de los resultados experimentales a tracción.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de la tesis es evaluar el impacto que tienen las propiedades de las mallas y de los morteros en el comportamiento global de los composites, tanto de forma independiente como con el soporte en el que están aplicados.

Este objetivo se ha llevado a cabo mediante diferentes fases experimentales. Por un lado, se ha estudiado el comportamiento del propio composite y, por otro, el comportamiento junto al soporte. Además, se han estudiado los morteros para tener una mayor comprensión de los composites.

- La primera fase experimental consiste en un estudio de los morteros que se utilizaron como matrices de los FRCM. El objetivo es estudiar las propiedades mecánicas y de durabilidad de los morteros para cerciorarnos de que son adecuados como matrices y conocer cuáles son sus limitaciones. La durabilidad de los morteros se analiza con ensayos de carbonatación, penetración de cloruros, permeabilidad de gases y resistividad eléctrica.
- El objetivo de la segunda fase experimental es evaluar el impacto de los materiales que componen el FRCM en el comportamiento global. Se estudia principalmente la repercusión que tiene el recubrimiento de las mallas y las características de los morteros comparando morteros tradicionales de albañilería con otros de reparación mejorados.
- La tercera fase experimental tiene como objetivo principal comprobar si las conclusiones obtenidas para los sistemas FRCM ensayados de forma aislada son extrapolables a su aplicación como refuerzos. Además, se plantean como objetivos analizar la influencia de: los morteros (su adherencia), el número de capas de tejido y el ratio de explotación de las fibras.

Tras las campañas experimentales, se propone un modelo numérico que permita estimar el comportamiento de las vigas reforzadas con FRCM. Este modelo permite simular la fisuración del hormigón, del composite y el comportamiento global de la viga. El objetivo es evaluar si la simplificación del comportamiento de la interfaz soporte-FRCM afecta al comportamiento idealizado global de las vigas.

Con todo lo señalado, se pretende profundizar en la comprensión del comportamiento de los FRCM, buscando los parámetros más influyentes y, por tanto, aquellos que requieren un mayor estudio.

1.3 Organización de la tesis

La tesis está estructurada en ocho capítulos principales, además de un capítulo que contiene las conclusiones en inglés. En este capítulo (Capítulo 1) se recogen la motivación y los objetivos de este trabajo. El contenido de cada capítulo se describe brevemente a continuación:

- *Capítulo 2. Estado actual del conocimiento.* Se presentan los conceptos generales de los materiales compuestos, especialmente de los FRCM, el refuerzo de estructuras con ellos, su comportamiento mecánico y las guías y códigos de diseño de refuerzos de FRCM. Además, hay un apartado sobre la durabilidad de las estructuras y su mejora con la aplicación de composites.
- *Capítulo 3. Planteamiento de la investigación.* En este capítulo se define el plan de trabajo, las campañas experimentales (fases) y los materiales empleados y ensayos realizados en cada fase.
- *Capítulo 4. Descripción de los materiales, plan experimental y resultados de los ensayos de durabilidad realizados a las matrices.* Se recogen todos los materiales utilizados durante la investigación, sus características y propiedades mecánicas. Asimismo, se detallan los ensayos mecánicos y de durabilidad realizados en los morteros empleados como matrices de los composites y el análisis de su vida útil.
- *Capítulo 5. Plan experimental y resultados de los sistemas de FRCM ensayados a tracción.* Este capítulo corresponde a la primera campaña experimental realizada en los composites. Incluye la descripción de la matriz de ensayos, la configuración del ensayo y las probetas, los resultados obtenidos y su discusión. El último apartado del capítulo consiste en la evaluación de los resultados obtenidos respecto a otros estudios mediante una revisión sistemática.
- *Capítulo 6. Plan experimental y resultados de vigas de hormigón reforzadas con FRCM ensayadas a flexión.* En este capítulo se detalla la segunda campaña experimental de los FRCM. Se definen

los materiales empleados (matriz de ensayos), la fabricación de las probetas, la configuración del ensayo y los resultados obtenidos junto a su discusión.

- *Capítulo 7. Simulación del comportamiento a flexión de vigas de hormigón reforzadas con FRCM mediante un macro-modelado de elementos finitos* A partir de los resultados obtenidos en las dos campañas experimentales de los FRCM, se propone una modelización numérica con técnicas de macromodelado. Dicho modelo, realizado mediante el *software DIANA*, se aplica a varias tipologías de vigas y se compara con los resultados experimentales para estudiar su viabilidad y precisión.

- *Capítulo 8. Conclusiones y futuras líneas de investigación.* Contiene las conclusiones en castellano extraídas en cada fase. Se ofrecen separadas en apartados las conclusiones de los ensayos de los materiales, los ensayos a tracción de los sistemas FRCM, los ensayos a flexión de las vigas de hormigón reforzadas con FRCM y la modelización numérica de las vigas reforzadas con FRCM.

- *Capítulo 9. Conclusions and future research lines.* Contiene las conclusiones en inglés.

Capítulo 2. Estado actual del conocimiento

2.1 Introducción

Los materiales compuestos son muy utilizados actualmente en actuaciones de reparación y refuerzo, son una alternativa a los métodos tradicionales como los recrecidos de hormigón y las pletinas metálicas. Aunque el uso de los composites de fibras embebidas en polímeros (*FRP*) está más extendido y su comportamiento es más conocido, nuevos materiales compuestos han aparecido que pueden ser aplicados en situaciones en las que el uso de FRP está contraindicado. Los materiales compuestos formados por fibras embebidas en matriz cementosa (*FRCM*) son una alternativa viable, pero su comportamiento es variable y depende de múltiples factores, no solo de los materiales que lo forman y su proporción.

A continuación, se definen los materiales compuestos, sus componentes y de forma más detallada los sistemas FRCM. Se resume brevemente los refuerzos estructurales con FRCM, su comportamiento mecánico y modo de fallo. Además, se hace un repaso sobre las principales guías y códigos de diseño de refuerzos de FRCM.

2.2 Materiales compuestos

Los materiales compuestos con fibras de altas prestaciones, en sus aplicaciones tecnológicas actuales, son muy utilizados para actuaciones de refuerzo y rehabilitación de estructuras de hormigón armado y fábrica, así como en estructuras de madera. En los últimos años, ha aumentado la concienciación sobre la importancia de mantener y preservar el patrimonio

construido aumentando su vida útil, intentando que los refuerzos y rehabilitaciones tengan el menor impacto visual posible, la mínima interferencia en las características originales de las estructuras y edificios, y cuando sea posible, permitir la reversibilidad de las intervenciones. Aumentar la vida útil de las estructuras se plantea como un objetivo para mejorar la sostenibilidad de las construcciones.

Los materiales compuestos son una alternativa a los métodos tradicionales de refuerzo, tales como los recrecidos de hormigón o las pletinas metálicas. Se caracterizan por su bajo peso respecto su alta resistencia, razón por la que son idóneos para distintas aplicaciones incluyendo, de forma particular, el refuerzo antisismo [1–3].

Las principales aplicaciones de estos materiales son como refuerzo de estructuras existentes, construcción de estructuras completas y sistemas de refuerzo interno como alternativa al acero en el hormigón armado.

2.2.1 Definición

Los materiales compuestos objeto de estudio están formados por unas fibras, generalmente en forma de tejido o malla, embebidos en una matriz. La función de la fibra es proporcionar la rigidez y la resistencia necesarias, mientras que la matriz es una fase continua que aporta la configuración geométrica y permite la transmisión de esfuerzos entre las fibras y entre las fibras y el soporte. Existen diversos tipos de fibras, formando diferentes configuraciones, y varios tipos de matrices que producen distintos composites [4–13]. Los materiales compuestos se clasifican según el tipo de matriz, si las fibras están embebidas en un material orgánico (un polímero) se trata de *Fiber Reinforced Polymer* (FRP), si la matriz es un material inorgánico (mortero de cemento o cal) se trata de *Fiber Reinforced Cementitious Matrix* (FRCM) o *Textile Reinforced Mortar* (TRM). Además, existe un material con matriz inorgánica que se caracteriza por tener una malla con mayor espaciado y espesor que las usadas tradicionalmente en FRCM, embebidas en un espesor de 3 a 5 cm, conocido *Composite Reinforced Mortar* (CRM).

La utilización de estos composites ha aumentado principalmente debido a sus ventajas. Además de una alta resistencia respecto a su peso, tienen gran flexibilidad de uso y buena durabilidad. Aunque su aplicabilidad está condicionada por el mecanismo de adherencia al soporte que depende de distintos parámetros en los que intervienen el soporte, el tipo de fibras y de matriz, y por las conexiones constructivas a diferentes elementos.

2.2.2 Constituyentes

2.2.2.1 Fibras

Los sistemas de FRP y FRCM suelen emplear tipos diferenciados de fibras, aunque algunos de ellos pueden emplearse en ambos sistemas de forma indistinta. Las fibras, como se ha comentado previamente, son las responsables de la rigidez y la resistencia de los compuestos, de tal manera que la elección de las fibras tiene gran impacto en el comportamiento global. Las fibras tienen un comportamiento anisótropo, por tanto, el material compuesto también lo tiene. En aplicaciones distintas a la construcción, la ortotropía características de las fibras longitudinales suele paliarse disponiendo capas con distintas orientaciones; sin embargo, para las aplicaciones de refuerzo estructural lo más frecuente es contar con una dirección principal de tensión en las fibras.

Las principales fibras utilizadas en FRP son: carbono, fibras de vidrio, aramida y en menor medida basalto, generalmente en forma de tejido cerrado. En el FRCM se utilizan los mismos tipos de fibras que en el FRP, además de PBO y fibras naturales, configuradas en formato de malla abierta con las fibras longitudinales resistiendo las tensiones y con algún sistema transversal que mantengan las fibras en su posición para facilitar la penetración de la matriz. La Figura 2.1 muestra los rangos típicos de tensión-deformación de los diferentes tipos de fibras.

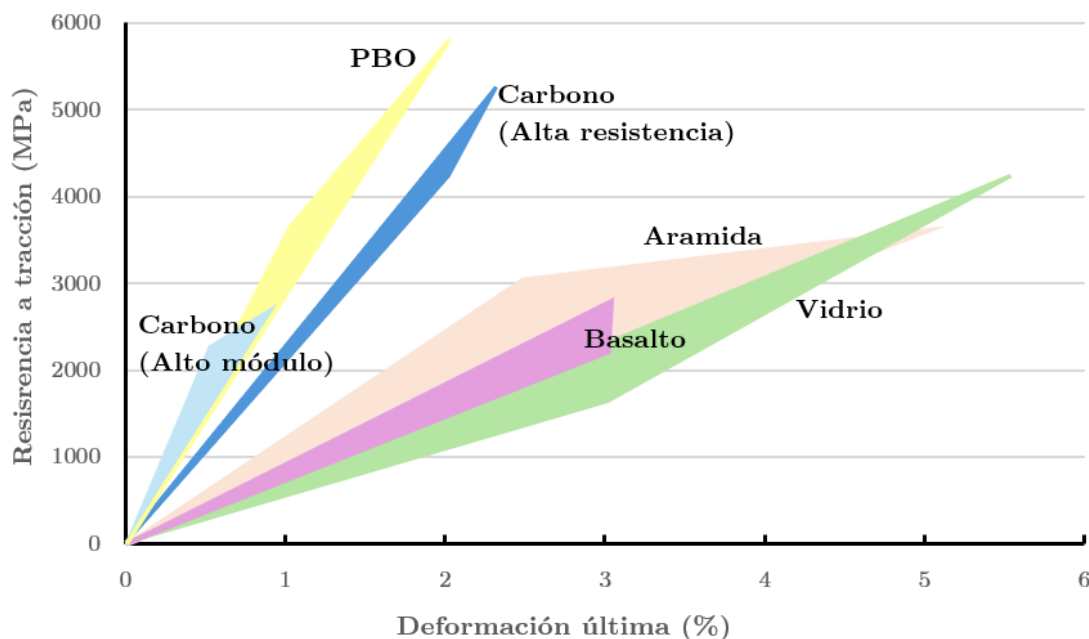


Figura 2.1. Curvas tensión-deformación típicas de los diferentes tipos de fibras

Fibra de carbono

Las fibras de carbono son las más utilizadas para refuerzos de estructuras de hormigón, especialmente en el caso de los FRP. Son las fibras de mayor coste, pero también de mayor ratio resistencia-peso, con buenas propiedades mecánicas y durables.

Las fibras de carbono se forman con cristales similares a los del grafito, a partir de láminas de átomos de carbono apiladas con un contenido en carbono de un 85-90%. Existen fibras producidas específicamente con alto módulo elástico o de alta resistencia, aunque si nos fijamos en los valores de la Tabla 2.1, podemos ver que ambos valores son elevados en todas las fibras de carbono.

Fibra de vidrio

Las fibras de vidrio tienen un bajo módulo elástico (Tabla 2.1), siendo más adecuadas para el refuerzo de estructuras bastante deformables como las fábricas de ladrillo o de mampostería. Su principal limitación es su pobre durabilidad, aunque en el caso de los FRCM son el segundo tipo de fibra más utilizada, especialmente en el caso de los CRM.

La fibra de vidrio es esencialmente sílice en estructura tetraédrica (SiO_4), que puede incluir adiciones de aluminio u otros iones metálicos para modificar alguna de sus propiedades. Estas formulaciones de vidrio con iones tienen distintas propiedades tratando de paliar su baja resistencia a la corrosión química (C), a las altas temperaturas y la más empleada AR, su vulnerabilidad al ataque por alcálisis. Las fibras de vidrio tipo E tienen características dieléctricas. Las propiedades mecánicas de las fibras de vidrio más comunes se recogen en Tabla 2.1.

Fibra de aramida

La aramida es una fibra orgánica que se produce a partir de poliamidas aromáticas. Se empezó a utilizar en 1971 por su resistencia al fuego y altas temperaturas, además de no conducir el calor a la matriz. También, es adecuada en trabajos que requieran resistencia a impacto.

Su uso estructural es limitado por su baja resistencia a flexión (Tabla 2.1), así como por su sensibilidad a cambios de temperaturas y rayos UV.

Fibra de basalto

Las fibras de basalto comienzan a ser una alternativa a las de carbono. Tienen un módulo elástico similar a las fibras de vidrio (Tabla 2.1), pero mayor resistencia a compresión y buen comportamiento frente al ataque de alcálisis, su estabilidad térmica y su resistencia a altas temperaturas también es superior a la fibra de vidrio.

El proceso de fabricación de las fibras de basalto es por hilado de roca fundida a temperaturas comprendidas entre los 1330°C y los 1770°C , la tecnología necesaria para el hilado se ha perfeccionado recientemente, consiguiendo unos costes de producción intermedios entre la fibra de vidrio y de carbono.

Su coste y propiedades han motivado su desarrollo, especialmente para aplicaciones de refuerzo en muros de fábrica.

Fibra de PBO

El PBO (*poliparafenilen benzobisaxozol*) comprende una nueva generación de fibras de alto rendimiento. Son fibras poliméricas altamente anisótropas con excelentes propiedades como la elevada resistencia, rigidez y baja densidad (Tabla 2.1).

Se suelen utilizar con matrices inorgánicas (FRCM) en las que la interacción fibras-matriz puede ser deficiente, ya que el PBO permite mejorar la adherencia en las interfaces fibras-matriz-soporte.

Fibras naturales

Las fibras naturales han sido tradicionalmente un recurso económico para la obtención de resistencias medias a tracción. Su principal problema es la durabilidad, contrarrestada con su fácil renovación y bajo coste.

En la literatura se han estudiado las propiedades mecánicas de diversas fibras como el sisal, lino, cáñamo, yute, y algodón, entre otras, con diversas matrices inorgánicas, concluyendo la viabilidad de uso de estas fibras para refuerzo de estructuras con estados tensionales no muy elevados como suele ser el caso de las fábricas.

Suelen presentar una menor interacción con la matriz, por lo que su uso es más extendido cuando están impregnadas. Si comparamos la rigidez y la resistencia a tracción de las fibras naturales recogidos en la Tabla 2.1, podemos observar cómo sus valores son significativamente inferiores a los del resto de fibras.

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas medias de las fibras

Tipo de fibra	Módulo elástico [GPa]	Resistencia a tracción [MPa]	Deformación última [%]
Carbono alta resistencia	215 - 235	3500 - 4800	1,4 - 2,0
Carbono ultra-alta resistencia	215 - 235	4800 - 6000	2,0 - 2,3
Carbono alto módulo	350 - 500	2500 - 3100	0,5 - 0,9
Carbono ultra-alto módulo	500 - 700	2100 - 2400	0,2 - 0,4
Vidrio tipo E	70	1900 - 3000	3,0 - 4,5
Vidrio tipo AR	85 - 90	3500 - 4800	4,5 - 5,5
Aramida bajo módulo	70 - 800	3500 - 4100	4,3 - 5,0
Aramida alto módulo	115 - 130	3500 - 4000	2,5 - 3,5
Basalto	80 - 90	2500 - 3200	3,0 - 3,2
PBO	270	5800	2,5
Sisal impregnado	3,7 - 9	92 - 350	2,1 - 2,5
Lino impregnado	9 - 38	220 - 631	1,3 - 3,6
Cáñamo impregnado	21 - 51	460 - 545	0,95 - 2,3
Yute impregnado	4,5	88	2,3
Algodón impregnado	0,8 - 0,9	82 - 92	7 - 8
Fibra de coco	0,3	51	0,16

2.2.2.2 Matriz

Las matrices de los materiales compuestos pueden ser poliméricas o inorgánicas. Sus funciones son: configurar la geometría del material compuesto, garantizar la transferencia de tensiones entre fibras y en la interfaz composite-soporte, prevenir el pandeo longitudinal de las fibras a compresión y protegerlas de las agresiones ambientales. La Figura 2.2 muestra los tipos de matrices para los composites FRP y FRCM.

Dentro de las matrices poliméricas tenemos las termoplásticas y las termoestables. Las resinas termoplásticas son sólidas a temperatura ambiente, se ablandan con altas temperaturas y endurecen con refrigeración.

Las resinas termoestables se presentan por lo general en estado líquido y se endurecen al mezclarse con un catalizador en presencia o no de calor, en

un proceso de “curado” de la resina. Son las que suelen utilizarse para la fabricación y aplicación del FRP.

Existen multitud de resinas termoestables, pero las más utilizadas como matriz son poliéster, viniléster y especialmente resina epoxi. La resina epoxi resiste la humedad y las agresiones químicas, está disponible en presentaciones bicomponente líquidas o en gel a temperatura ambiente. Uno de sus principales problemas es su temperatura de transición vítrea que es bastante baja, sus propiedades se ven deterioradas a partir de 60°C, por lo que los composites deben protegerse si se aplican en superficies a la intemperie que puedan estar soleadas varias horas y limita el tiempo de exposición al fuego de estos refuerzos.

Las matrices inorgánicas para los FRCM pueden ser de base cemento, de cal o de yeso entre otros y pueden llevar o no aditivos. La cantidad de aditivos está limitada a un 5-10% dependiendo de la normativa para seguir considerándose FRCM. El comportamiento de los FRCM depende de la interacción fibras-matriz por lo que, aunque se sustituya una matriz por otra con mejores propiedades resistentes, el comportamiento general del composite puede ser peor. La selección del mortero depende de la compatibilidad con el soporte, así como de las condiciones a las que esté sometido y de aplicación, además de por sus propiedades mecánicas.

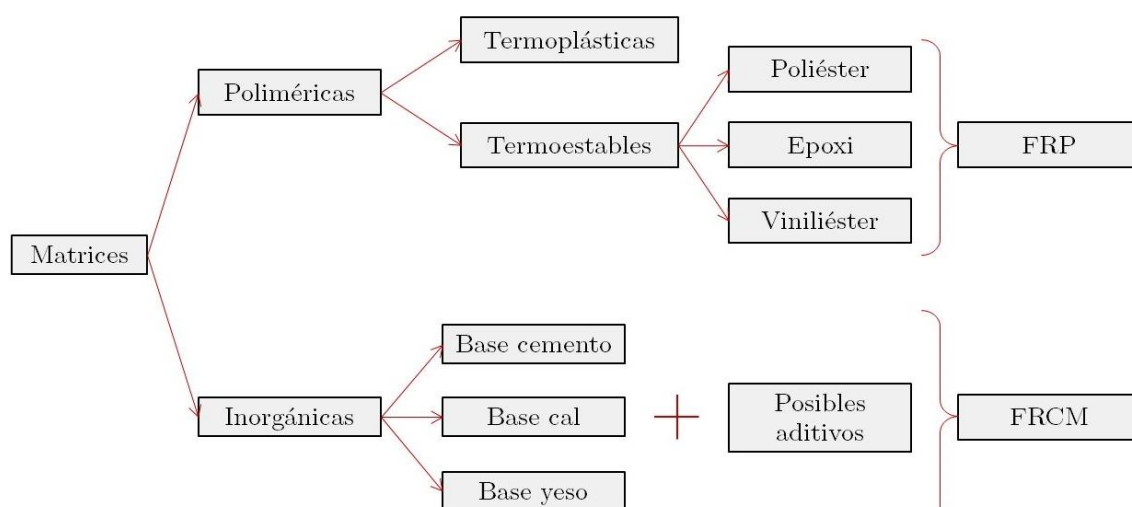


Figura 2.2. Tipos de matrices utilizadas en los FRP y los FRCM

2.2.3 FRCM

Aunque los composites FRP y FRCM se forman de manera análoga, con las mismas fibras, su comportamiento es dispar debido a las matrices que lo forman.

Los FRP tienen una interacción fibras-matriz perfecta, que permite alcanzar tensiones de rotura intermedias entre las fibras y la matriz, dependiendo de la fracción volumétrica de fibras. El comportamiento es elástico-lineal hasta la rotura con una deformación entre 1,1 y 2,3%.

Los FRCM tienen un comportamiento más variable, depende de la interfaz fibras-matriz y el despegue en la interfaz es la forma de fallo más común [14,15]. Esto se debe a que las partículas del material cementicio son de mayor tamaño que los polímeros y no consiguen impregnar completamente la malla. Por ese motivo, se utilizan impregnaciones que permiten trabajar a los cordones del tejido como un bloque y aumentan la adherencia con la matriz [14,16]. Además, se pueden utilizar morteros mejorados con polímeros que también aumenten la adherencia.

A pesar de que el comportamiento de los FRCM es menos homogéneo que el de los FRP y el aprovechamiento de las fibras es menor, su utilización se va expandiendo debido a las ventajas que presenta. Los FRCM tienen mayor compatibilidad con estructuras de fábrica, en construcciones históricas el mortero utilizado suele ser de cal o yesífero. Además, los FRCM tiene mayor resistencia a altas temperaturas, ya que el comportamiento de la matriz no está limitado por la temperatura de transición vítrea como en los polímeros, e incluso su resistencia al fuego es similar a las estructuras de hormigón o de fábrica. Incluso, escogiendo un mortero adecuado como matriz podemos obtener ventajas respecto a la permeabilidad del vapor y podemos aplicarlo en superficies húmedas [3-5,17-23].

2.3 Refuerzo de elementos estructurales con FRCM

Los composites se utilizan sobre todo como refuerzo para elementos sometidos a flexión, aunque también puede emplearse para el refuerzo de

elementos sometidos a compresión y a cortante. En función del tipo de elemento a reforzar, el material del soporte y las condiciones de aplicación, además de las características resistentes necesarias, se selecciona el tipo de FRCM, de malla y de mortero.

2.3.1 Refuerzos a compresión

Los refuerzos a compresión son el confinamiento de pilares. Las primeras aplicaciones significativas son de la década de 1980 para incrementar la ductilidad de las estructuras en zonas sísmicas.

Consiste en disponer fibras envolviendo al pilar con la dirección de las fibras perpendicular al eje.

Los materiales, cuando se someten a una compresión, se expanden lateralmente por el efecto de Poisson; cuando el pilar está confinado esta expansión está limitada por el composite y se crea un estado de tensiones triaxiales, que provoca un aumento en la resistencia a compresión del material.

El efecto de confinamiento, su efectividad, depende de la forma del pilar como se puede ver en la Figura 2.3. En pilares circulares toda el área del pilar está confinada. En pilares rectangulares, se forman unos arcos de descarga entre los que queda el área confinada, como vemos en los ejemplos, cuanto más parecidos son los lados del pilar, más cuadrado, mayor es su efectividad. Este tipo de refuerzo se desaconseja en pilares apantallados ya que su efecto es casi nulo.

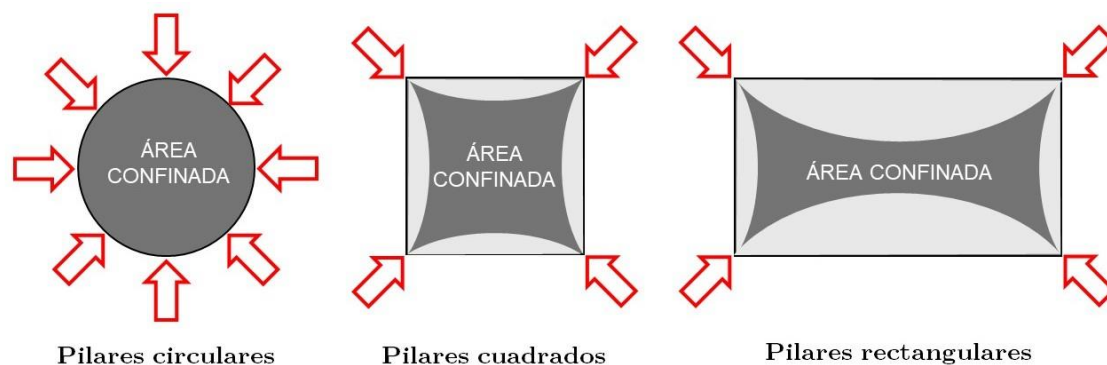


Figura 2.3. Confinamiento de pilares

2.3.2 Refuerzos a flexión

Los materiales compuestos empezaron a utilizarse en la década de 1990 como alternativa a la chapa metálica adherida a vigas y losas. Se emplean para el refuerzo de vigas de hormigón armada, de madera y paños de fábrica ante acciones perpendiculares a su plano.

En ellos, se aprovecha la resistencia a tracción de las fibras, por lo que el elemento reforzado queda enteramente comprimido y la tracción es soportada por el refuerzo. La posición del refuerzo depende de los esfuerzos a los que esté sometido el elemento, colocándose siempre en la cara traccionada. En la Figura 2.4 se pueden ver las configuraciones de refuerzo de una viga con FRCM.

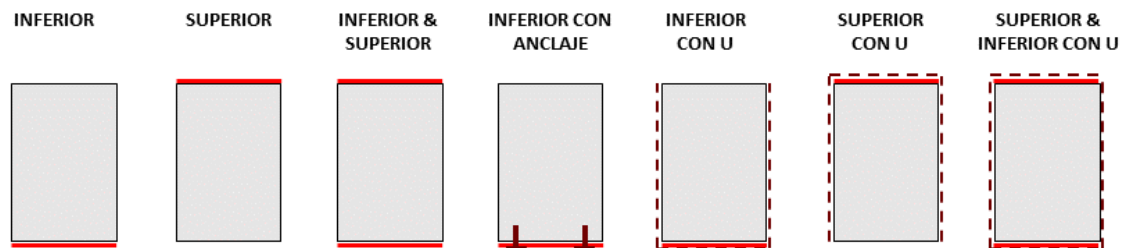


Figura 2.4. Posición de los refuerzos a flexión

2.3.3 Refuerzos a cortante

Los refuerzos a cortante se suelen usar junto a los refuerzos a flexión. Generalmente, se refuerzan vigas de canto de sección rectangular y vigas en T de hormigón, aunque también muros de fábrica y vigas de madera.

La configuración geométrica puede ser envoltura completa o de forma más común en forma de U. La envoltura completa es más compleja de ejecutar, ya que las vigas no suelen estar exentas y, por tanto, precisaría realizar perforaciones en el forjado. Para que el refuerzo a cortante funcione de forma correcta es necesario anclar el composite a la capa de compresión. La Figura 2.5 muestra el refuerzo de una viga exenta, el refuerzo de envoltura completa mediante perforaciones y el refuerzo en U anclado.

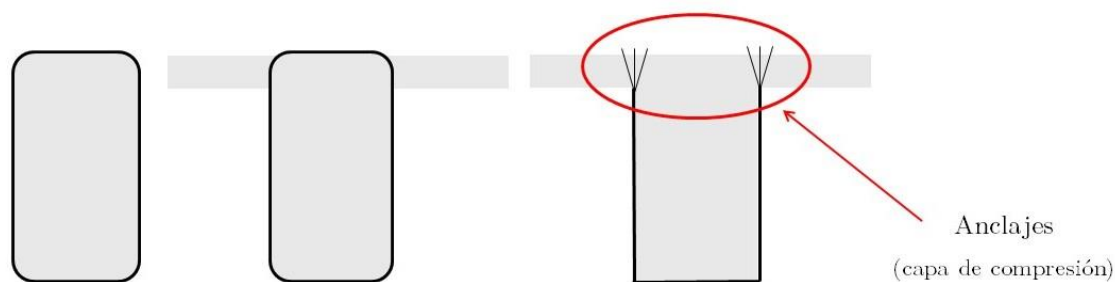


Figura 2.5. Esquema de refuerzos a cortante

La contribución del composite al cortante se suele tener en cuenta como un elemento extra, por ejemplo, la CNR-DT 215 (2018) [24] para FRCM en el cálculo contempla tres sumatorios, uno debido al hormigón, otro al acero de los cercos, y un tercero al composite. La contribución del composite depende de la posición del refuerzo, la cantidad de composite, la cantidad de fibras y la rigidez de las fibras y deformación del composite.

2.4 Comportamiento mecánico y modos de fallo de los sistemas de FRCM

Las propiedades mecánicas de los sistemas de FRCM es necesario asignarlas mediante ensayos antes de realizar un refuerzo. Las propiedades pueden diferir considerablemente entre sistemas, dependiendo de las características de la malla y la matriz, de la interacción entre ambas, así como con el soporte. Puede decirse que dicha variabilidad, además de muy superior a la de los FRP, todavía no cuenta con suficiente experiencia para conocer los valores habituales de cada sistema. La unión entre los componentes tiene gran influencia en el comportamiento general del composite, controlando el mecanismo de transferencia de la carga y siendo la responsable del fallo prematuro. Las matrices inorgánicas, debido al mayor tamaño de sus partículas, pueden no penetrar al interior de los cordones de fibras, por tanto, las fibras del núcleo generalmente no están impregnadas y el comportamiento de las fibras exteriores difiere de las interiores [14,15,25]. Por tanto, los filamentos internos pueden sufrir un deslizamiento (comportamiento telescópico) que se puede prevenir empleando sistemas de recubrimientos e impregnaciones que puedan penetrar dentro del cordón.

Además, estos recubrimientos sirven para proteger las fibras y mejorar la adherencia con la matriz [14,16].

Típicamente, los sistemas de FRCM muestran una curva idealizada tensión-deformación bajo tracción bilineal o trilineal como se muestra en la Figura 2.6. Cada rama corresponde a un estado de fisuración. La primera fase (Estado A) es elástica, la matriz sin fisurar soporta la carga y la rigidez del sistema se supone similar a la del mortero. Cuando se alcanza la resistencia a tracción del mortero, la primera fisura aparece y comienza la segunda fase (Estado B). La pendiente de la curva decrece durante esta fase y la carga es transferida principalmente de la matriz a las fibras embebidas. En la última fase (Estado C), cuando la matriz está completamente fisurada, las fisuras existentes solo aumentan su anchura; en esta fase el tejido es el responsable de soportar toda la carga, por lo que la rigidez y resistencia a tracción están relacionadas con las propiedades de la malla [3,6,26,27]. La tercera fase puede no estar presente dependiendo del deslizamiento de las fibras en la matriz, especialmente en composites con matrices de baja resistencia [3,11,27,28].

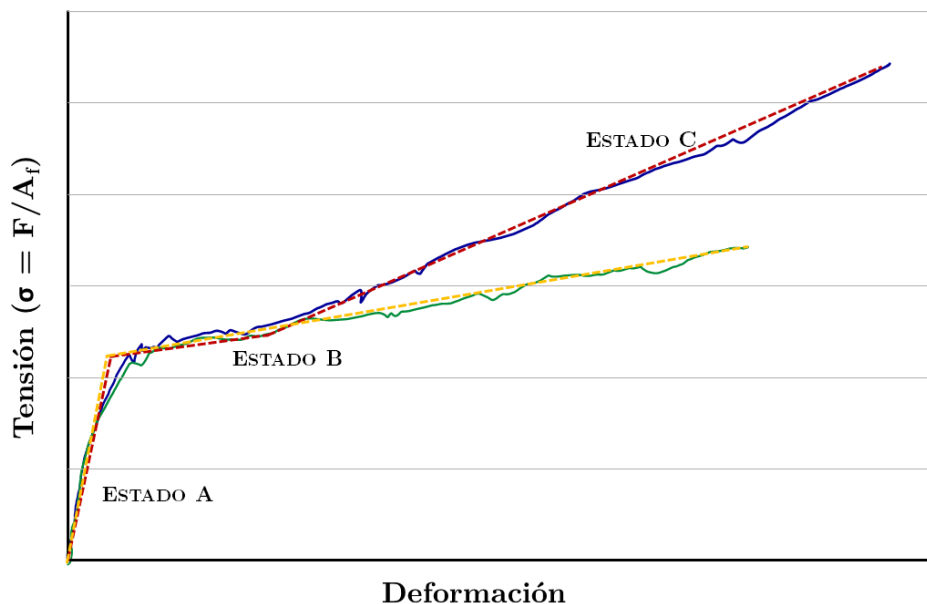


Figura 2.6. Curva típica tensión-deformación para los sistemas de FRCM

Además de evaluar el comportamiento a tracción de los composites, es necesario evaluar el comportamiento de los FRCM junto al soporte [24,29,30].

Aunque se puedan realizar distintos ensayos, como los ensayos a cortante más generalizados en muros de fábrica reforzados o los ensayos a flexión en vigas de hormigón, los modos de fallo son comunes. La Figura 2.7 muestra los seis modos de fallo, a diferencia de los composites FRP que suelen fallar por un despegue del soporte (modos de fallo A y B), los sistemas de FRCM suelen fallar por el despegue en la interfaz matriz-tejido (modo de fallo C).

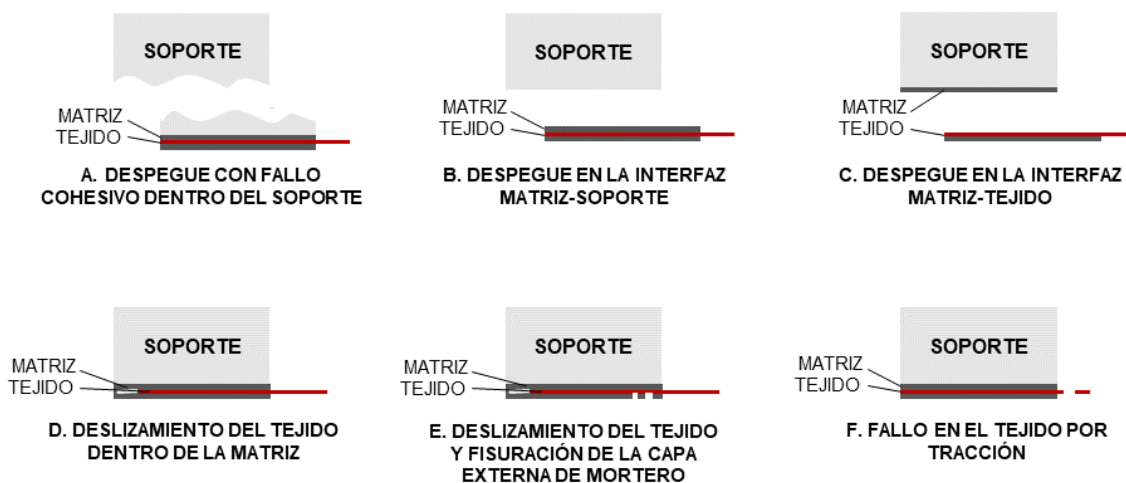


Figura 2.7. Modos de fallo

Los principales ensayos que se realizan en FRCM son *pull-out*, ensayos de tracción, ensayos a cortante, ensayos a flexión y ensayos de elementos de fábrica reforzados. Algunos de ellos se emplean, como se ha comentado, para caracterizar el propio material. Otros son necesarios para evaluar el comportamiento del composite cuando se emplea sobre un determinado soporte e, idealmente, sometido a una forma de trabajo concreta similar a la aplicación que se desear realizar.

Los ensayos de *pull-out* consisten en tirar de uno o varios cordones de fibras de la matriz hasta sacarlos. Se utilizan para estudiar la adherencia entre las fibras y la matriz, obteniendo una ley de adherencia-deslizamiento llamada Ley de material cohesivo (*Cohesive Material Law CML*) generalmente trilineal. Se pueden embeber uno o varios cordones en matrices con forma prismática o circular. El comportamiento típico de la interfaz se puede dividir en tres fases, la primera que corresponde con la fase inicial elástica ascendente es la adherencia química entre el cordón y la matriz. Una

vez alcanzada la tensión máxima de adherencia, empieza la segunda fase y el deslizamiento, en la que en el cordón embebido hay dos zonas, solo una con adherencia química. La tensión de adherencia máxima se desplaza a zonas internas del cordón.

Los ensayos a tracción están recogidos en las guías CNR-DT 215 (2018) [24] y AC 434 (2018) [31] como medio para conocer la tensión y deformación últimas del FRCM. Consiste en ensayar una probeta formada por una capa de malla entre dos capas de matriz a tracción. Las guías incluyen recomendaciones sobre la configuración del ensayo, ya que tienen gran influencia en los resultados. Existen dos tipos principales de ensayos dependiendo del tipo de agarre de las probetas a la máquina, el tipo *clamping* en el que las probetas se agarran mediante una fuerza de compresión [24], y el tipo *clevis* que consiste en pegar unas pletinas a las probetas, las cuales se enganchan a la máquina mediante un pasador.

Los ensayos a cortante (corte simple o doble) se utilizan para conocer la interacción entre el FRCM y el soporte. Estos ensayos están recogidos en las guías [24,29,30], consisten en aplicar el refuerzo FRCM en un soporte dejando parte del tejido sin embeber para tirar. Los resultados obtenidos son una curva tensión-deslizamiento y el modo de fallo. Los resultados obtenidos se utilizan junto a los resultados de tracción para obtener los valores de cálculo.

Los ensayos a flexión no están recogidos en las guías [24,29,30] y las investigaciones que hay sobre ellos son diversas, por lo que es imposible comparar resultados, ya que hay multitud de parámetros que participan en el comportamiento de vigas reforzadas. Cuando los ensayos a flexión se hacen sobre vigas de hormigón armado reforzadas exteriormente con FRCM, el momento aplicado se distribuye entre el hormigón, la armadura y el composite, por lo tanto, hay que es difícil calibrar el esfuerzo al que está sometido el tejido. Algunas de las características más diferenciadoras son los tipos de ensayos (tres o cuatro puntos) y la posición del refuerzo (Figura 2.4).

Los ensayos en elementos de fábrica reforzados con FRCM se clasifican en dos categorías principales, los ensayos con carga en el plano y fuera del plano (Figura 2.8). Los ensayos con acciones en el plano se dividen a su vez en ensayos a compresión diagonal, a flexión y cíclicos. Los ensayos con cargas fuera del plano se diferencian principalmente por el modo de carga. Los ensayos a compresión diagonal en el plano proveen información sobre el mecanismo de fallo de fisura diagonal que corresponde al modo de fallo por cortante, en ellos se estudia el incremento de la resistencia y rigidez a cortante y la pseudo-ductilidad del panel. Los ensayos a flexión en el plano de elementos de fábrica son menos comunes, consisten en aplicar una carga vertical en la zona superior que representa las cargas típicas de la estructura y una carga horizontal cíclica que representa las acciones sísmicas, y se utilizan para determinar la capacidad de disipación de energía, ductilidad y resistencia a cortante.

Los ensayos de elementos de fábrica con carga fuera del plano se realizan ya que es el mecanismo de colapso habitual tras un terremoto, especialmente en edificaciones de gran altura o esbeltez y con forjados flexibles. Se trata generalmente de ensayos de flexión de 3 o 4 puntos, con cargas distribuidas o excéntricas, en los que la carga se aplica de forma monotónica, procedimientos de carga-descarga y cíclica.

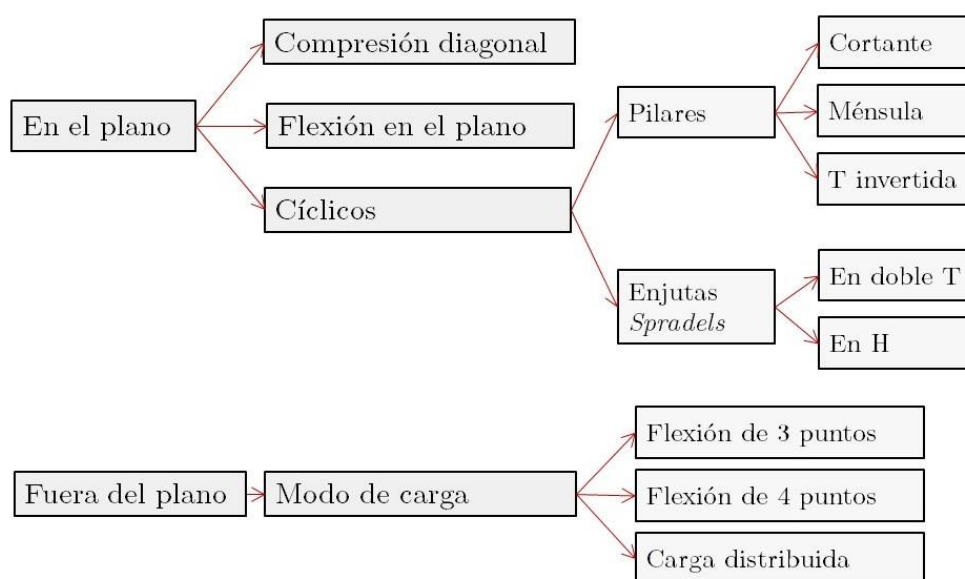


Figura 2.8. Tipos de ensayos en elementos de fábrica reforzados con FRCM

2.5 Guías y códigos de diseño de refuerzos de FRCM

La cantidad de guías y normativas respecto al refuerzo de FRCM son menores y están menos desarrolladas que las correspondientes a refuerzos con sistemas FRP. En Europa está la guía italiana CNR-DT 215 (2018) [24] que es gratuita y tiene versión en inglés y español, además de la italiana. En América está la ACI-549.4R-20 (2020) [29] y ACI-549.6R-20 (2020) [30] para el refuerzo de estructuras de hormigón y fábrica, respectivamente. Además, existe la AC434 (2018) [31] que contiene la descripción de ensayos.

2.5.1 CNR-DT 215(2018). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded Fibre Reinforced Inorganic Matrix Systems for Strengthening Existing Structures

La finalidad de la Guía CNR-DT 215 (2018) es proporcionar un documento orientado al diseño, le ejecución y el control de refuerzos con FRCM tanto para cargas gravitacionales como sísmicas, aunque al tratarse de una guía no es de obligado cumplimiento.

El documento contiene los siguientes apartados: materiales FRCM, una reseña de aplicaciones significativas, conceptos básicos de refuerzo con FRCM y cuestiones especiales, refuerzo de estructuras de fábrica, refuerzo de estructuras de hormigón armado, detalles constructivos, mantenimiento y reparación, control y monitorización, ensayos en modelos estructurales, referencias bibliográficas y ejemplos numéricos. Además, incluye dos apéndices con un ejemplo de cálculo en el plano y la verificación de la adherencia en una estructura curvada.

En el primer capítulo, referente a los materiales FRCM para refuerzo de estructuras, se describen las nomenclaturas por las que se conocen los FRCM, los constituyentes (fibras y matrices) y las ventajas de estos sistemas. En el siguiente apartado del capítulo, se describen las aplicaciones más significativas tanto en mampostería (refuerzo de paneles, de bóvedas y arcos y confinamiento de pilares) como en hormigón armado (refuerzo a flexión de vigas, pilares y viguetas de losa, refuerzo a cortante de vigas y pilares, confinamiento de pilares y refuerzo de conexiones vigas-pilares y de losas).

El último apartado, referido a las características mecánicas, es uno de los más importantes; en él se describe la curva tensión-deformación, modos de fallo y las propiedades que definen los sistemas de FRCCM.

El siguiente capítulo está dedicado al diseño y cálculo de refuerzos estructurales. La obtención de los valores de cálculo mediante los resultados de los ensayos y las correcciones que deben hacerse según la exposición ambiental a la que estén sometidos.

El diseño y cálculo de los refuerzos de estructuras de fábrica se describen en el cuarto capítulo de la guía. La información está dividida en un apartado para el refuerzo de muros con cargas en el plano (capacidad cortante y a flexo-compresión) y otro para refuerzos fuera del plano. Además, hay un apartado dedicado a vigas de coronación, otro al confinamiento de pilares (circulares y rectangulares) y un último apartado para estructuras curvadas.

El siguiente capítulo está dedicado a las estructuras de hormigón armado, dividido en apartados según se trate de refuerzos a flexión, refuerzos a cortante y confinamiento de pilares.

La aplicación y posición de los refuerzos FRCCM son muy condicionantes en cuanto a la eficacia del sistema; por este motivo, la guía tiene un capítulo dedicado a los detalles constructivos. Otros aspectos importantes son el mantenimiento y reparación, y el control de calidad antes de la aplicación. Además, la guía contiene un capítulo sobre los ensayos que se pueden hacer, cuando son convenientes, y cómo reportarlos, y otro capítulo con las referencias bibliográficas utilizadas para realizar la guía.

La guía contiene también unos ejemplos numéricos de cálculo. El primero es el ejemplo de refuerzo de muros de fábrica con cargas en el plano, calculadas a cortante y a flexo-compresión. El siguiente ejemplo corresponde a el refuerzo de muros con cargas fuera del plano y el último ejemplo de estructuras de fábrica corresponde a un pilar confinado. Además, contiene el cálculo de los refuerzos de una viga de hormigón con el refuerzo a flexión y

otro con el refuerzo a cortante, así como los cálculos del confinamiento de un pilar de hormigón.

El primer apéndice incluye el cálculo del momento resistente a flexo-compresión en el plano y el segundo sobre el cálculo de adherencia del refuerzo al soporte en el caso de que la estructura sea curva.

2.5.2 AC434. Acceptance criteria for masonry and concrete strengthening using fiber-reinforced cementitious matrix (FRCM) composite systems

El objetivo de la AC434 [31] es establecer unos criterios mínimos que determinen los sistemas FRCM, evaluando sus propiedades como las capacidades mecánicas a tracción, flexión y cortante, el comportamiento bajo exposiciones ambientales, el comportamiento en caso de incendio y los procedimientos de cálculo estructural.

La guía comienza con un capítulo de introducción en el que se detallan los objetivos, las guías y normas relacionadas y se definen los conceptos clave para la comprensión de la norma. El segundo capítulo contiene la información básica requerida para definir un sistema FRCM, como la descripción del producto, las instrucciones de instalación, la preparación del soporte, los ensayos e informes. El siguiente capítulo contiene la información mínima requerida de los planes de ensayo.

Los capítulos 4 y 5 se refieren a los ensayos necesarios para determinar un FRCM. El capítulo 4 contiene los ensayos que deben realizarse en los materiales que forman el FRCM, así como a probetas de FRCM ensayadas a tracción uniaxial, y de adherencia con el soporte. Mientras que los ensayos descritos en el capítulo 5 se refieren a elementos estructurales reforzados con FRCM como los ensayos de muros de fábrica con cargas en el plano y fuera de él, ensayos a flexión en vigas, pilares confinados y losas de hormigón.

Los siguientes capítulos están dedicados a los requisitos básicos que se deben cumplir para poder comercializar un sistema FRCM. El capítulo 6 trata el control de calidad, mientras el 7 detalla los contenidos mínimos del

informe. El capítulo 8 contiene los criterios mínimos de cálculo aceptables. El último capítulo está dedicado a la nomenclatura empleada en la guía.

La guía, además, contiene un anexo en el que se describe de manera detallada el ensayo a tracción uniaxial de probetas de FRCM. Se describen las probetas, la configuración del ensayo (*clevis*) y el cálculo de la curva idealizada bilineal con todos sus parámetros.

2.5.3 ACI 549.4R-20. Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix and Steel-Reinforced Grout Systems for Repair and Strengthening of Concrete Structures

La guía ACI 549.4R-20 (2020) [29] es la nueva versión de la guía ACI 549.4R-13 (2013) [32], en esta nueva versión dedicada únicamente al refuerzo de estructuras de hormigón. Este documento, además del refuerzo con FRCM, está dedicada al refuerzo con SRG (*Steel-reinforced grout*) que está formada por una malla de fibras de acero galvanizado embebida en una matriz inorgánica.

Los dos primeros capítulos de esta guía están dedicados a la introducción, objetivos, notación y definiciones de los términos principales. Contiene la información básica para poder comprender la información de la guía.

El capítulo tres es un estado del arte de los sistemas FRCM y SRG. Contiene una comparación con los FRP, además de un repaso sobre la evaluación de los FRCM, recogiendo ejemplos de investigaciones y resultados clave en diferentes aplicaciones.

Varios ejemplos de refuerzos de estructuras de hormigón están recogidos en el capítulo cuatro. Las aplicaciones ilustradas son diversas, algunas de ellas son en bóvedas de hormigón en masa, refuerzo de una viga de hormigón armado o refuerzo de una losa en flexión.

El capítulo cinco empieza describiendo los materiales constituyentes de los sistemas (fibras y matriz), con investigaciones sobre algunas de sus características. El siguiente apartado está dedicado a los ensayos, seguido de otro con las propiedades físicas y mecánicas. El último apartado corresponde a la durabilidad.

Las condiciones de envío, almacenamiento y manejo están recogidas en el capítulo seis. Mientras que la instalación descrita mediante las cualificaciones del contratista, las consideraciones ambientales, el equipamiento y la reparación, preparación del soporte, aplicaciones de los sistemas, alineación de los refuerzos, aplicación de varias capas y solapes, las condiciones de curado y la protección temporal están descritas en el capítulo siete.

El capítulo ocho se dedica a la inspección, evaluación y aceptación y en el capítulo nueve al mantenimiento y reparación. Los capítulos diez y once están dedicados a las condiciones generales del diseño y cálculo de los refuerzos y a los detalles constructivos. Los apartados que componen este capítulo son la filosofía de diseño, las resistencias límite, la selección de los sistemas FRCC/SRG, las propiedades de cálculo y la adherencia y delaminación.

Los refuerzos de distintos elementos de hormigón se recogen en el capítulo doce. El primero es el cálculo de los refuerzos a flexión, seguido de los refuerzos a cortante y, por último, el cálculo de refuerzos a compresión. Los últimos apartados del capítulo son sobre las características y requerimientos que deben seguirse para el cálculo.

El capítulo trece contiene las referencias usadas para la redacción de esta guía. El documento termina con un apéndice con las propiedades de las fibras de los sistemas comerciales disponibles y con otro apéndice con las limitaciones de cálculo.

2.5.4 ACI 549.6R-20. Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) and Steel-Reinforced Grout (SRG) Systems for Repair and Strengthening Masonry Structures

La guía ACI 549.6R-20 (2020) [30] es la versión actual de la guía americana ACI 549.4R-13 (2013) [32] dedicada a los refuerzos de estructuras de fábrica. Este documento sigue la misma estructura que la guía ACI 549.4R-20 [29]. Los primeros capítulos, aunque contienen prácticamente la misma información, tienen ligeras diferencias. En este documento la información general de los sistemas está recogida hasta el capítulo seis, a partir del siete empieza la información dedicada a los refuerzos de estructuras de fábrica.

Hay un capítulo dedicado al cálculo de los refuerzos de muros con cargas fuera del plano, otro al cálculo de refuerzos con cargas es el plano, seguido por uno con el cálculo del confinamiento de pilares y otro para el refuerzo de bóvedas.

El capítulo once se dedica a los detalles constructivos, planos, especificaciones y presentaciones de los refuerzos FRCM. Este capítulo tiene los siguientes apartados: la adherencia y delaminación; los conectores transversales contra la separación de la hoja; requisitos de ingeniería; planos y especificaciones; suministros; control de calidad; y, por último, inspección y evaluación.

El capítulo doce contiene ejemplos de cálculo y el último capítulo contiene las referencias utilizadas para escribir la guía. Los ejemplos de cálculo se realizan mediante el *software MathcadTM* con el enfoque propuesto en la propia guía ACI y el propuesto por el RILEM (también explicado dentro de la guía). Primero se realiza el cálculo de un refuerzo a flexión de un muro de fábrica con cargas fuera del plan; seguidamente del cálculo de una viga de coronación de fábrica con el composite situado en los tendeles; el siguiente, corresponde al refuerzo a córtate de un muro de fábrica con las cargas en el plano; a continuación, al refuerzo de un pilar de fábrica sometido

exclusivamente a cargas axiales mediante su confinamiento; y por último, el refuerzo a flexión de un arco de fábrica sometido a una carga puntual.

2.6 Sostenibilidad de las estructuras

En todo el mundo, los edificios y obras públicas se están enfrentando a serios problemas de durabilidad como resultado de la llegada del final de su vida útil. Esto, justo a una creciente preocupación por el medio ambiente que pretende reparar y mantener las estructuras existentes dañadas y envejecidas en lugar de construir otras nuevas, ha dado lugar a un aumento considerable del presupuesto de las obras de mantenimiento, rehabilitación y reparación [33,34]. En este contexto, el uso de materiales de reparación ha aumentado considerablemente, como medio de proveer reparaciones al hormigón dañado y prevenir futuras corrosiones de la armadura. La efectividad de las reparaciones depende de las propiedades intrínsecas de los morteros de reparación seleccionados, el ambiente de exposición y la compatibilidad hormigón-mortero. Actualmente, se está buscando emplear materiales de refuerzo que, además, protejan las estructuras. En este sentido, la utilización de materiales compuestos con matriz cementosa, FRCM, es un método viable, ya que, por un lado, protegen la estructura gracias al mortero de la matriz y, por otro, incrementan su capacidad portante.

La compatibilidad de los morteros de reparación se puede definir como la combinación apropiada del material añadido y el soporte de hormigón existente asegurando que el sistema combinado soporte la carga aplicada y mantenga la integridad estructural y durabilidad [35]. Esto puede ser un aspecto clave cuando las estructuras están sometidas a condiciones ambientales extremas. Como señalaron Mirza et al. [36], los morteros epoxi pueden exhibir un peor comportamiento por no ser térmicamente compatibles con el hormigón y tener mala adherencia en soportes húmedos. Por otra parte, los morteros de reparación cementicios, con o sin polímeros, se utilizan de forma generalizada, ya que poseen capacidades superiores de adherencia e impermeabilización, junto con la compatibilidad necesaria con los soportes de hormigón [36,37]. Algunos estudios también han incluido

materiales con activación alcalina como sistemas alternativos con buenas propiedades mecánicas y durables [33]. Dado que la durabilidad de los morteros de reparación es motivo de gran preocupación, la inclusión de polímeros en las mezclas a base de cemento como forma para mejorar simultáneamente la resistencia mecánica, la adherencia, la elasticidad, la impermeabilidad y la durabilidad de los morteros [38].

Tradicionalmente, se consideraba que la porosidad era el principal indicador que controlaba la durabilidad de los morteros. Sin embargo, estudios recientes han revelado que la permeabilidad al gas tiene buena correlación con los indicadores de durabilidad de los materiales cementicios, destacando también la relación entre la permeabilidad de gas y la distribución y complejidad de poros y la conectividad de la red porosa [39]. La penetración de cloruros, el perfil de carbonatación y la resistividad eléctrica son técnicas comunes para evaluar el comportamiento a largo plazo de materiales cementicios.

Los morteros de reparación se pueden asociar con materiales de refuerzo para proporcionar una resistencia y ductilidad adicional, además de proteger la estructura mediante la restauración de la capa de pasivación. En este sentido, los sistemas de *Fiber Reinforced Cementitious Matrix* (FRCM) pueden usar morteros de reparación, proporcionando así una reparación y protección real a una superficie de mampostería u hormigón.

Capítulo 3. Planteamiento de la investigación

El planteamiento de investigación pretende, por una parte, desarrollar materiales compuestos FRCM para su aplicación a refuerzos estructurales con propiedades mejoradas. Para ello se han planteado dos tipos de ensayos: ensayos a tracción del material compuesto y ensayos de durabilidad de los morteros empleados como matrices. El objetivo es conseguir desarrollar sistemas de refuerzo que sirvan al mismo tiempo para proteger el soporte, y con un óptimo comportamiento en términos de adherencia-fibras matriz, aspecto crítico en la idoneidad y aprovechamiento de las propiedades mecánicas de las fibras en este tipo de refuerzos.

Los ensayos de tracción emplean para su comparación, como se ha comentado anteriormente, dos tipos de fibras como malla de refuerzo. El objetivo en este caso es evaluar cuál presenta un mejor comportamiento tanto en términos de resistencia a tracción como en la curva tensión-deslizamiento, partiendo de las observaciones del estudio bibliográfico reseñado en este documento. Los estudios de durabilidad emplean diversas técnicas generalmente aceptadas para evaluar parámetros de propiedades durables en hormigones y morteros, con vistas a aportar soluciones que extiendan la vida útil de las estructuras.

Los ensayos a flexión conforman una parte importante dentro de la caracterización de materiales compuestos FRCM. Como se ha comentado anteriormente, los modos de fallo de estos sistemas de refuerzo pueden ser diversos, y el comportamiento debe evaluarse en términos del material (ensayos a tracción) y de su aplicación a un soporte completo.

El estudio y análisis de los resultados experimentales y de los datos aportados por otros autores permite extraer conclusiones interesantes en cuanto a caracterización de los sistemas de refuerzo. Sin embargo, la modelización numérica aparece como un aspecto importante para evaluar la capacidad de reproducción de este comportamiento. En la presente investigación se ha adoptado una hipótesis de macro-modelización con elementos finitos en la que se ha evaluado la capacidad del modelo, para reproducir los resultados experimentales en vigas a partir de los datos de caracterización básica del material (es decir, de los resultados de ensayos a tracción), sin modelar la interfaz FRCM-soporte de forma independiente.

El esquema resumen de las distintas fases que integran la investigación se recoge a continuación (Figura 3.1).

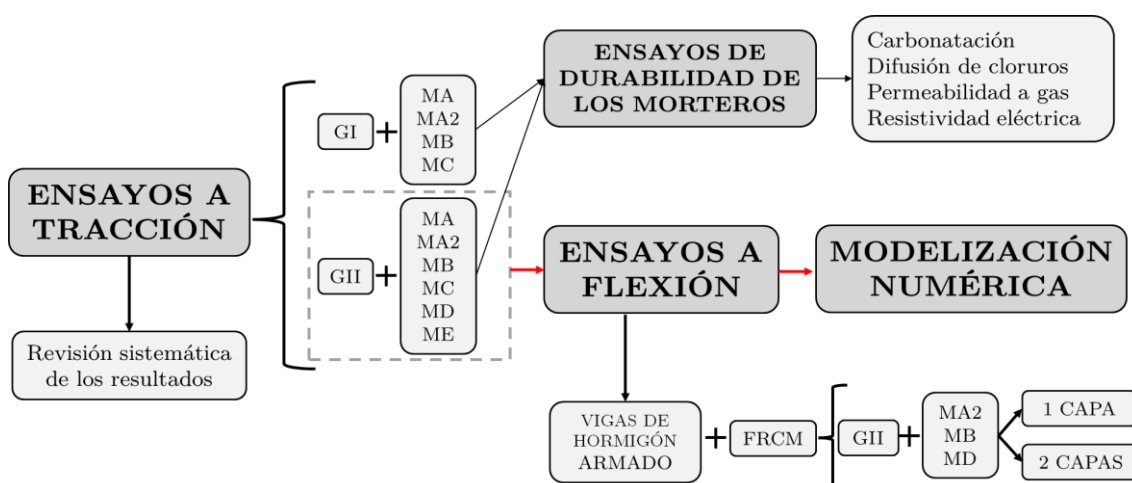


Figura 3.1. Fases que forman la investigación.

En la primera fase de la investigación, se realizó una primera campaña experimental sobre durabilidad, en la cual, dos morteros Portland convencionales de dos resistencias diferentes (MA y MA2) y cuatro morteros de reparación: con poliuretano y fibras (MB), con fibras largas (MC), con polímeros (MD) y con resina epoxy (ME), se ensayaron a compresión y a flexión para conocer sus propiedades mecánicas. Adicionalmente, se ensayaron a carbonatación, difusión de cloruros, permeabilidad a gas y resistividad eléctrica para estudiar sus propiedades durables cuando están sometidos a diferentes ambientes. Estos morteros fueron aplicados como matrices de los sistemas de FRCM en los ensayos a tracción.

En la segunda fase de la investigación, se realizaron los ensayos de tracción uniaxial de los sistemas FRCC. En ellos, probetas prismáticas con una capa de tejido se someten a tracción para conocer su comportamiento con las curvas tensión-deformación y poder analizar los parámetros más influyentes en cuanto a la resistencia máxima alcanzada y adherencia entre matriz y tejido. Como se ha comentado anteriormente, se emplean dos tipos de mallas, ambas de carbono, cuya principal diferencia reside en el recubrimiento de las fibras. Estos tejidos se combinan con los 6 morteros estudiados a durabilidad en la fase anterior, para comprobar cómo afectan las propiedades del mortero en el comportamiento global del composite.

En la tercera fase, con los resultados de los ensayos a tracción, se selecciona la matriz de ensayos a flexión. Se aplican una o dos capas del sistema seleccionado en vigas de hormigón para estudiar la adherencia de los morteros en las vigas y el comportamiento global de las vigas reforzadas. En este caso, se seleccionaron tres morteros y una única malla debido a la mayor limitación del número de ensayos que es posible realizar debido al coste y la dificultad. Se ha empleado la malla de carbono impregnada, junto con el mortero tradicional de mayor resistencia (MA2) y los morteros de reparación (MB y MD), ya que son las combinaciones con mejores resultados en los ensayos a tracción y que abarcan una mayor disparidad de los materiales.

La última y cuarta fase de la investigación corresponde a un estudio mediante simulación numérica de las vigas reforzadas con FRCC. Se modelan vigas de hormigón lo más similares posible a las ensayadas en la campaña experimental. Por un lado, se modelan vigas sin el composite para comparar la precisión del modelo del soporte y, a continuación, se aplica una capa de composite como refuerzo. En este caso, de los resultados obtenidos en los ensayos de flexión se ha optado por las vigas reforzadas con el FRCC con matriz de mortero convencional (MA2) y la matriz con el mortero de reparación de mejores resultados (MB). Dado que con el enfoque macro-modelado, se han empleado los resultados de los ensayos a tracción que eran de una capa, la simulación se ha realizado en vigas con una capa de refuerzo.

La descripción de cada campaña experimental, los materiales, los resultados obtenidos y su discusión se exponen en cada capítulo de manera independiente. También se incorpora la parte concreta del estado del arte, dado que cada fase ha investigado un tema concreto que tiene bibliografía muy específica.

La parte general del estado del arte se ha expuesto en el *Capítulo 2*.

Capítulo 4. Descripción de los materiales, plan experimental y resultados de los ensayos de durabilidad realizados a las matrices

4.1 Introducción

Los sistemas FRCM están formados por un tejido embebido en una matriz cementosa. A continuación, se describen los tejidos y las matrices utilizados en la investigación. Se han empleado dos tipos de tejidos de carbono, uno sin recubrimiento y otro con él, de los que se describe su composición, sus características y sus propiedades mecánicas. Respecto a las matrices, se han empleado dos tipologías de morteros, morteros de albañilería convencionales y morteros de reparación mejorados. En total seis morteros diferentes se han estudiado como matrices.

El objetivo es estudiar las diferentes propiedades que afectan a los morteros de reparación que pueden aplicarse como matrices de materiales compuestos. Obteniendo, por lo tanto, una tecnología que proporcione una protección adecuada al soporte de hormigón, aumentando su durabilidad, mientras mejora el comportamiento mecánico. Se han estudiado las propiedades mecánicas mediante ensayos de compresión y flexión, y las propiedades durables mediante ensayos de carbonatación, de penetración de cloruros, de resistividad eléctrica y de permeabilidad de gases de los morteros empleados como matrices. Además, se ha realizado un análisis del ciclo de vida para tener una comprensión más completa antes de la elección del material más adecuado para cada aplicación.

4.2 Tejidos

Durante la investigación, se han utilizado dos tipos de mallas ortogonales de carbono como refuerzo del FRCM. Ambos tejidos son bidireccionales de alta resistencia, con fibras de carbono balanceadas no tejida. La primera malla ensayada (GI) es no-recubierta, con un peso de carbono de 168 g/m² y un espaciado nominal de 10 mm (Figura 4.1.a). La segunda malla (GII) se impregna con una resina acrílica durante la fabricación, con un peso de carbono de 208 g/m² y un peso de vidrio de 18 g/m² (Figura 4.1.b). La función principal de la fibra de vidrio es servir como guía y soporte durante la fabricación. La mayor estabilidad geométrica de la malla GII facilita la alineación de las fibras durante el proceso de fabricación de las probetas.

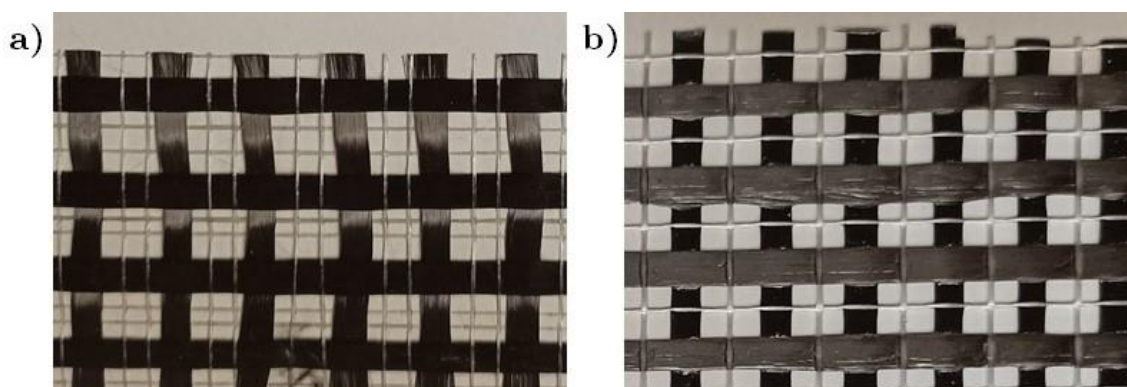


Figura 4.1. Mallas de carbono empleadas en la investigación: a) GI; b) GII

El espesor y los valores nominales de la tensión última ($\sigma_{u,f}$), el módulo de Young (E_f) y la deformación última a tracción ($\epsilon_{u,f}$) de las fibras en seco proporcionadas por el fabricante se recogen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Propiedades mecánicas de la malla

Malla	GI	GII
Espesor (mm)	0,047	0,057
$\sigma_{u,f}$ (MPa)	4800	3600
E_f (GPa)	240	223
$\epsilon_{u,f}$	1,8%	1,55%

4.3 Matrices: morteros

Los morteros utilizados como matrices de los sistemas de FRCM se ensayaron para comparar sus propiedades mecánicas y su durabilidad. De las

mezclas empleadas como matrices, cuatro son diseñadas para la reparación de estructuras de hormigón y dos son morteros convencionales de albañilería. De uno de los morteros de reparación (MC) solo se estudiaron sus propiedades mecánicas a los 28 días por problemas de disponibilidad. Además, para comparar los resultados de los ensayos de durabilidad se utiliza un hormigón de referencia de cemento Portland.

Los ensayos mecánicos incluyen ensayos de flexión y compresión. La durabilidad de los morteros se evalúa mediante ensayos de carbonatación, de difusión de cloruros, de resistividad eléctrica y de permeabilidad a gases. Adicionalmente, se realiza un análisis del incremento de vida útil con los resultados obtenidos de los ensayos de carbonatación y difusión de cloruros.

De cada mortero se prepararon 12 probetas prismáticas (40 x 40 x 160 mm) y 3 probetas cilíndricas (base de diámetro de 100 mm y altura de 200 mm) para los ensayos mecánicos y de durabilidad. Con el mortero MC solo se prepararon 3 probetas para los ensayos mecánicos a los 28 días. De las probetas prismáticas, 9 se utilizaron en ensayos mecánicos y 3 en ensayos de carbonatación. Los cilindros se utilizaron en el ensayo de resistividad eléctrica, el ensayo de penetración de gases y en el ensayo de cloruros.

4.3.1 Descripción de los morteros

Se han seleccionado 6 tipos de morteros cementicios como matrices de los sistemas de FRCM. Dos morteros son morteros convencionales de albañilería utilizados como valor de referencia (MA y MA2) y los otros 4 son morteros mejorados, productos tecnológicos diseñados específicamente para reparación (MB, MC, MD y ME).

MA y MA2 son morteros convencionales fabricados con cemento Portland con una resistencia de 42,5 MPa y áridos hasta 4 mm. MA no se trata de un mortero normalizado con una proporción material cementicio arena de 1:6 (275 kg de cemento, 1654 kg de arena y 275 kg de agua por m³). MA2 es un mortero con una proporción material cementicio arena de 1:3 de acuerdo con la UNE-EN 197-1:2011 [40] (551 kg de cemento, 1583 kg de

arena y 263 kg de agua por m³). Los morteros convencionales de cemento Portland se prepararon de acuerdo a las indicaciones de la UNE-EN 196-1:2018 [41].

MB, MC, MD y ME son morteros especialmente predosificados para la reparación de estructuras con distintas tecnologías, ya que están formulados para aplicaciones diferentes (Figura 4.2). Todos están diseñados para aplicaciones estructurales, correspondiendo el MB y el ME a la categoría R4 de morteros de reparación según la UNE-EN 1504-3:2006 [42], y el MC y el MD a la categoría R3. MB es un mortero bicomponente trixotrópico que permite aplicaciones en capas de mayor espesor. Un componente está basado en una dispersión de poliuretano base agua y el otro es la parte cementosa basado en cemento Portland blanco I 52,5 MPa combinado con cemento CSA con aproximadamente 35% de binder, arenas silíceas hasta 2 mm, metacaolín, aditivos antiretracción, desaireantes y aditivos anticorrosión. Además, contiene fibras de hasta 7 mm. MC es un mortero específico para la aplicación del FRCM en hormigón. Contiene en torno a un 50% de cemento Portland y cenizas volantes, con fibras de hasta 14 mm. MD es un mortero monocomponente basado en cemento Portland gris (aproximadamente 30%), aditivos antiretracción, áridos silíceos hasta 1 mm, desaireante, retenedor de agua y polímero redispersable. ME es un mortero epoxi de tres componentes con consistencia tixotrópica. El primer componente se basa en una resina epoxi (una mezcla de bisfenol A y bisfenol F), el segundo componente es un endurecedor (amina) y el tercer componente es una mezcla de cemento Portland blanco y gris con aproximadamente 35 % de binder, arena silícea hasta 0,3 mm, aditivos desaireantes, retenedores de agua y plastificantes; ME se caracteriza por sus buenas propiedades adherentes típicas de los polímeros y su rápido fraguado que permite aplicar más de una capa en cortos periodos de tiempo.

Las principales características de los morteros se recogen en Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Descripción de los morteros

	Descripción	Aplicación	UNE-EN 1504-3:2006	Espesor capa
MA	Cemento Portland CEM II 42.5 MPa, proporción 1:3	Mortero de albañilería	-	-
MA 2	Cemento Portland CEM II 42.5 MPa, proporción 1:6	Mortero de albañilería	-	-
MB	Bicomponente tixotrópico basado en una dispersión de poliuretano	Reparar desconchados y hormigón dañado; aumentar la capacidad portante de la estructura; ser compatible con sistemas de protección catódica.	R4	6-100 mm
MC	Cemento Portland con cenizas volantes y fibras	Ser matriz en sistemas de FRCM aplicados en hormigón, limitar el tamaño de las grietas; reparar pequeños defectos del hormigón	R3	1-5 mm
MD	Cemento Portland gris monocomponente	Reforzar y fortalecer estructuras de hormigón; limitar el tamaño de las grietas; reparar pequeños defectos del hormigón.	R3	1-5 mm
ME	Mortero epoxy con tres componentes	Capa de nivelación; en entornos químicos agresivos; sustratos con alto contenido de humedad; barrera temporal contra la humedad	R4	0,5-3 mm

Además de los morteros aplicados como matrices en los FRCM, se diseñó un hormigón de referencia para los ensayos de durabilidad con una resistencia a compresión deseada de 30 MPa. La dosificación por m³ es de 300 kg de cemento Portland de 52,5 MPa CEM I, 891 kg de arena de sílice hasta 4 mm, 166 kg de árido de grosor medio entre 4 y 10 mm y 890 kg de árido grueso entre 6 y 20 mm. El ratio agua cemento del hormigón es de 0,65 y se preparó siguiendo las indicaciones de la UNE-EN 12390-2:2020 [43].

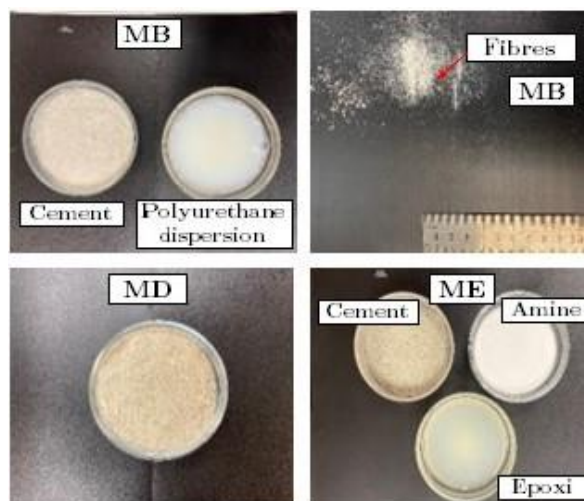


Figura 4.2. Componentes de los morteros de reparación

4.3.2 Ensayos realizados

4.3.2.1 Resistencia a flexión y compresión

La resistencia a flexión y a compresión de los morteros se evaluó mediante ensayos en probetas prismáticas de acuerdo a la UNE-EN 196-1:2018 [41], a los 2, 7 y 28 días de curado en condiciones estándar ($22\pm 2^\circ\text{C}$ y humedad relativa del 99%). Los ensayos se realizaron en una máquina *PROETI HMS CPC* con una capacidad de 200 kN. El protocolo de ensayo consistía en un ensayo a flexión de tres puntos de cada probeta, seguido por un ensayo a compresión de cada mitad obtenida durante los ensayos a flexión.

4.3.2.2 Ensayo a carbonatación

Para el ensayo de carbonatación, se prepararon 3 probetas prismáticas (40 x 40 x 160 mm) de cada mezcla de acuerdo a la UNE-EN 196-1:2018 [41]. Los morteros convencionales (MA y MA2) y el hormigón de referencia (RC) se cubrieron con un plástico inmediatamente tras su vertido. Después, son desmoldados y sumergidos en agua a una temperatura constante $21\pm 2^\circ\text{C}$ durante 27 días. Los morteros de reparación (MB, MD y ME) se preparan con el mismo procedimiento, pero las probetas se envuelven en plástico durante 48 horas y después se curan a temperatura constante de $21\pm 2^\circ\text{C}$ y humedad relativa de $60\pm 10\%$ durante 25 días. Tras el curado, todas las probetas se mantuvieron en una cámara durante 56 días en ambiente agresivo con 1% de concentración CO_2 , temperatura constante de $21\pm 2^\circ\text{C}$ y humedad relativa de $60\pm 10\%$ como indica la UNE-EN 13295:2005 [44]. Después del proceso de carbonatación acelerada, las probetas se partieron con un cincel para hormigón y las superficies transversales expuestas se limpiaron y rociaron inmediatamente con el indicador de fenolftaleína (solución etanólica de fenolftaleína de 70 ml con 1 g de fenolftaleína y 30 ml de agua desmineralizada). La profundidad de carbonatación (d_k) se mide mediante los cambios de color tras 60 min, como la profundidad media de las cuatro caras de la probeta. El uso de la pulverización de fenolftaleína como indicador es una técnica muy extendida que se emplea para caracterizar la profundidad

de carbonatación y comprar las propiedades de durabilidad de las diferentes mezclas [44].

4.3.2.3 Ensayo de difusión de cloruros

El coeficiente de difusión de cloruros se evaluó mediante ensayos en probetas cilíndricas con 28 días de curado en condiciones estándar (temperatura de $22\pm 2^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa de 99%). Todas las caras de las probetas, excepto la superior, se sellan con una resina epoxi bicomponente. El procedimiento se recoge en la Figura 4.3, y el contenido de cloruros se miden de acuerdo a la UNE 14629:2007 [45].

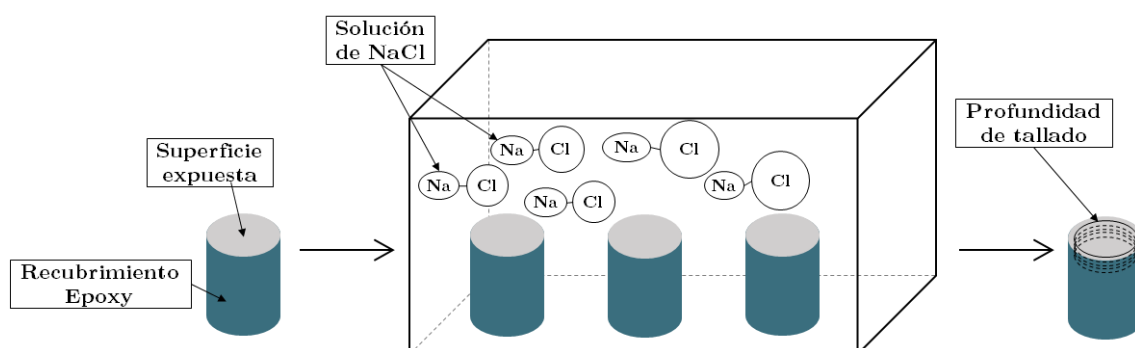


Figura 4.3. Configuración del ensayo de difusión de cloruros

Tras 35 días de inmersión, se extrajeron de cada probeta 10 rodajas de 1 mm de profundidad y se recogieron en formato polvo, utilizando una fresa adaptada a una taladradora. Antes de la medida, las muestras obtenidas de las probetas se secan a temperatura de $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 h, y se colocan en un desecador hasta el análisis para prevenir la rehidratación del polvo.

Las muestras desecadas se filtraron en un matraz al que se incorporaron 2 ml de HNO_3 concentrado con 100 ml de agua destilada, manteniéndose en ebullición durante 180 s. El análisis se ha llevado a cabo en probetas con control de pH con 0,5 ml de $\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2$ y 20 ml de $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$, utilizando un instrumento de medida *Metrohm* que incorpora AgNO_3 con una concentración conocida y constante. El contenido de cloruros libre se puede determinar en función de la cantidad de AgNO_3 que se añade [46].

4.3.2.4 Ensayo de resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica se evaluó de acuerdo a la UNE 83988-1:2008 [47]. Consiste en un ensayo no destructivo en el que se genera un campo eléctrico a través de la probeta con un equipamiento *RCONTM de Giatec* formado por dos platos de acero y un medidor de resistencia. Las probetas cilíndricas se curaron durante 28 días y se humedecieron antes del ensayo. Para conseguir una conexión eléctrica adecuada, se colocaron dos paños húmedos entre la probeta y los platos. El principio de este ensayo es la ley de Ohm, relacionada con la conectividad de los poros, por la que la resistividad eléctrica de un material se define como la oposición al paso de la corriente eléctrica. Como se indicó previamente [48], una red porosa altamente conectada permite la entrada de agentes agresivos, especialmente a edades tempranas. Midiendo la resistencia eléctrica (R) en Ω , la resistencia eléctrica (ρ) se calcula con la ecuación (1) [49]

$$\rho = R \cdot \frac{A_e}{L_e} \quad (1)$$

donde ρ es la resistividad eléctrica, A_e es el área de la superficie de contacto y L_e es la longitud de la probeta.

4.3.2.5 Ensayo de permeabilidad de gases

La permeabilidad del hormigón es una de las principales características para la penetración de agentes agresivos al núcleo del material, y está fuertemente condicionada por la distribución, conectividad y tortuosidad de los poros, así como la presencia de microfisuras [50–52].

Este indicador se evaluó mediante la medida de la permeabilidad del hormigón al paso del oxígeno usando el método Cembureau, siguiendo la UNE-EN 83966:2008 [53] para la preparación de las probetas y la UNE-EN 83981:2008 [54] para determinar la permeabilidad de gas en el hormigón endurecido. Para cada mortero, se realizó el ensayo en tres discos de 100 mm de diámetro y 50 mm de alto obtenidos de una única probeta cilíndrica normalizada curada durante 28 días en condiciones estándar. Después, las probetas se sellaron con una película de polietileno impermeable al vapor y

se mantuvieron en una cámara acondicionada durante 3 días a $50\pm 2^\circ\text{C}$, seguidos de su introducción en un contenedor sellado a $20\pm 2^\circ\text{C}$ con humedad relativa del 65-75% durante 21 días. El proceso del ensayo se muestra en la Figura 4.4.

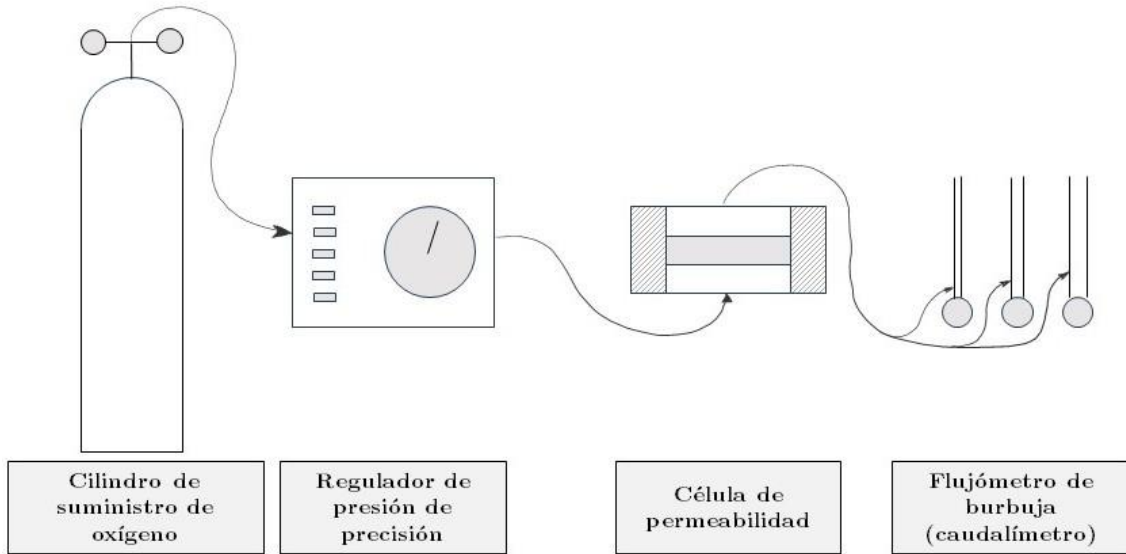


Figura 4.4. Ensayo de permeabilidad de gases

La permeabilidad del aire se calcula con la ecuación (2)

$$K = \frac{2 \cdot Q \cdot p_0 \cdot L_p \cdot \mu}{A_p \cdot (p^2 - p_a^2)} \quad (2)$$

donde K es el coeficiente de permeabilidad del oxígeno [m^2]; Q es el flujo de oxígeno que atraviesa la probeta [m^3/s]; p_0 es la presión para Q [N/m^2]; L_p es el espesor del disco [m]; μ es la viscosidad del oxígeno; A_p es el área de la sección transversal del disco [m^2]; p es la presión aplicada en el ensayo [N/m^2]; y p_a es el valor de la presión atmosférica [N/m^2].

4.3.3 Resultados de la campaña experimental y discusión de resultados

4.3.3.1 Resistencia a flexión y compresión

La Figura 4.5 recoge los resultados medios de los ensayos a flexión y a compresión de los morteros estudiados a diferentes edades (2, 7 y 28 días) con sus barras de error. Las propiedades del hormigón de referencia (RC) obtenidos a los 28 días también se incluyen en la comparación.

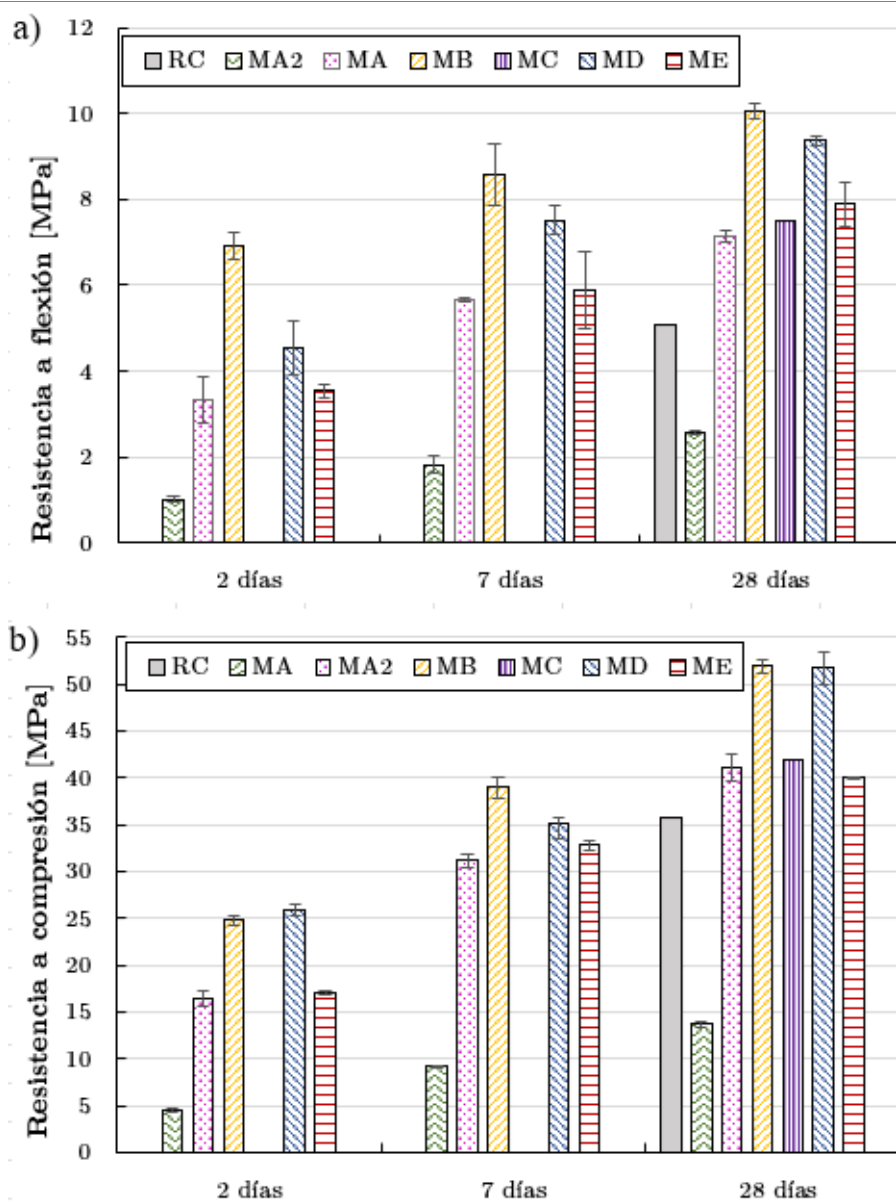


Figura 4.5. Resistencia a flexión (a) y resistencia a compresión (b)

RC tiene una resistencia a flexión de 5,09 MPa y a compresión de 35,83 MPa. Todos los morteros de reparación (MB, MC, MD y ME) exhiben mejores propiedades mecánicas que el hormigón de referencia. Además, el comportamiento del mortero convencional MA2 es mejor que el hormigón de referencia. El bajo contenido de cemento en MA explica el peor rendimiento de este mortero respecto a RC.

Se puede observar en la Figura 4.5 que MB es el mortero de reparación con mayor resistencia a flexión, con un valor máximo superior a 10 MPa. MD presenta una resistencia a flexión media a los 28 días de 9,36 MPa, que es cercana al valor obtenido para MB a la misma edad. La resistencia a flexión

de ME es 7,9 MPa, similar a MA2 y MC. Cabe destacar que MB alcanza mayores resistencias a edades tempranas, una propiedad especialmente interesante para morteros de reparación.

Conclusiones similares se obtienen de las resistencias a compresión, con un valor medio a compresión a los 28 días de 51,91 MPa, 42,02 MPa para MC y 40,01 MPa para ME, en todos los casos valores superiores a 35,83 MPa obtenidos para RC. MA2 exhibe una resistencia a compresión de 41,14 MPa, siguiendo una tendencia similar a la resistencia a flexión. De nuevo, MA tiene peor rendimiento (13,68 MPa). Estos resultados son coherentes con los datos técnicos correspondientes a los morteros de reparación estructural (R3 y R4) según UNE-EN 1504-3:2006 [42], siempre que se alcancen también los requerimientos respecto a las resistencias de adherencia y durabilidad.

4.3.3.2 Ensayo a carbonatación

Como se indica en la sección 4.3.2, la profundidad de carbonatación (d_k) se midió utilizando un indicador de fenolftaleína, como se muestra en la Figura 4.6.

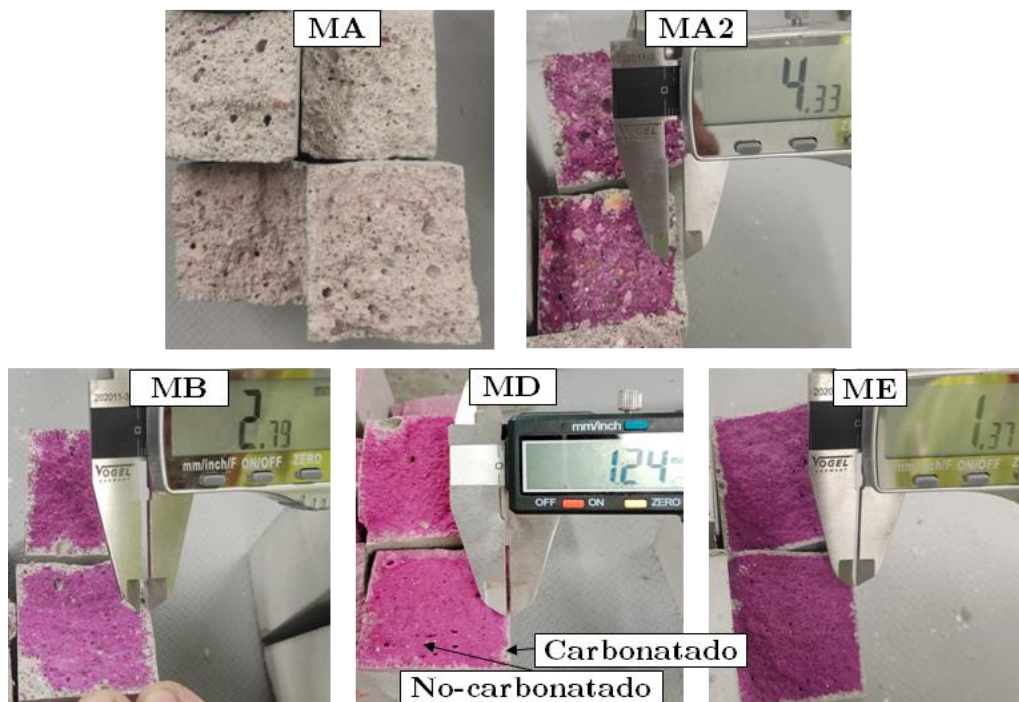


Figura 4.6. Medición digital de la profundidad de carbonatación tras la aplicación de una solución de fenolftaleína en las mezclas MA, MA2, MB, MD y ME

La Figura 4.7 recoge los valores de carbonatación (d_k). Las probetas de MA se carbonataron completamente; por tanto, no están incluidas en la gráfica. Se puede observar como todas las mezclas (excepto MA) muestran una resistencia a la carbonatación mayor que el hormigón de referencia, el cual tiene una profundidad de 7 mm.

ME es el mortero con mejor comportamiento en términos de carbonatación, con una profundidad de carbonatación media de 1,568 mm y con la menor dispersión entre las medidas. MA2 y MB tienen una resistencia a carbonatación similar (3,946 mm y 3,578 mm, respectivamente).

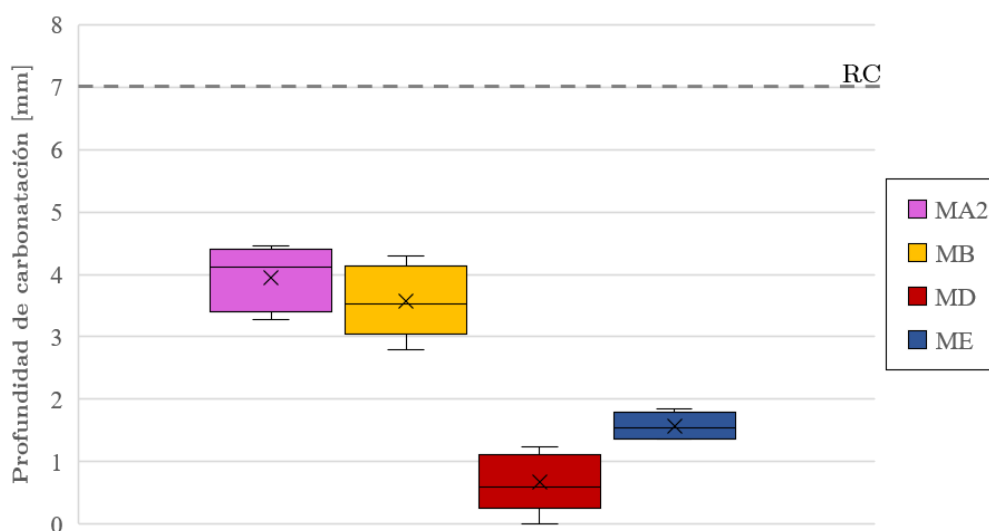


Figura 4.7. Profundidad de carbonatación

En la Figura 4.6, se puede observar cómo la progresión del perfil de carbonatación es uniforme en toda la probeta, debido a la composición con material epoxi sin fibras o áridos gruesos. El perfil irregular obtenido en las probetas de MA2 puede explicarse por la presencia de áridos de diversos tamaños (0 a 4 mm).

4.3.3.3 Ensayo de difusión de cloruros

El coeficiente de difusión de cloruros se evaluó de acuerdo con la norma ASTM C 1556-03 [55], recogiendo los resultados en la Tabla 4.3, con los correspondientes perfiles de cloruros representados en la Figura 4.8

Tabla 4.3. Coeficiente de difusión de cloruros (D_a)

Mezcla	Coeficiente de difusión de cloruros [$E^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]
RC	14.12
MA-1	15.428
MA-2	16.395
MA2-1	6.252
MA2-2	6.717
MB-1	1.298
MB-2	1.046
MD-1	4.310
MD-2	3.846
ME-1	5.238
ME-2	5.381

Los valores de C_s [masa en %] y D_a [m^2/s] se obtienen ajustando la ecuación (3) al contenido de cloruros mediante una regresión no lineal de mínimos cuadrados. En este análisis se omitió el primer punto del perfil.

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \text{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_a \cdot t}}\right) \quad (3)$$

donde $C(x, t)$ [masa en %] es la concentración de cloruros a una profundidad x con un tiempo de exposición t ; C_s [masa en %] es la condición de contorno de la superficie expuesta; C_i [masa en %] es la concentración inicial de cloruros; x [m] es la profundidad bajo la superficie expuesta; D_a [m^2/s] es el coeficiente de difusión aparente; t [s] es el tiempo de exposición y erf es la función de error definida en ASTM C 1556-03 [55].

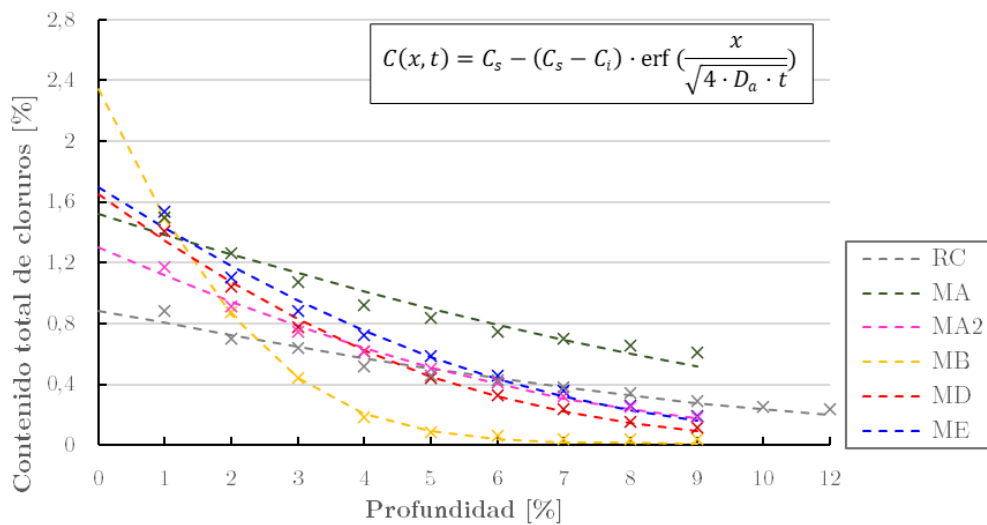


Figura 4.8. Contenido total de cloruros en % a diferentes profundidades

Los resultados de la Tabla 4.3 revelan que todos los morteros excepto MA tienen menor coeficiente de difusión que el hormigón de referencia RC. El material con mejor comportamiento en términos de resistencia contra la penetración de cloruros es MB, con el menor coeficiente de difusión ($1,7 \text{ m}^2/\text{s}$). Esto concuerda bien con el perfil de cloruros de la Figura 4.8, que indica que el agente agresivo no se encontró a profundidades superiores a 7 mm. Puede concluirse que la red porosa de MB dificulta la adecuada penetración de cloruros incluso a pequeñas profundidades.

Los otros morteros de reparación también presentan mejor comportamiento que los morteros convencionales. El valor medio del coeficiente de difusión de cloruros para MD es $4 \text{ m}^2/\text{s}$ y para ME es $5,3 \text{ m}^2/\text{s}$, con baja penetración superficial, pero con los cloruros alcanzando capas más profundas que en MB.

4.3.3.4 Ensayo de resistividad eléctrica

Los valores de resistividad eléctrica (Ωm) de las probetas analizadas para cada mortero se recogen en la Figura 4.9. La resistividad eléctrica es un indicador de la porosidad del material que está relacionado con la resistencia contra la penetración de agentes agresivos contribuyendo a la durabilidad general [49]. Por tanto, es posible relacionar altos valores de resistividad eléctrica con baja porosidad, y consecuentemente, con mejores prestaciones de durabilidad [46].

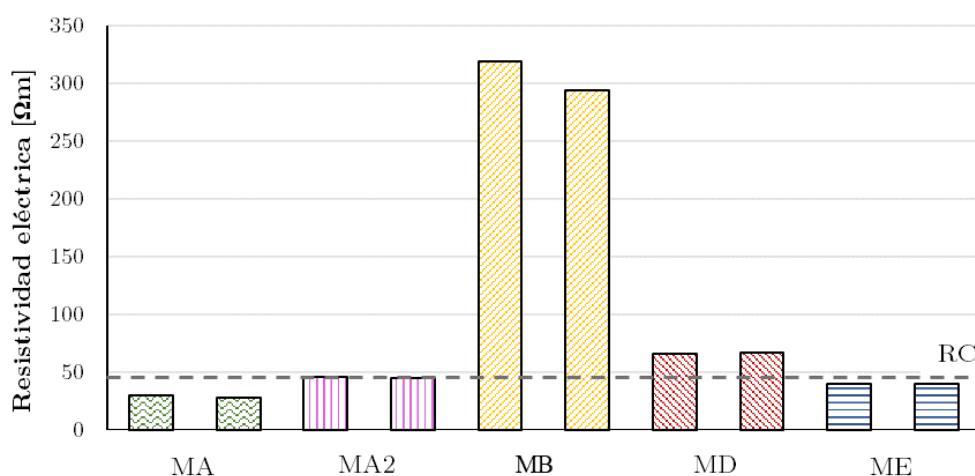


Figura 4.9. Resistividad eléctrica de los morteros en Ωm

La resistividad eléctrica del RC es $45,16 \Omega m$. El mortero de reparación MB es el material que alcanza mayor resistividad eléctrica ($318 \Omega m$), aproximadamente 7 veces superior al valor del hormigón de referencia. La resistividad eléctrica de MD es también mejor que el RC, con un valor medio de $67 \Omega m$, que supone una mejora del 47% respecto al valor de referencia. A pesar de este comportamiento adecuado, el rendimiento de MB es mucho mejor. El único mortero de reparación que presenta un rendimiento similar al RC en términos de resistividad eléctrica es el ME. Por otro lado, los morteros convencionales MA y MA2 presentan un rendimiento similar o inferior al RC.

La resistividad eléctrica y la resistencia contra la penetración de cloruros se estudian conjuntamente ya que ambos aspectos están influidos por la estructura porosa del material [49]. El resultado de esta comparación se muestra en la Figura 4.10. MA se excluye de esta gráfica debido a que el valor del coeficiente es mucho mayor.

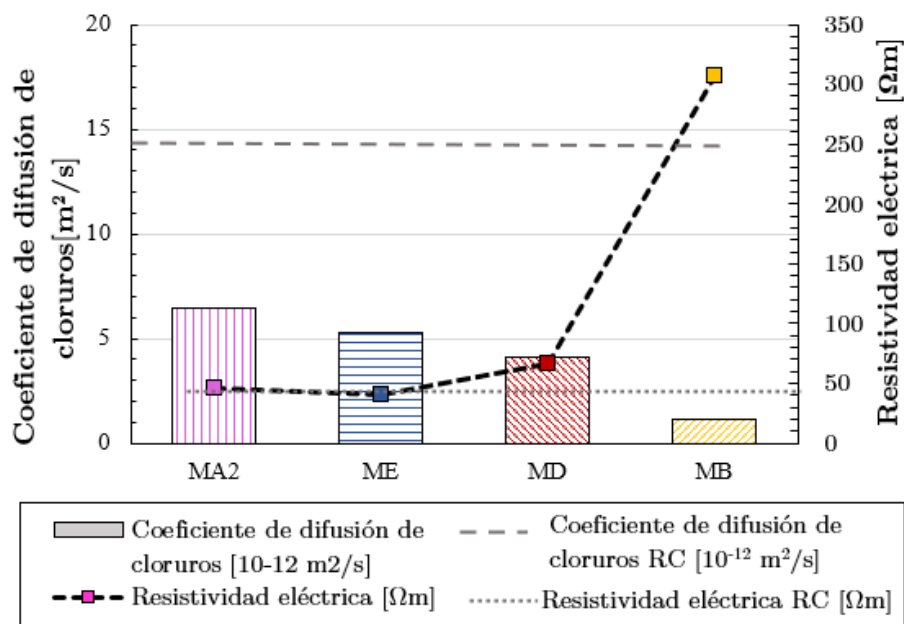


Figura 4.10. Coeficiente de difusión de cloruros y resistividad eléctrica de los morteros estudiados

Se aprecia que existe una correlación entre los bajos valores del coeficiente de difusión de cloruros y los altos valores de resistividad eléctrica, lo cual es particularmente claro en el caso del mortero MB. Esto puede estar relacionado con el papel que desempeña la estructura de la red porosa en

ambas propiedades. Los datos permiten concluir que las fibras presentes en MB desconectan los poros grandes y medianos. Se observa una tendencia similar para el MD. Sin embargo, esta tendencia no se sigue en el hormigón de referencia, en el que no existe correlación entre la baja resistividad eléctrica y el elevado coeficiente de difusión.

Los peores resultados, tanto en términos de resistividad como de difusión de cloruros, corresponden a los morteros de albañilería MA y MA2, con las propiedades más relacionadas con el hormigón de referencia. Esto se debe a la composición convencional que requiere mayor contenido de agua, resultando en mayor porosidad, mayor proporción de grandes poros y más poros interconectados.

La resina epoxi presente en ME permite rellenar los poros en la microestructura, produciendo así un refinamiento general de la red porosa. De acuerdo con trabajos previos [38], se esperaba que las propiedades mecánicas de ME fueran mejores que las de MA2. Sin embargo, en la presente investigación no se observa ninguna mejora en términos de propiedades mecánicas como consecuencia de un refinamiento de la porosidad, como se ha comentado anteriormente.

4.3.3.5 Ensayo de permeabilidad de gases

La permeabilidad de gas de los materiales cementosos depende de la estructura porosa y la distribución de agua en la masa. La Figura 4.11 muestra los resultados de los ensayos de permeabilidad de todos los materiales. El eje vertical representa el valor medio para el coeficiente de permeabilidad K [$E^{-18} m^2$] de las tres probetas de cada material. Cabe destacar que los datos correspondientes a MA se excluyen de la gráfica ya que su valor ($2221 E^{-18} m^2$) dificultaría la comparación adecuada de los demás morteros.

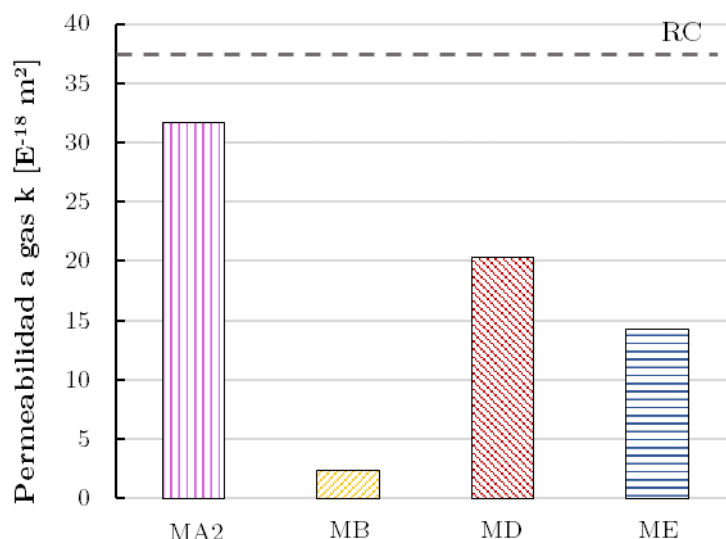


Figura 4.11. Permeabilidad a gas de los morteros

Los valores de permeabilidad a gas del hormigón de referencia RC y el mortero de albañilería MA2 concuerdan con investigaciones previas [50], aunque cabe destacar la escasez de datos existente. El hormigón de referencia RC exhibe un valor mayor a la permeabilidad de gas que MA2, que se puede explicar por el ratio agua-cemento y el tamaño de los áridos que producen mayor porosidad y la aparición de una red conectada de microfisuras debido a la retracción alrededor de los áridos gruesos [56].

Los resultados obtenidos revelan que la permeabilidad a gas se mejora considerablemente en todos los morteros de reparación con respecto a los materiales de albañilería y hormigón de referencia. Son escasas las referencias dedicadas a la permeabilidad a gas de morteros de reparación. En los estudios previos [57–63], las condiciones de ensayos son diversas y los resultados son dispersos, lo que dificulta la comparación directa con la presente investigación. No obstante, los resultados generales obtenidos para morteros de albañilería son coherentes con los resultados de MA y MA2, y refuerzan la idea de mejora de los morteros de reparación. Esto se corresponde con la tendencia de que una red porosa refinada y bajas relaciones agua-cemento tienen un impacto positivo en reducir la permeabilidad de gas. Merece mencionar que [50] estudio morteros con humos de sílice y superplaticantes

con baja porosidad y con valores de K entre $1,05 \text{ E}^{-18} \text{ m}^2$ y $8,49 \text{ E}^{-18} \text{ m}^2$, que están alineados con los buenos resultados de MB.

De los morteros de reparación, MB exhibe menor permeabilidad a gas ($2,37 \text{ E}^{-18} \text{ m}^2$), que se puede relacionar con la presencia de fibras en la masa, que sirven para desconectar la red porosa. La permeabilidad de gas de MD y ME es mayor, pero todavía considerablemente menor que el hormigón de referencia y los morteros de albañilería; esto remarca que los morteros de reparación tienen una matriz más densa con menor interconexión entre poros. A pesar de que la literatura reporta una dispersión de los valores de permeabilidad a gas [64], se aprecia una relación entre las permeabilidad a gas y otras propiedades relacionadas con la porosidad de los morteros. La Figura 4.12 compara los valores de permeabilidad con el coeficiente de difusión de cloruros. Aunque no se puede obtener una expresión entre los parámetros debido al número limitado de muestras, se observa una tendencia: los materiales con baja permeabilidad a gas también dificultan la entrada de agentes agresivos como los cloruros, gracias a la mala conexión entre poros. Se puede apreciar una tendencia lineal que relaciona el incremento de la permeabilidad, con un aumento cuatro veces mayor del coeficiente de difusión de cloruros.

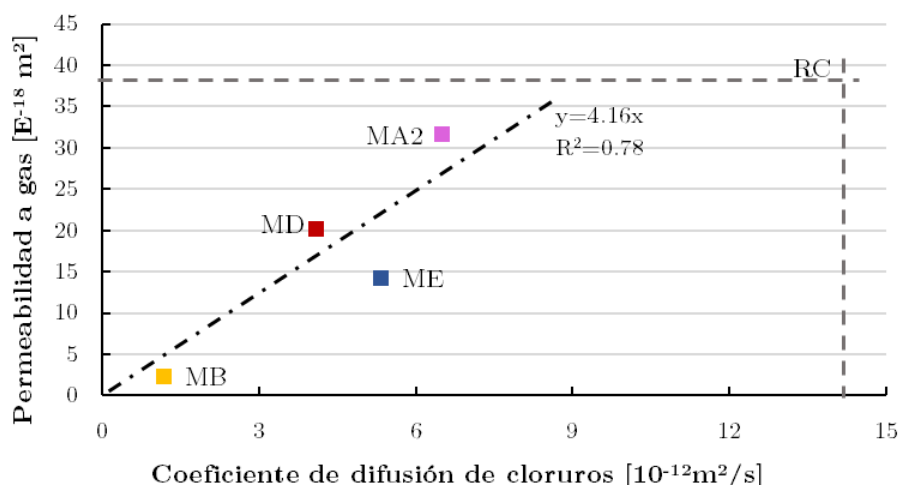


Figura 4.12. Comparación entre la permeabilidad a gas y el coeficiente de difusión de los cloruros

Investigaciones previas han reportado una correlación entre la permeabilidad a gas y el ratio agua-cemento, y por tanto, entre permeabilidad a gas y resistencia a compresión. Esta tendencia también

puede apreciarse en esta investigación, con los morteros de reparación teniendo mayor resistencia a compresión y menor permeabilidad a gas, y con el mortero MA2 teniendo propiedades más cercanas a los morteros de reparación en términos de permeabilidad a gas y resistencia a compresión que MA, coherente con el menor ratio agua-cemento.

4.3.4 Análisis del incremento de la vida útil

La evaluación de la durabilidad en términos de carbonatación y penetración de cloruros se realizó según el modelo de vida útil basado en normas europeas [65]. Se emplea este método, aunque está diseñado para hormigones, debido a que no existe metodología específica para morteros. El modelo se basa en investigaciones previas de Tuutti [66], dividiendo la vida útil en el periodo hasta la iniciación del daño y en el periodo de propagación del daño, de acuerdo a la expresión:

$$t_{est} = t_{inic} + t_{prop} \quad (4)$$

donde t_{inic} es el periodo de iniciación, que se puede definir como el tiempo que pasa entre el vertido y la iniciación del daño; y t_{prop} es el periodo de propagación hasta un determinado umbral de daño. Dentro del periodo de iniciación, ocurren dos procesos de degradación: carbonatación y penetración de cloruros. La carbonatación se estima de acuerdo con el modelo Häkkinen y para los cloruros se emplea la segunda ley de Fick.

4.3.4.1 Carbonatación

El modelo de Häkkinen [67] para la carbonatación establece que la profundidad de carbonatación d_k (en mm) es directamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo t (en años), como:

$$t = \left(\frac{d_k}{K_c} \right)^2 \quad (5)$$

donde K_c es el coeficiente de carbonatación. El periodo de iniciación empieza cuando la profundidad de carbonatación iguala al espesor del recubrimiento nominal del hormigón c . Si se carece de datos experimentales para el coeficiente de carbonatación, se propone la siguiente expresión para K_c [68]

$$k_c = c_{env} \cdot c_{air} \cdot a(f_{ck} + 8)^b \quad (6)$$

donde c_{env} y c_{air} son, respectivamente, los coeficientes de agresividad medioambiental y empleo de aireadores, ambos valores tabulados en el código; f_{ck} es la resistencia característica a compresión del hormigón en MPa; y a y b son parámetros adimensionales tabulados que dependen del tipo de cemento y las adiciones puzolánicas, si están presentes. En esta investigación, el valor de f_{ck} se calcula de acuerdo con el código con $f_{cm} = (f_{ck} + 8)$. En el análisis se considera que la estructura está expuesta a la lluvia y contiene menos de 4,5% de aire ocluido, resultando en $c_{env}=0,5$ y $c_{air}=1$, con $a=1800$ y $b=-1,7$.

Una extensión en el periodo de iniciación puede resultar en un incremento de la vida útil. En este sentido, la Figura 4.13 muestra la mejora obtenida en términos de vida útil de los morteros estudiados con respecto al hormigón de referencia RC, debido al retardo en el inicio de la carbonatación. Es de destacar que MB y MD presentan la mayor mejora, con 250% de la vida útil de RC.

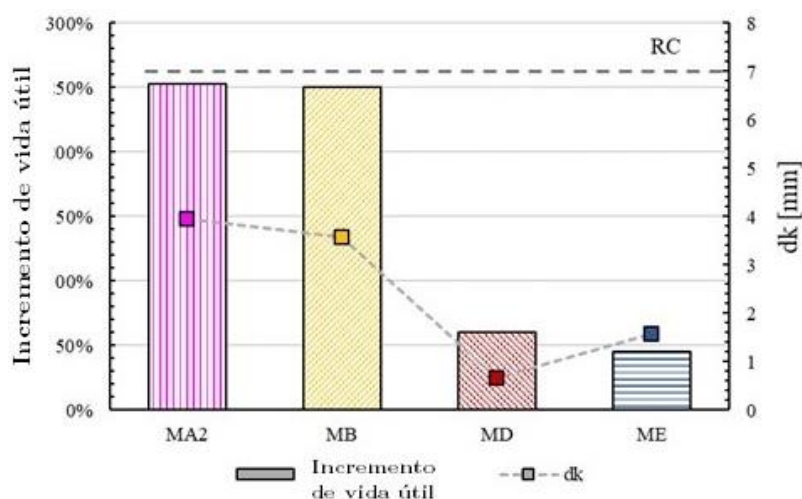


Figura 4.13. Evaluación de la vida útil en función de la profundidad de carbonatación

Cabe destacar que se obtienen resultados similares para MB y MD a pesar de las diferencias en la profundidad de carbonatación (3,58 y 0,67 mm, respectivamente). Esto se puede explicar por el peso de la resistencia a compresión en la ecuación, ya que ambos materiales tienen altas resistencias, superiores a 50 MPa. De forma similar, la diferencia en términos de

resistencia a compresión entre MA2 y MB, aunque tienen profundidades de carbonatación similares, resulta una diferencia significativa en la predicción de la vida útil. Estas divergencias indican que el modelo no es capaz de reproducir adecuadamente el comportamiento de los morteros de reparación, con diferencias significativas en la dosificación, en la resistencia a compresión y con composiciones modificadas (fibras, polímeros, refinamiento poroso,...).

4.3.4.2 Penetración de cloruros

En cuanto a la penetración de cloruros, la Federación Internacional de Hormigón Estructural (FIB) propone la siguiente expresión para determinar la penetración de iones cloruros en el hormigón [69]

$$C_{th} = C_b + (C_s - C_b) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{c}{2\sqrt{D_{app,c}(t) \cdot t}} \right) \right] \quad (7)$$

donde C_{th} es el límite de contenido de cloruros antes de que comience la corrosión, expresada en % del peso del cemento y definido a una profundidad dada x (en mm) y a un tiempo o edad concreta del hormigón t (en años); C_b es el contenido de cloruros proporcionados por los materiales empleados en la fabricación del hormigón en % con respecto al peso del cemento; y C_s es el contenido de cloruros superficial en % con respecto al peso del cemento. Como antes, c es el espesor del recubrimiento nominal del hormigón en mm.

Cuando el periodo de iniciación empieza, $t=t_{inic}$; $D_{app,c}(t)$ es el coeficiente aparente para la difusión de cloruros en $\text{mm}^2/\text{año}$ a cierta edad del hormigón, que se puede obtener experimentalmente. Para el cálculo, $D_{app,c}(t)$ puede obtenerse con la siguiente expresión:

$$D_{app,c}(t) = k_e \cdot D_{app,c}(t_0) \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \quad (8)$$

donde $D_{app,c}(t_0)$ es el coeficiente de difusión aparente a la edad de los 28 días (0,0767 años) que se determina mediante ensayo; n es el coeficiente de envejecimiento, que está tabulado. Para la presente investigación, se fijó un valor de 0,5 para n ; k_e es un coeficiente que depende de la temperatura en $^{\circ}\text{C}$ de acuerdo con la expresión:

$$k_e = e^{4800\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+T_{real}}\right)} \quad (9)$$

Para la aplicación de estas expresiones, es necesario fijar las condiciones medioambientales y constructivas. Se estudió un tipo de agresión ambiental XS3 según [65] con 25 mm de recubrimiento nominal para el elemento estructural. La Figura 4.14 muestra la extensión prevista de la vida útil de los diferentes morteros con respecto al RC, gracias al incremento en el periodo de iniciación contra la penetración de cloruros. Todos los morteros de reparación, así como el mortero de albañilería MA2 permiten extender la vida útil respecto a RC. MB obtiene el mejor comportamiento. En este caso, se encuentra una correlación fuerte entre el modelo y los perfiles experimentales de cloruros y el coeficiente de difusión de cloruros.

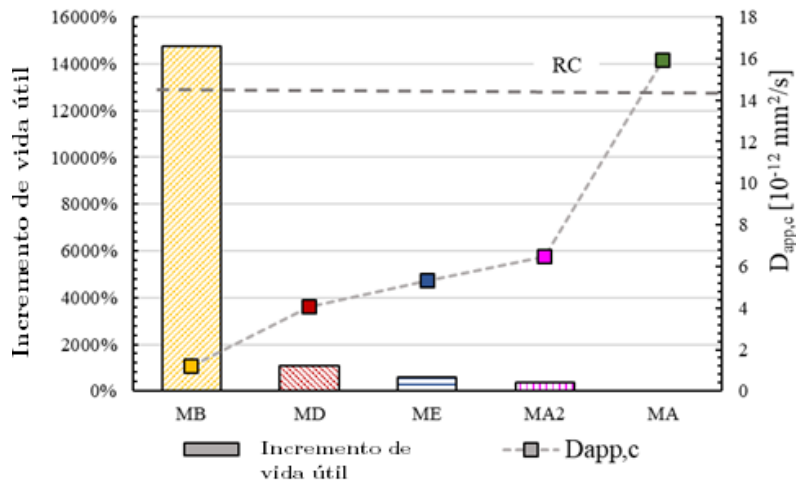


Figura 4.14. Evaluación de la vida útil en función del coeficiente de difusión de cloruros

Capítulo 5. Plan experimental y resultados de los sistemas de FRCM ensayados a tracción

5.1 Introducción

La primera fase experimental de los composites ha consistido en estudiar varios sistemas de FRCM ensayados a tracción uniaxial. Los materiales compuestos con matrices de base cemento tienen una gran variabilidad en sus propiedades mecánicas, ya que estas no dependen únicamente de las características del tejido y la matriz, sino también de la interacción entre ambas. La interfaz fibras-matriz controla la transferencia de cargas y, debido a posibles deslizamientos de las fibras, puede no ser efectiva. Para evitar los problemas de adherencia, se puede aplicar a las mallas recubrimientos e impregnaciones, que además protegen las fibras. Estos dos aspectos (propiedades de la matriz y mejora conseguida con la impregnación) son la base para el diseño de la campaña experimental recogida en el presente capítulo.

El objetivo de esta campaña experimental es comparar la influencia de las propiedades del tejido y de la matriz en el comportamiento del material compuesto, haciendo hincapié en las diferencias entre las dos mallas empleadas, con el fin de estudiar si la impregnación de las fibras puede realmente modificar el comportamiento global en la interfaz entre las fibras y la matriz y conseguir mejoras en la respuesta mecánica del composite.

5.2 Descripción de la campaña experimental

La campaña experimental consistió en ensayar a tracción 10 tipos de sistemas de FRCM con 6 probetas cada uno, ensayando en total 60 probetas. Además, se fabricaron probetas adicionales para asegurar que las probetas ensayadas no estuvieran dañadas y no presentasen desigualdades en la superficie del mortero ni desviaciones en la alineación de las fibras. Primero, se ensayaron los sistemas fabricados con una malla de carbono sin recubrimiento para comparar matrices de 4 morteros diferentes. Tras analizar los resultados obtenidos, se ensayó una malla de carbono con recubrimiento embebida en 6 morteros distintos.

Las probetas se fabricaron siguiendo las recomendaciones de la *ACI 549.4R-13* [32], *AC434* [31], *RILEM TC 250-CSM* [70] y *De Santis et al. (2018)* [71]. Las probetas son prismas rectangulares de 40 mm de ancho, 300 mm de largo y 8 mm de espesor total, formado por dos capas de mortero de 4 mm. La zona de agarre se fijó en 75 mm en cada extremo y el área central de 150 mm, se deja para un sistema de monitorización basado en Correlación Digital de Imagen (*Digital Image Correlation*, DIC), lo cual permite observar la fisuración y controlar la deformación en dicha región.

El proceso de fabricación de las probetas siguió los pasos que se detallan a continuación: i) preparar moldes individuales de dos capas de metacrilato; ii) verter una capa de mortero; iii) colocar la malla, comprobando la alineación vertical y horizontal; iv) verter otra capa de mortero; v) curar el mortero en condiciones normales durante 28 días; vi) preparar las probetas para la técnica DIC (pintar las probetas con un primer elástico blanco y colocar un patrón moteado prediseñado mediante un gel de transferencia); y vii) pegar placas de acero de 4 mm de espesor usando resina epoxi como mecanismo de transferencia de la carga. Las condiciones de curado de todos los morteros fueron: temperatura constante entre 18°C y 20°C, humedad relativa en torno al 60% y las probetas cubiertas con plásticos. Cabe señalar que el proceso fue mucho más fácil de controlar con la malla recubierta, ya

que esta posee una mayor rigidez que permite mantener la alineación durante la aplicación de la segunda de mortero (Figura 5.1).

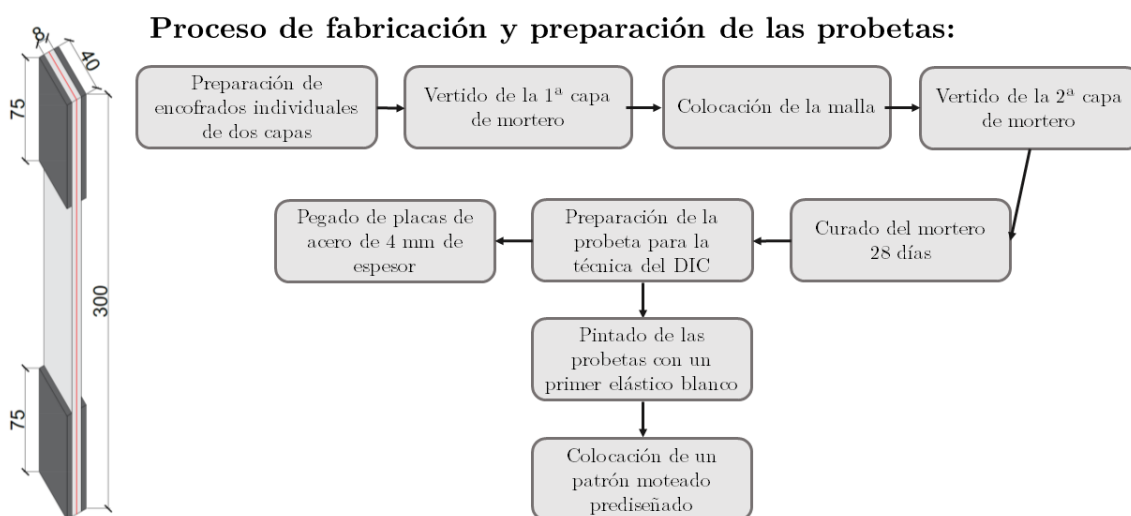


Figura 5.1. Proceso de fabricación y preparación de las probetas

5.2.1 Materiales empleados

Las mallas de carbono utilizadas como refuerzo en las probetas de tracción son GI y GII descritas detalladamente en la sección 4.2.

Como matrices se seleccionaron seis tipos de mortero cementicio. Los morteros, su dosificación y características se describen en la sección 4.3. Además, se explican los ensayos de durabilidad realizados a los mismos y los resultados obtenidos.

Las probetas se nombran según el tipo de tejido y mortero usado. De esta forma, una probeta fabricada con la malla no recubierta (GI) y el mortero convencional (MA) se etiqueta como GI-MA. Este método de indexación se aplica a todos los sistemas. En la matriz de ensayos (Tabla 5.1) se puede ver la nomenclatura de cada probeta, así como el tejido y el mortero que la forman.

Tabla 5.1. Matriz de ensayos de tracción

NOMENCLATURA	TEJIDO	MATRIZ
GI-MA	GI	MA
GI-MA2		MA2
GI-MB		MB
GI-MC		MC
GII-MA	GII	MA
GII-MA2		MA2
GII-MB		MB
GII-MC		MC
GII-MD		MD
GII-ME		ME

5.2.2 Ensayo e instrumentalización

El comportamiento mecánico y los resultados de los ensayos FRCM están influidos por diversos factores relacionados con las propiedades de los materiales, proceso de fabricación, configuración del ensayo y técnica de medida de deformaciones [72]. La forma geométrica de las probetas también tiene influencia en el comportamiento, por lo que en la presente investigación se seleccionó un paralelepípedo rectangular debido a su facilidad en la implementación, con el objetivo de que las condiciones de la investigación sean replicables [72–76]. Diferentes métodos de agarre y configuraciones de ensayo han sido investigadas por varios autores como Carozzi et al. (2015) [73], Arboleda et al. (2016) [3], Truong and Kim (2021) [77], D’Antino and Papanicolaou (2018) [19], Zhu et al. (2011) [78], Hartig et al. (2012) [16] y De Santis et al. (2017) [79]. Después de analizar los resultados de la literatura, en esta investigación se han utilizado mordazas neumáticas (*clamping grids*) que permiten alcanzar el fallo por rotura del tejido con una curva tensión deformación trilineal. Los dos extremos de las probetas se sujetaron a la máquina mediante una fuerza de compresión. Los ensayos a tracción se llevaron a cabo con una máquina de ensayo electromecánica Servosis ME 405/50/5 con la célula de carga REP Transducer Type TC4 50 kN. Además, se diseñaron ad-hoc garras similares a MTS Model XSA304A para adaptarlas a la geometría de las probetas (Figura 5.2). La velocidad de ensayo utilizada ha sido 0,5 kN/min.

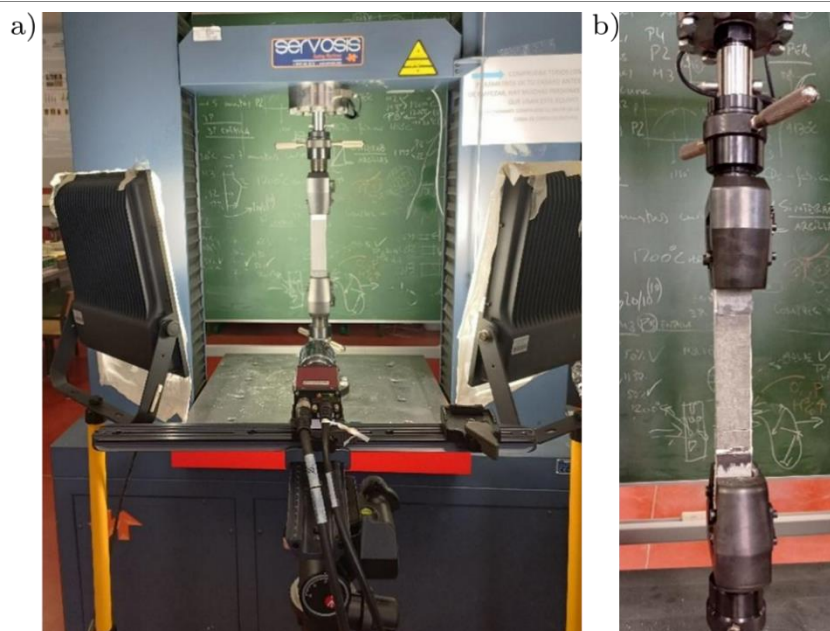


Figura 5.2. Máquina de ensayo y sistema de agarre. a) Máquina de ensayo b) Probeta y sistema de agarre

La técnica de correlación de imagen (DIC) es una técnica sin contacto para obtener desplazamientos y deformaciones durante los ensayos de caracterización mecánica [80,81]. Esta monitorización consiste en adquirir imágenes en diferentes estados de carga, los cuales se comparan como parte del procesado con una imagen de referencia sin deformación. En este caso se aplica un enfoque 2D DIC ya que la geometría de la probeta es plana, y la mayoría de las deformaciones y los desplazamientos ocurren en el plano.

Para aplicar la técnica DIC es necesario preparar las probetas previamente. En este caso, se aplicó un patrón moteado (*Speckle pattern*) generado artificialmente por ordenador (Figura 5.3), de modo que se perturba una rejilla circular regular para generar un patrón con una escala de grises diferenciada, única, no periódica y estable [82]. El patrón se imprimió y transfirió a la superficie de las probetas comprobando su calidad mediante el Gradiente de Intensidad Media (*Mean Intensify Gradient-MIG*) [83]. Se obtuvo un valor de 45 para MIG, con un área de cobertura óptima de 44% [84].

Para adquirir las imágenes, se utilizó un prototipo de bajo coste 2D DIC similar al desarrollado por García Martín et al. [85,86] (Figura 5.3).

Dicho prototipo se compone de: i) una cámara de alta resolución Manta G 917 1" Monocromática CCD equipada con un objetivo macro primario (una macrolente principal) de 50 mm; ii) un controlador lógico programable (PLC); y iii) dos luces LED neutrales. Aunque se usaron lentes con baja distorsión, se llevó a cabo un pre-procesado para eliminar la distorsión radial y tangencial y minimizar los errores en la adquisición de imágenes [87]. Este fue el propósito de la utilización de un tablero de ajedrez de calibración estándar (Figura 5.3). El prototipo se configuró de tal manera que el monitoreo 2D-DIC se pudo llevar a cabo satisfactoriamente con la mayor precisión posible y con los mínimos errores. El prototipo de adquisición se situó a 1 m respecto a la probeta, logrando un GSD de 0,07 mm/px. Dado que las deformaciones se miden en el mismo plano, el parámetro de profundidad de campo no es crítico, por lo que se configura una apertura de lente de f5 que permite un balance adecuado con la iluminación. Considerando la velocidad de carga y la duración del ensayo, las imágenes se adquirieron a 1 FPS con una velocidad de obturación de 1/100s, capturando la primera imagen antes de comenzar el ensayo para obtener la imagen de referencia, el número de imágenes por segundo es un aspecto crucial del sistema, para poder observar los fenómenos requeridos; en este caso, se dio prioridad a tener un número suficiente de imágenes con el objeto de captar el patrón de fisuración.

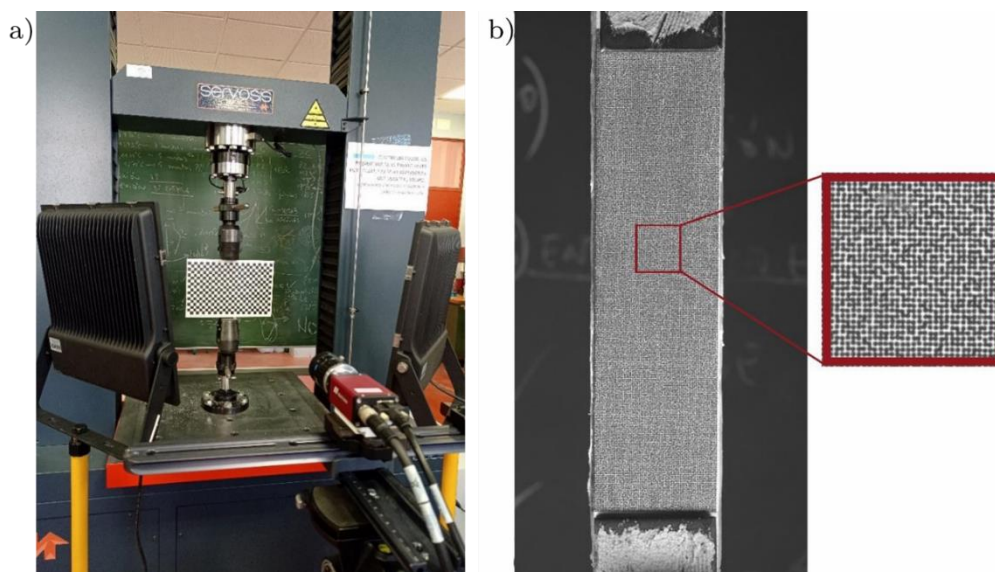


Figura 5.3. Prototipo en 2D de bajo coste a) Prototipo DIC 2D b) Patrón moteado aplicado a una probeta de FRCM

Una vez que las imágenes han sido adquiridas y la distorsión corregida, los algoritmos DIC permiten obtener el campo completos de desplazamientos y deformaciones para una zona dada. El procesamiento DIC consiste en seleccionar la Región de interés (*Region of Interest*, ROI), que está dividido en subconjuntos que se comparan entre imágenes consecutivas mediante Zero mean Normalized Cross Correlation (ZNCC) [87]. Posteriormente, se aplican algoritmos de interpolación y optimización para analizar todos los subconjuntos con una precisión de subpíxeles [88]. De esta forma, es posible obtener el campo completo de deformaciones para la zona del ROI.

5.3 Resultados de la campaña experimental

5.3.1 Resultados de desplazamientos y deformaciones

Los desplazamientos y deformaciones se obtuvieron de la monitorización 2D-DIC y la configuración del ensayo definidas en 5.2.2. El software libre *Ncorr* [88] se utilizó para procesar los datos, mientras que la herramienta de postprocesado (*Ncorr Post CSTool*), que permite extraer y visualizar las deformaciones, se utilizó para colocar extensómetros virtuales en diferentes zonas y poder realizar un análisis de otros parámetros como la distancia entre fisuras o su ancho.

El ROI seleccionado para la campaña experimental corresponde a la zona central de la probeta (Figura 5.4). Un subconjunto de 20 x 20 píxeles y un paso de 7 píxeles, equivalente al 65% de superposición, se usó para optimizar la configuración del DIC [80].

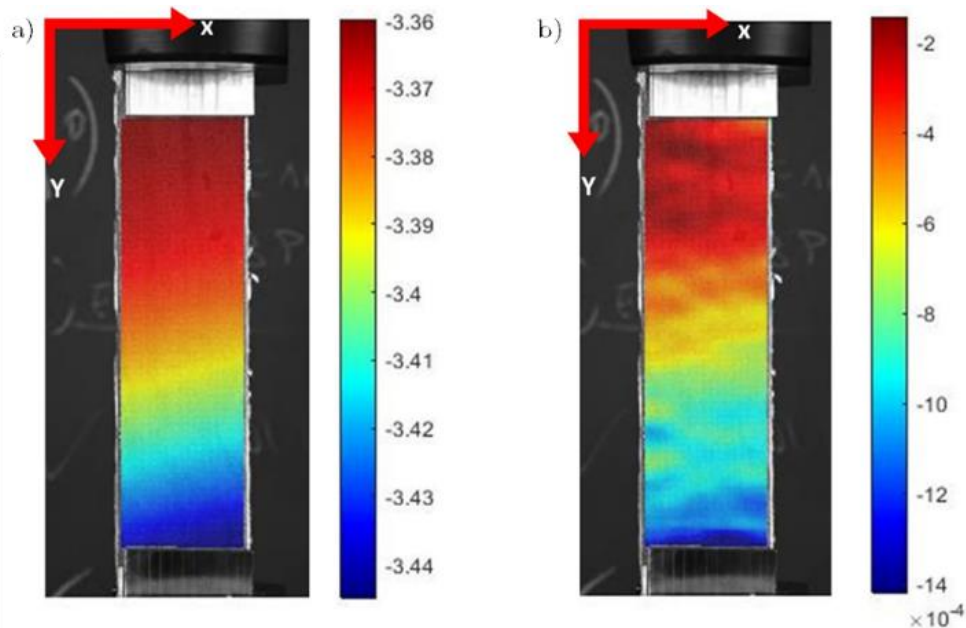


Figura 5.4. a) Desplazamiento vertical y b) deformaciones obtenidas con Ncorr.

Teniendo en cuenta la configuración del sistema de adquisición, las imágenes capturadas se asocian a cada estado de carga. De esta manera, es posible calcular la deformación de cada imagen, y, por consiguiente, obtener las curvas de tensión-deformación de cada ensayo realizado.

5.3.2 Curvas tensión-deformación

Los resultados obtenidos en los ensayos uniaxiales a tracción se detallan a continuación. Las curvas tensión-deformación de todas las probetas se muestran en las Figura 5.5 y Figura 5.6. Las diferencias en el comportamiento entre las familias de curvas según la malla utilizada se pueden apreciar claramente en las figuras. Todos los sistemas fabricados con la malla GI tienen un peor comportamiento que los sistemas fabricados con GII. Las probetas pertenecientes a los diferentes sistemas de GII tienen tanto una tensión pre-fisuración más elevada como una mayor resistencia última.

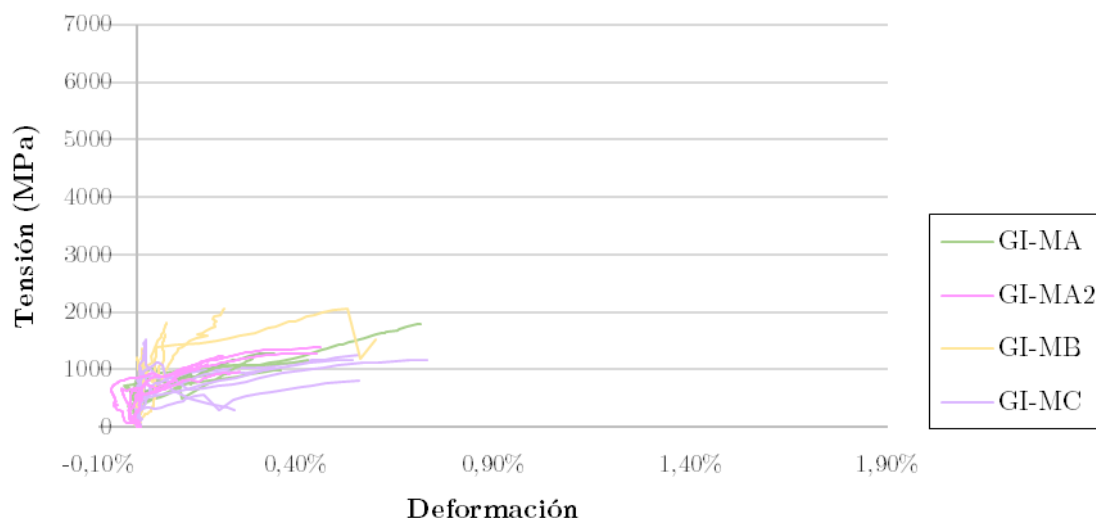


Figura 5.5. Curvas tensión-deformación de los sistemas de FRCM con malla GI

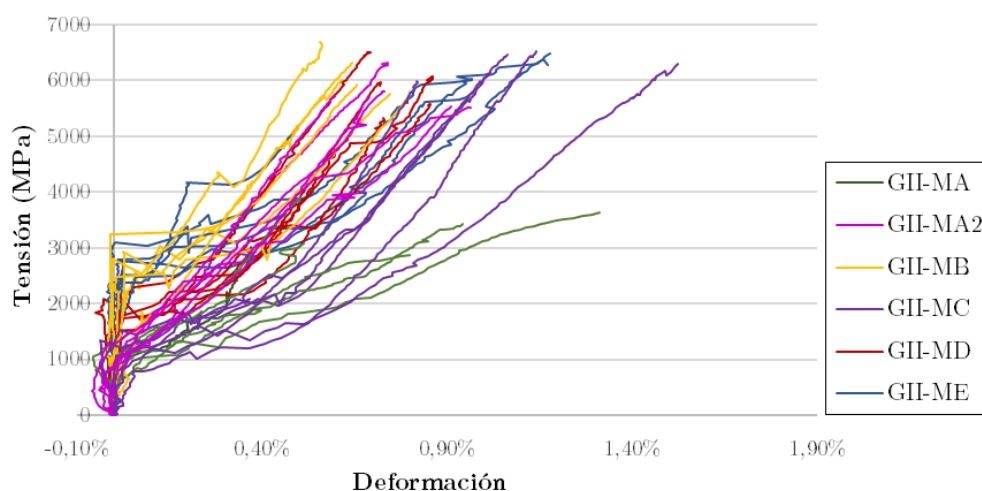


Figura 5.6. Curvas tensión-deformación de los sistemas de FRCM con malla GII

Las curvas tensión-deformación idealizadas según el criterio recogido en la CNR-DT 215 (2018) [24] se presentan en la Figura 5.7. Dichas curvas muestran el comportamiento idealizado de cada sistema, además de las propiedades mecánicas de las mallas en línea de puntos. Puede observarse que el comportamiento de los sistemas con la malla GI es bilineal mientras que los sistemas fabricados con GII, excepto en el caso de los morteros MA y MA2, tienen un comportamiento trilineal. Los sistemas con GI alcanzan menor deformación, menor tensión y un deslizamiento prematuro de las fibras en el estado B, por lo que la matriz nunca llega a estar totalmente fisurada. En el caso de los sistemas GII-MA y GII-MA2, el comportamiento es similar a los sistemas de las mallas no impregnadas, y todas las probetas fallan

durante el proceso de fisuración. Sin embargo, aun presentando un comportamiento bilineal, la tensión última alcanzada es mayor que en los sistemas de GI.

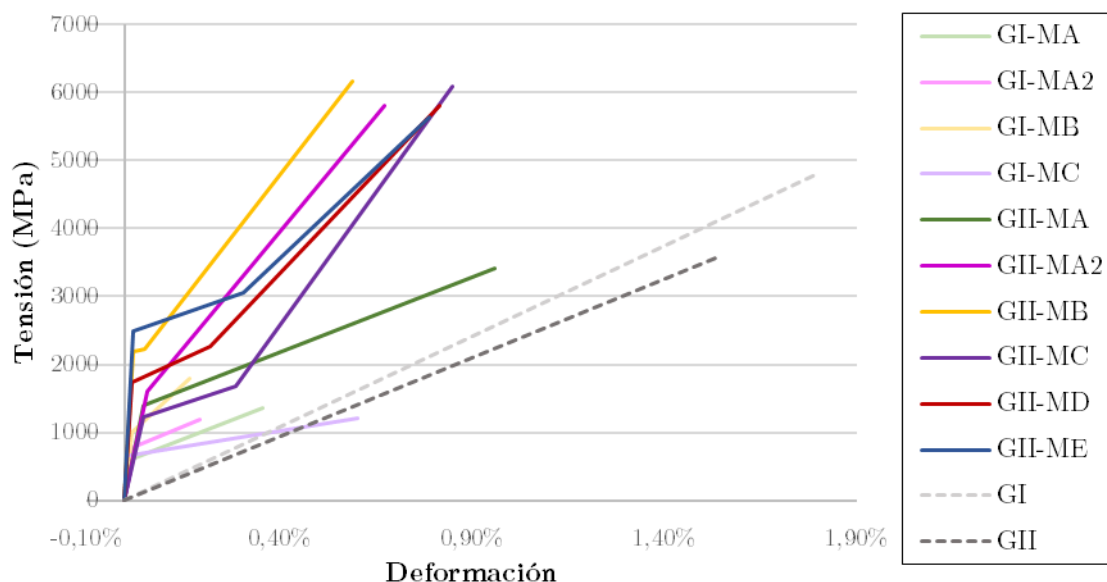


Figura 5.7. Curvas idealizadas de tensión-deformación de los sistemas de FRCM.

La resistencia (σ), la deformación máxima (ϵ) y el módulo de elasticidad (E) de cada estado para cada sistema se recogen en Tabla 5.2. La resistencia se calcula con el área del tejido (A_f) como recomienda la CNR-DT 215 (2018) [24]. Los valores obtenidos en el estado A tienen mayor dispersión, en particular los valores referentes a la rigidez. Esto se relaciona con la posibilidad de que las probetas tengan microfisuras que no permitan una distribución correcta de las cargas, por lo que el proceso de fisuración puede comenzar antes de ser observable [14]. Los morteros comienzan a fisurarse con la mitad de la tensión en los sistemas formados con GI que con GII para el mismo mortero, por lo tanto, el estado A y la resistencia del estado A no solo dependen de las características de la matriz. La rigidez en la rama elástica es mayor que en las otras ramas, así como de la rigidez típica de los morteros usados como matriz. En el estado B, debido a la fisuración, la pendiente decrece hasta a un rango entre 93 y 680 GPa. En la última fase, cuando las probetas están completamente fisuradas, la rigidez pasa a estar relacionada con las propiedades del tejido, el módulo de elasticidad de todos los sistemas de GII en este estado es similar y alrededor de tres veces el de

la malla. Esto se puede explicar por la contribución de la matriz entre fisuras adyacentes, que conduce a una deformación media que es menor que la del tejido aislado para una tensión dada, incluso cuando el composite está completamente fisurado.

Tabla 5.2. Resultados de los ensayos a tracción de los composites

SISTEMA	ESTADO	σ_{FRCM} (MPa)	ϵ_{FRCM}	E_{FRCM} (GPa)
GI-MA	A	591	0,01%	5312
	B	1364	0,36%	219
	C, último			
GI-MA2	A	782	0,02%	4180
	B	1184	0,20%	226
	C, último			
GI-MB	A	1008	0,02%	6734
	B	1802	0,17%	531
	C, último			
GI-MC	A	661	0,01%	5183
	B	1210	0,60%	93
	C, último			
GII-MA	A	1393	0,05%	2462
	B	3416	0,96%	399
	C, último			
GII-MA2	A	1608	0,06%	2753
	B	5808	0,68%	680
	C, último			
GII-MB	A	2184	0,02%	9238
	B	2184	0,02%	132
	C, último	6159	0,59%	732
GII-MC	A	1235	0,05%	2568
	B	1679	0,29%	180
	C, último	6097	0,85%	798
GII-MD	A	1743	0,02%	10 351
	B	2259	0,22%	330
	C, último	5798	0,82%	799
GII-ME	A	2495	0,02%	11 707
	B	3058	0,31%	196
	C, último	5638	0,79%	612

5.4 Discusión de resultados

Los principales resultados obtenidos en los ensayos a tracción se han analizado estadísticamente para comparar los sistemas de FRCM y estudiar la influencia de las propiedades del refuerzo y la matriz en el comportamiento general del composite. Las variables estudiadas son la resistencia última, el módulo de elasticidad y el patrón de fisuración. Además, se ha calculado el

factor de eficiencia de cada sistema como criterio de selección de los composites.

Se ha realizado un análisis de la varianza con la prueba paramétrica ANOVA cuando los valores siguen una distribución normal mediante la prueba de Tukey o T3 Dunnet. En caso contrario, se ha realizado un análisis de la varianza de una vía no paramétrico, la prueba de Kruskal-Wallis. Los análisis de la varianza aplicados comparan si hay diferencias significativas entre sistemas o si, por el contrario, se pueden considerar un grupo homogéneo. El *p-value* es el indicador de estas diferencias: si el *p-value* es superior a 0,05 se puede considerar que no hay diferencias entre los sistemas con un nivel de confianza del 95%. Cada sistema tiene asignadas una o más letras (A,B,C,...), de tal forma que cuando dos sistemas tienen la misma letra, no hay diferencias significativas entre ambos. Para cada tipo, el análisis estadístico se realizó sobre un total de seis probetas válidas.

5.4.1 Resistencia última a tracción

La resistencia última del FRCM se estudió estadísticamente con la prueba de Tukey. La Figura 5.8 muestra la resistencia última, tanto de cada sistema individualmente como agrupada según el tipo de malla. Se puede observar en el análisis agrupado que la resistencia es menor en los sistemas formados por la malla no recubierta (GI) que en los de la malla recubierta (GII). Existe también variabilidad dentro de los sistemas formados por el tejido GII dependiendo si el mortero de la matriz es convencional pobre (MA) o es un mortero con una resistencia mayor (MA2, MB, MC, MD y ME). Los resultados del análisis estadístico son coherentes con la observación cualitativa de las gráficas tensión-deformación, y sugieren el mejor comportamiento global de la malla GII así como notables diferencias en las prestaciones mecánicas motivadas por el mortero elegido como matriz.

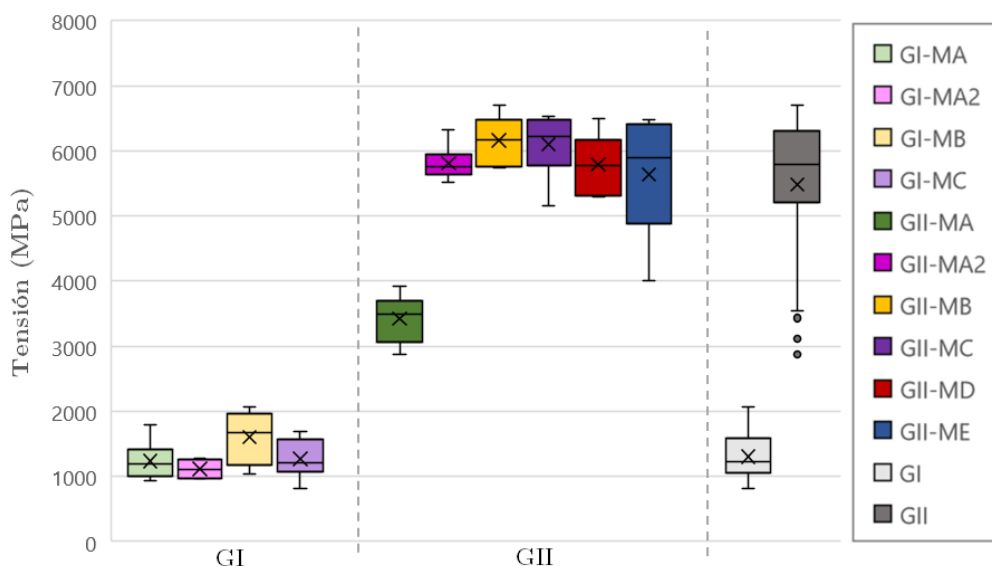


Figura 5.8. Resistencia última de los sistemas de FRCM

La Tabla 5.3 muestra la media, desviación típica y el grupo estadístico de la resistencia última a tracción. Se puede observar que se obtienen tres grupos homogéneos, uno para los cuatro sistemas con fibras sin recubrimiento y dos grupos para los sistemas con GII. Esta clasificación concuerda con la Figura 5.8, con las probetas de GII-MA mostrando un comportamiento intermedio entre los sistemas de GI y los sistemas de GII con morteros con mayor resistencia y con un grupo estadístico independiente. Los demás sistemas con GII pertenecen al mismo grupo clasificatorio de acuerdo con la prueba de Tukey para un p-value de 0,05.

Tabla 5.3. Media, desviación estándar y comparación estadística de la resistencia última de los sistemas de FRCM

Sistema	Resistencia última	Grupo estadístico
GI-MA	1239 MPa \pm 122 MPa	A
GI-MA2	1114 MPa \pm 133 MPa	A
GI-MB	1600 MPa \pm 165 MPa	A
GI-MC	1268 MPa \pm 125 MPa	A
GII-MA	3421 MPa \pm 153 MPa	B
GII-MA2	5808 MPa \pm 273 MPa	C
GII-MB	6159 MPa \pm 156 MPa	C
GII-MC	6097 MPa \pm 205 MPa	C
GII-MD	5792 MPa \pm 194 MPa	C
GII-ME	5638 MPa \pm 380 MPa	C

ANOVA: Test de Tukey

p<0,05

En la Tabla 5.3 puede apreciarse cómo el mortero convencional con menor resistencia (MA) obtiene mejores resultados cuando se utiliza de forma

conjunta a la malla impregnada (GII), si bien no alcanza a conseguir el rendimiento del resto de los morteros con la malla recubierta, siendo su resistencia última un 58% de la media del grupo estadístico C. En particular, la resistencia última de GII-MA es 276% la de GI-MA. La misma tendencia se puede observar entre los pares GI-GII, teniendo MB la mayor resistencia última. En este caso, la malla recubierta con el mortero mejorado consigue unas tensiones 385% superiores a las de la malla sin recubrimiento. Se observa un efecto sinérgico con los morteros de alto rendimiento y las fibras con recubrimiento, como revelan las parejas con MA2, MB y MC.

5.4.2 Módulo de elasticidad

La Figura 5.9 corresponde a los módulos de elasticidad de la primera rama del composite, mientras la Figura 5.10 muestra el módulo de elasticidad entre el 60 y el 90% de la resistencia última, obtenido mediante la ecuación dada en AC434(2018)[31]. Debido a la elevada dispersión experimental y a la limitación del tamaño de la muestra, la rigidez no se ha estudiado estadísticamente. La rigidez de la rama elástica está relacionada con las propiedades de la matriz. Existe una menor diferencia entre los sistemas fabricados con mallas con y sin recubrimiento, como puede observarse en las cajas individuales y en las agrupadas.

El módulo de elasticidad obtenido con la ecuación correspondiente a los estados B y C tiene mayor dispersión. Sin embargo, si se analizan los datos de cada malla, se puede observar que la rigidez de los sistemas con GII es, con carácter general, ligeramente superior, como muestran las cajas de los resultados agrupados en Figura 5.10. Los valores atípicos extremos se trazaron como círculos independientes en las siguientes figuras.

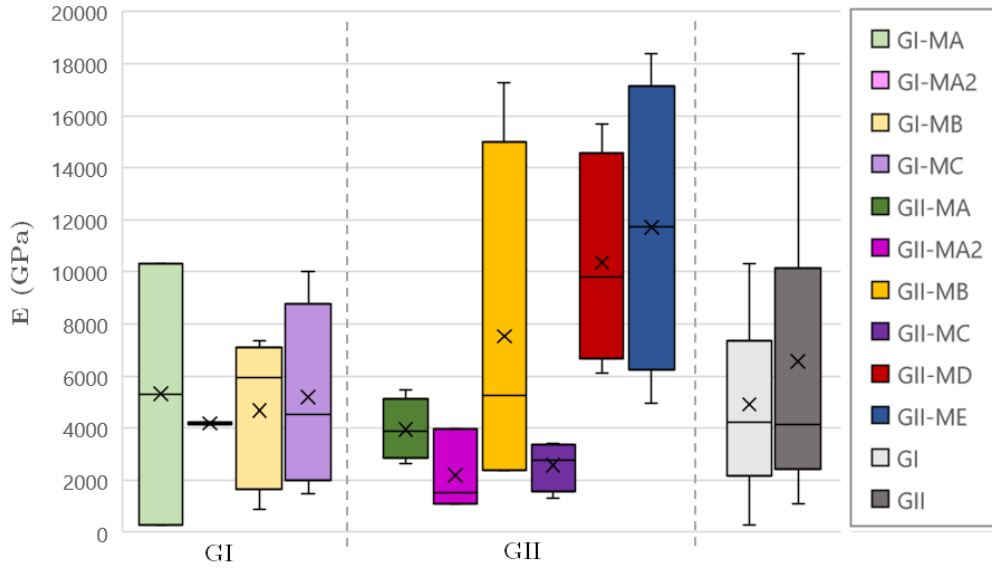


Figura 5.9. Módulo de Young de la primera rama de los sistemas de FRCM

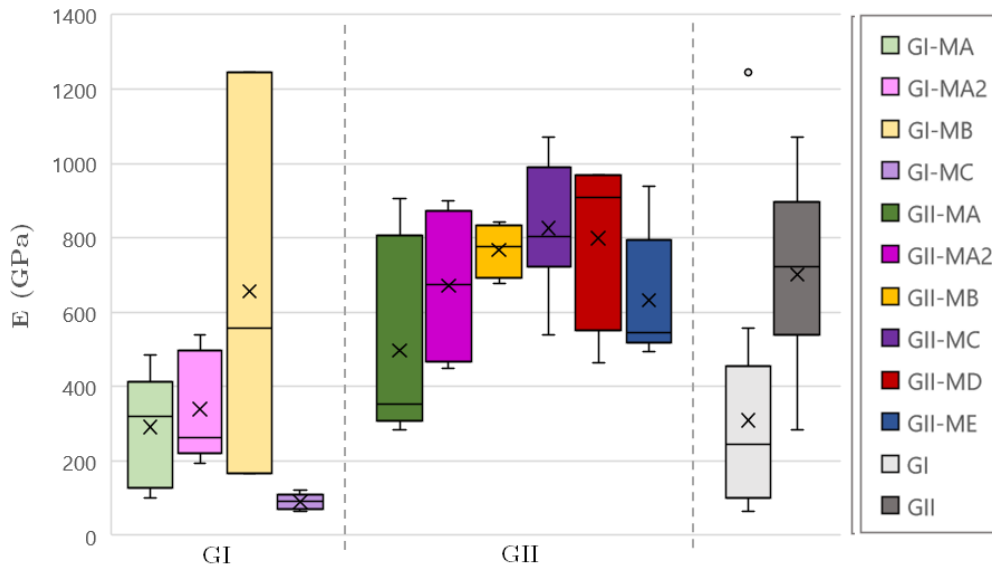


Figura 5.10. Módulo de Young entre el 60 y 90% de la resistencia última de los sistemas de FRCM

5.4.3 Patrón de fisuración

La selección de la técnica DIC para la monitorización del ensayo está motivada por la posibilidad de observar la distancia entre fisuras, ya que estas tienen gran impacto en el comportamiento general del FRCM. En este sentido, el modelo ACK relaciona la distancia media entre fisuras con la tensión de adherencia entre el tejido y matriz [25]. La relación es inversamente proporcional de forma que, si la distancia es menor, la resistencia es mayor. La Figura 5.11 ilustra la distancia media entre fisuras y, por su parte, la Tabla 5.4 recoge los resultados del patrón de fisuración de acuerdo con el análisis Kruskal-Wallis realizado. Tanto en la Figura 5.11

como en la Tabla 5.4, se puede observar que la distancia media entre fisuras, así como la dispersión en dicha distancia, es mayor en los sistemas fabricados con GI.

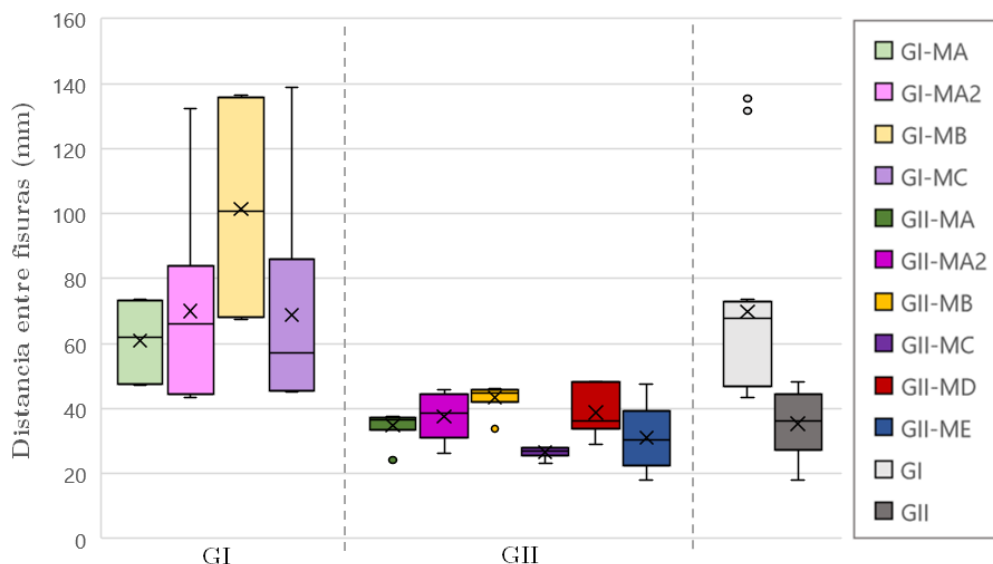


Figura 5.11. Distancia media entre fisuras de los sistemas de FRCM

Tabla 5.4. Media, desviación estándar y comparación estadística de la distancia entre fisuras de los sistemas de FRCM

Sistema	Distancia media entre fisuras	Grupo estadístico
GI-MA	60,95 mm ± 5,53 mm	ACD
GI-MA2	70,00 mm ± 12,40 mm	ACDE
GI-MB	101,50 mm ± 14,78 mm	AC
GI-MC	68,81 mm ± 14,73 mm	ACDE
GII-MA	34,81 mm ± 2,12 mm	BDE
GII-MA2	37,61 mm ± 7,78 mm	BCDE
GII-MB	43,37 mm ± 1,93 mm	BCDE
GII-MC	26,34 mm ± 0,75 mm	BE
GII-MD	38,79 mm ± 3,13 mm	BCDE
GII-ME	31,04 mm ± 4,41 mm	BDE

Kruskal-Wallis $p < 0,05$

La Tabla 5.4 muestra la media, desviación estándar junto con el grupo estadístico de cada sistema. Se observa que a todos los sistemas se les puede asignar más de un grupo estadístico conforme a la distancia media entre fisuras. Sin embargo, existe cierto paralelismo con los agrupamientos según la tensión última recogidos en la Tabla 5.3. Se puede observar que ninguno de los composites fabricados con GII tiene asignado el grupo A, el cual es compartido por todos los sistemas con GI. Por otro lado, el grupo B

corresponde a todos los sistemas de GII. Los grupos C, D y E aportan poca información, ya que son comunes a la mayoría de los sistemas.

Un análisis más detallado de la distancia media permite destacar que todos los sistemas con malla impregnada presentan una distancia media entre fisuras inferior a 45 mm, mientras que los cuatro sistemas con tejido no impregnado presentan una distancia entre fisuras superior a 60 mm. También puede observarse que el espaciado medio de fisuración es máximo para ambos refuerzos cuando la matriz está constituida por mortero MB. Este resultado puede asociarse a la elevada rigidez y resistencia a tracción del MB.

5.4.4 Evaluación de los sistemas ensayados

En esta subsección se trata de evaluar el rendimiento de los sistemas ensayados. Se evalúa de forma comparativa la eficacia de los diferentes sistemas ensayados, utilizando el factor de eficiencia que mide la capacidad mecánica de la fibra aprovechada en el composite. Un factor de eficiencia superior al 100% indica, que la resistencia última alcanzada por el sistema es superior a la alcanzada por el tejido solo.

El factor de eficiencia se define en la bibliografía como la relación entre la resistencia a la tracción última del composite y el contenido de fibra en el composite multiplicado por su resistencia a la tracción [25,89]. Se ha utilizado para comparar los sistemas FCRM y medir su rendimiento con respecto al contenido de fibra y las propiedades mecánicas de las fibras. Se calcula como (10):

$$\text{Factor de eficiencia} = \frac{\sigma_{u,FRCM}}{\sigma_{u,f} \cdot A_f} \quad (10)$$

donde $\sigma_{u,FRCM}$ es la resistencia última del FRCM, $\sigma_{u,f}$ es la resistencia última del tejido a tracción y A_f es el área de fibra contenida en el FRCM.

La Figura 5.12 ilustra el factor de eficiencia de todas las configuraciones ensayadas, así como el correspondiente a cada tipo de malla sin tener en cuenta el mortero. En todos los casos, el tejido se explota

completamente e incluso algunos composites alcanzan siete veces la resistencia última de la malla. Se puede observar tanto en la Figura 5.12 como en la Tabla 5.5 como el factor de eficiencia de los sistemas con malla recubierta (GII) es mayor que el de la malla sin recubrimiento.

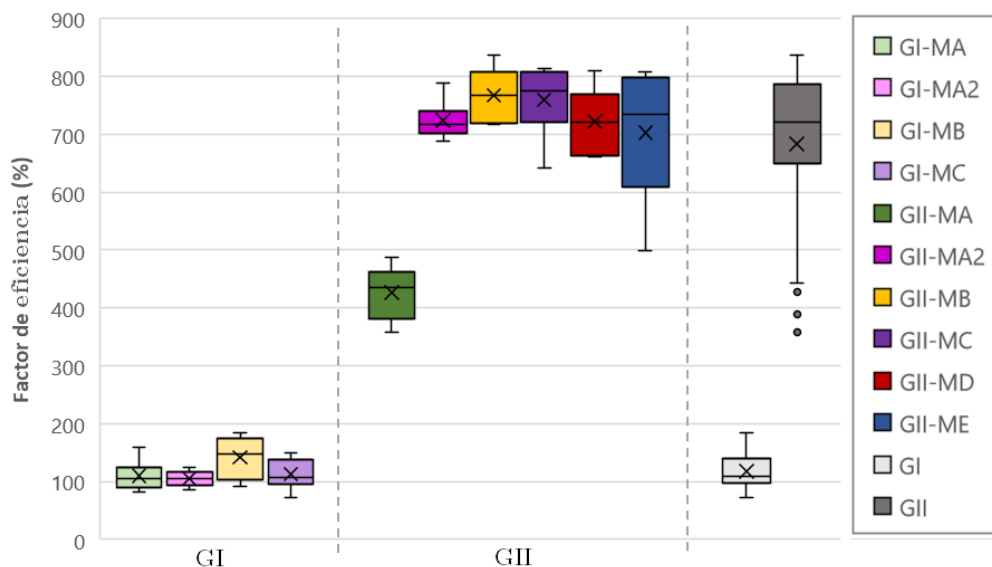


Figura 5.12. Factor de eficiencia de los sistemas de FRCC

Tabla 5.5. Media, desviación estándar y comparación estadística del factor de eficiencia de los sistemas de FRCC

Sistema	Factor de eficiencia	Grupo estadístico
GI-MA	110% ± 10%	ACD
GI-MA2	105% ± 11%	ACDE
GI-MB	142% ± 15%	AC
GI-MC	112% ± 11%	ACDE
GII-MA	426% ± 19%	BDE
GII-MA2	724% ± 34%	BCDE
GII-MB	768% ± 19%	BCDE
GII-MC	760% ± 20%	BE
GII-MD	722% ± 24%	BCDE
GII-ME	703% ± 47%	BDE

Kruskal-Wallis p<0,05

La Tabla 5.5 presenta el estudio estadístico utilizando la prueba ANOVA y la comparación entre sistemas utilizando la prueba T3 Dunnet. De esta forma, se recogen la media y la desviación estándar de cada sistema y el grupo estadístico al que pertenecen. Hay tres grupos: la menor eficiencia se representa con el grupo A y corresponde a todos los sistemas de la malla GI (sin recubrimiento); el grupo B tiene la eficiencia intermedia y corresponde al composite con malla recubierta y mortero convencional con

baja resistencia; y el grupo C supone la máxima eficiencia e incluye a los sistemas con malla recubierta (GII) y morteros con mayor resistencia. Los resultados del factor de eficiencia concuerdan con las observaciones previas sobre los grupos de comportamiento de la tensión última, aunque las pruebas ANOVA empleadas sean diferentes. Esto revela la consistencia de las observaciones previas con respecto a la considerable mejora alcanzada con la malla recubierta, y la similitud del comportamiento entre diferentes morteros modificados cuando trabajan con esta malla.

Como se ha indicado anteriormente para la resistencia última a tracción del FRCM, es posible observar que la conjunción de un mortero mejorado y la malla impregnada permite un mayor aprovechamiento del refuerzo, que se pone de manifiesto al comparar los resultados del mortero de referencia MA con MB y MC. Cabe señalar que el factor de eficiencia máxima (GII-MB) es 540% el del correspondiente sistema de malla sin recubrimiento (GI-MB).

5.5 Evaluación de los resultados obtenidos con relación a otros estudios mediante revisión sistemática

Se realiza una investigación sistemática del comportamiento mecánico de los composites FRCM sometidos a tracción, así como el comportamiento de la interfaz FRCM-hormigón bajo flexión, revisando los estudios experimentales llevados a cabo entre 2015 y 2023 para los ensayos a tracción y entre el 2011 y el 2022 para los ensayos a flexión. Las vigas con el FRCM como refuerzo a cortante se excluyen del análisis de los resultados.

Se diseñó un protocolo para la creación de la base de datos, en el que el motivo para seleccionar los artículos fue la inclusión de investigaciones experimentales sobre materiales de FRCM de carbono dentro del Catálogo de *Web of Science*, seleccionando los artículos que incluían la palabra «carbono» en el título o en el resumen. La investigación se limitó a CFRCM, siendo el carbono el tipo de fibra más utilizada para el refuerzo del hormigón, además de ser el tipo de composites utilizados en la presente investigación.

Los parámetros que se eligieron para la evaluación de los ensayos a tracción fueron:

1. Propiedades de la matriz: resistencia a compresión, resistencia a tracción y módulo elástico.
2. Propiedades de la malla: espaciado, recubrimiento (si hay), densidad, resistencia a tracción, módulo elástico y deformación última.
3. Características de las probetas: dimensiones (largo, ancho y espesor), número de cordones en sentido de la carga y área de tejido transversal.
4. Monitorización y ensayo: tipo de monitorización y adquisición de datos, tipo de ensayo y parámetros de ensayo (velocidad).
5. Resultados: identificación del módulo de elasticidad y resistencia a tracción de cada rama, número de ramas identificables en la curva tensión-deformación del comportamiento a tracción.

De forma similar, para los ensayos a flexión se estudian los siguientes parámetros:

1. Propiedades del soporte: tamaño, material (en el caso del hormigón la resistencia a compresión y a tracción) y si hay, posición y propiedades de la armadura.
2. Propiedades del refuerzo FRCM: propiedades del tejido y la matriz, comportamiento del composite, disposición del refuerzo principal y la posible existencia de refuerzos a cortante y sistemas de anclaje.
3. Monitorización y ensayo: tipo de monitorización y adquisición de datos, tipo de ensayo (soportes intermedios, número de puntos de carga) y parámetros de ensayo (velocidad).
4. Resultados: carga de fisuración y carga última, incremento de mejora con refuerzo de FRCM respecto a la viga de control y modo de fallo.

5.5.1 Base de datos

La base de datos se ha creado con los parámetros descritos para los ensayos a tracción y a flexión. Aparte de las diferencias de las propiedades del material del soporte y del refuerzo, en este estudio se considera la influencia de la configuración del ensayo, ya que existe una gran variabilidad en la literatura.

La Tabla 5.6 presenta la base de datos recopilada para los ensayos a tracción, que incluye los sistemas de adquisición y sistemas de soporte, así como la velocidad de ensayo y el parámetro de recubrimiento o no de las mallas.

Por otro lado, en los ensayos a flexión se encuentra una variabilidad mucho mayor. Las principales configuraciones dependen de si el refuerzo está diseñado para momentos a flexión negativos o positivos. También, en algunos casos, se utilizan diferentes sistemas de anclaje para prevenir el despegue, de forma similar a los utilizados con FRP.

Como se ha mencionado anteriormente, las diferentes disposiciones del refuerzo están relacionadas con el número de apoyos y, en consecuencia, con el número de puntos de ensayo. La Tabla 5.7 presenta la base de datos recopilada para los ensayos a flexión, recogiendo información respecto a la posición del refuerzo, número de capas, adquisición de datos y tipo de ensayo.

Tabla 5.6. Base de datos de los ensayos a flexión

Autores	Año	Nº de probetas	Recubrimiento	Velocidad [mm/min]	Adquisición de datos	Sistema de agarre
Arboleda [90]	2014	1	-	0,25	-	-
Arboleda; Carozzi; Nanni; Poggi [3]	2015	4	Secas (2) Recubiertas (2)	0,25	Extensómetro	Clevis Clamping
Ascione; de Felice; de Santis [26]	2015	1	Secas	0,6	LVDT; Extensómetro; Potenciómetro	Clamping
Bellini; Bovo; Mazzotti [27]	2019	2	Secas	0,1-0,2	Extensómetro	Clamping
Carozzi; Bellini; D'Antino [11]	2017	13	Secas (3) Recubiertas (6)	0,1-1	LVDT; DIC; Extensómetro; Potenciómetro	Clevis Clamping
Carozzi; Poggi [73]	2015	1	Secas	0,1-0,5	Extensómetro	Clamping
Choi; Vachirapanyakun; Orchidbrud; Naidangjav; Ha; Kum [28]	2021	2	-	1	LVDT; Extensómetro	Clevis
D'Antino; Papanicolaou [14]	2017	4	Secas (1) Recubiertas (3)	0,5	2 LVDT	Clamping
D'Antino; Papanicolaou [19]	2018	4	Secas (2) Recubiertas (2)	0,5	LVDT, DIC	Clamping
De Dominicis; Maugeri; Longo; Ricciardi; Gulli; Calabrese [91]	2022	3	Secas (3)	0,2	Extensómetro	Clevis
de Felice; D'Antino; De Santis; Meriggi; Roscini [8]	2020	2	Recubiertas	-	-	-
De Santis; Hadad; De Caso y Basado [71]	2018	2	-	0,25-0,3	Extensómetro	Clevis Clamping
Donnini; Corinaldesi; Nanni [92]	2016	14	Secas (3) Recubiertas (11)	0,3	Extensómetro	Clevis
Ebead; Shrestha; Afzal; El Refai; Nanni [93]	2017	1	-	0,25	Transductor de desplazamiento	Clevis
Estevan; Varona; Baeza; Torres; Bru [94]	2022	1	Recubiertas	0,2	LVDT; DIC	-
Kim; Truong; Park; Choi [95]	2018	6	-	0,5	LVDT	Clamping
Rodríguez-Marcos; Villanueva-Llaurado; Fernández-Gomez [96]	2023	8	Secas (3) Recubiertas (5)	0,5	DIC	Clamping
Su; Wang; Ueda [97]	2022	8	Secas (6) Recubiertas (2)	0,2	2 LVDT	Clevis
Tran; Truong; Choi [98]	2019	9	Secas (3) Recubiertas (6)	0,5	2 LVDT	Clamping
Truong; Lee; Kim [99]	2021	9	Secas (7) Recubiertas (2)	1	2 LVDT, DIC	Clamping
Wei; Zhu; Ueda; Su; Liu; Liu; Tang [100]	2020	7	-	0,2	Extensómetro	Clevis
Younis; Ebead; Shrestha [101]	2020	4	Secas	0,25	Extensómetro	Clevis

Tabla 5.7. Base de datos de ensayos a flexión

Autores	Año	Nº de probetas	Posición del refuerzo	Nº de capas	Adquisición de datos	Tipo ensayo
Hadad; Nanni; Ebead; El Refai [102]	2018	3	Inferior	1/2	Galgas extensométricas, LVDT	3 puntos
Hadad; Erickson; Nanni [71]	2020	4	Inferior	1/4	Galgas extensométricas, 2 LVDT	4 puntos
Bressam; Ghrib; El Ragaby [103]	2022	2	Inferior con anclaje	2	Galgas extensométricas, 2 LVDT	4 puntos
Dambrisi; Feo; Foccaci [104]	2013	6	Inferior/ con anclaje/ con U	2	Galgas extensométricas	4 puntos
Ebead; El Sherif [105]	2019	4	Inferior	1	Galgas extensométricas, 2 LVDT	4 puntos
Ebead; Shrestha; Afzal; El Refai; Nanni [93]	2017	6	Inferior	1/2/3	Galgas extensométricas, LVDT	4 puntos
El Sherif; Wakjira; Ebead [106]	2020	2	Inferior	4	Galgas extensométricas, LVDT	4 puntos
Elghazy; El Refai; Ebead; Nanni [107]	2017	3	Inferior con U	3	Galgas extensométricas	4 puntos
Elghazy; El Refai; Ebead; Nanni [108]	2018	2	Inferior con U	2/3	Galgas extensométricas	4 puntos
Feng; Liu; Zhu; Xing [109]	2020	8	Inferior y superior/ con U	2/3	Galgas extensométricas, 5 LVDT	5 puntos
Jabr; El-Ragaby; Ghrib [110]	2017	2	Inferior con U	2	Galgas extensométricas, 3 LVDT	4 puntos
Khattak; Mansour; El-Maaddawy; Ismail [111]	2021	4	Inferior	2/4	Strain gauge, 2 LVDT	5 puntos
Kim; You; Ryu [112]	2022	5	Inferior/con anclaje	1	2 LVDT	3 puntos
Kim; You; Ryu [113]	2021	4	Inferior	1	2 LVDT	3 puntos
Kim; You; Ryu; Koh; Ahn; Kangs [114]	2020	6	Inferior	1/2	Galgas extensométricas, LVDT	4 puntos
Mandor; El Refai [115]	2022	2	Superior con U/ Inferior con U	2	Galgas extensométricas, 6 LVDT	5 puntos
Raof; Bournas [116]	2017	4	Inferior/ con anclaje	1/3	2 LVDT	4 puntos
Raof; Koutas; Bournas [117]	2017	5	Inferior con U	1/3/5	2 LVDT	4 puntos
Su; Wei; Liang; Zhu; Ueda; Xing [118]	2021	2	Inferior	2	Galgas extensométricas	4 puntos
Su; Zeng; Li; Zhu; Lin; Ueda; Xing [119]	2020	5	Superior e inferior/ superior/ inferior	2	Galgas extensométricas, 4 LVDT	5 puntos
Su; Wei; Zeng; Ueda; Xing; Zhu [120]	2019	4	Inferior	1	3 LVDT	4 puntos
Wei; Ueda; Matsumoto; Zhu [121]	2021	3	Inferior	1/2/4	Galgas extensométricas, extensómetro, 3 LVDT	4 puntos

5.5.2 Discusión

5.5.2.1 Ensayos a tracción

La diferencia en términos de ratio de explotación (resistencia última a tracción del composite respecto a la resistencia a tracción del tejido) según el sistema de ensayo (*clamping* y *clevis*) se analiza estadísticamente. La distribución no es normal, y no se encuentran diferencias significativas entre *clevis* y *clamping*. La Figura 5.13 muestra el ratio de explotación para los sistemas de agarre. El ratio de explotación media y la desviación estándar para *clamping* es $63,03\% \pm 81,70\%$ y para *clevis* es $60,92\% \pm 48,21\%$. Sin embargo, se observa que el comportamiento trilineal en las curvas tensión-deformación solo aparece cuando se emplea el sistema *clamping*. También, para probetas con el mismo mortero y malla, se obtienen mejores resultados en términos de carga última cuando se emplea el sistema *clamping* como puede observarse en los resultados de D.A. Arboleda, F.G. Carozzi y A. Nanni (2016)[3]. La resistencia última a tracción obtenida para el sistema *clamping* fue 1492 MPa mientras que para *clevis* fue 1031 MPa.

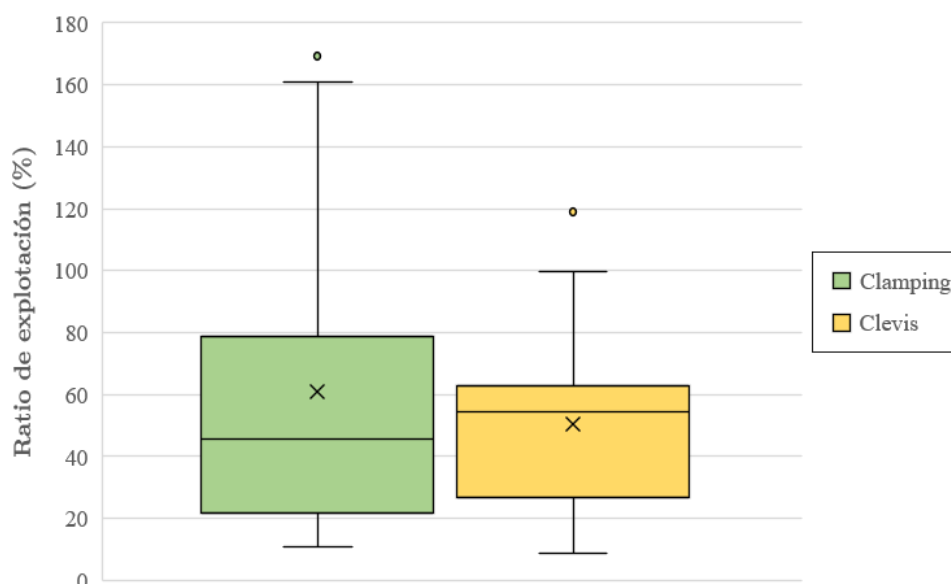


Figura 5.13. Ratio de explotación dependiendo del sistema de agarre

Similarmente, se realiza un análisis para comparar el comportamiento de las fibras con y sin recubrimiento. La distribución no es normal y no hay diferencias significativas entre grupos. La media y desviación estándar es $84,72\% \pm 94,62\%$ para mallas recubiertas y $47,44\% \pm 30,05\%$ para mallas sin

recubrimiento (secas). La Figura 5.14 corresponde a los ratios de explotación para cada grupo. Generalmente, es más común obtener curvas tensión-deformación trilineales para tejidos recubiertos [11,14,19,96,99] que para tejidos secos [3,11,27,73].

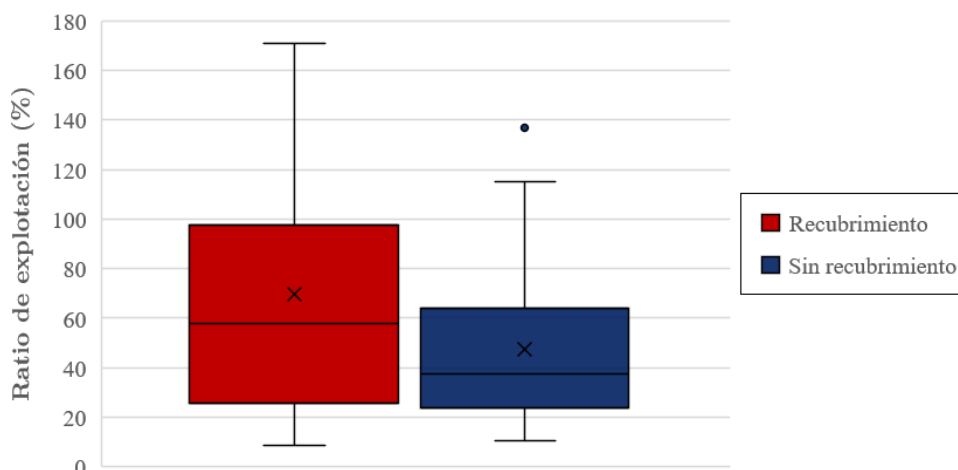


Figura 5.14. Ratio de explotación dependiendo del recubrimiento de las mallas

La Figura 5.15 recoge las curvas idealizadas tensión-deformación de los ensayos analizados. Las curvas se agrupan de acuerdo con la configuración del ensayo (*clamping* y *clevis*) y el recubrimiento de las mallas. Las líneas azules corresponden a las mallas sin recubrimiento, las líneas rojas a las mallas con recubrimiento y las grises a las mallas que no se especifica. Las líneas discontinuas son para ensayos *clevis* y las continuas para *clamping*. La resistencia de fisuración y la resistencia última es claramente mayor en un grupo de probetas con tejido impregnado y ensayado con *clamping*. Debido al gran número de probetas, las curvas se agrupan por el recubrimiento de la malla y el tipo de ensayo para facilitar el análisis.

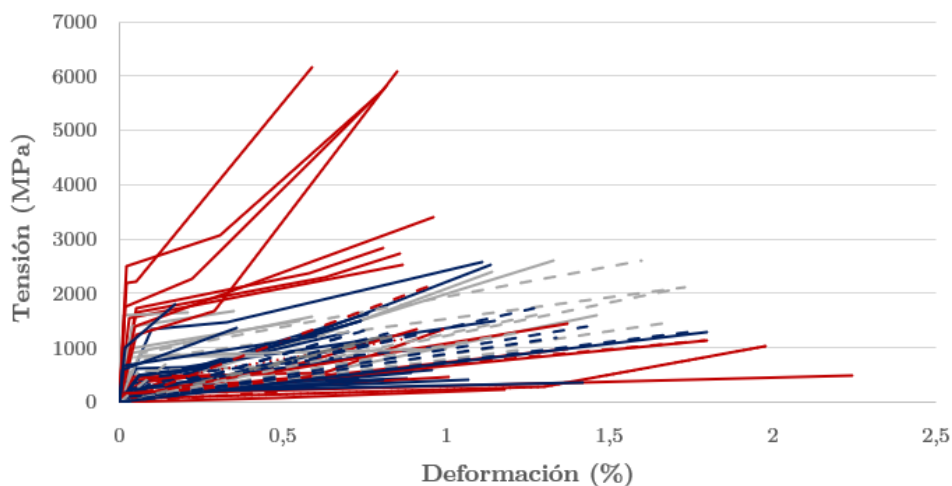


Figura 5.15. Curvas idealizadas tensión-deformación de los sistemas FRCM. Las líneas azules corresponden a tejidos sin recubrimientos, las rojas para tejidos recubiertos y las grises cuando no está especificado. Las líneas discontinuas son para *clevis* y las continuas para *clamping*

Las Figura 5.16 y Figura 5.17 muestran las curvas idealizadas tensión-deformación para los sistemas con FRCM sin y con recubrimiento, respectivamente. Cada figura tiene dos gráficas dependiendo del tipo de ensayo. La escala para la tensión se limita a 2000 MPa para sistemas con mallas sin recubrimiento y 7000 MPa para sistemas con mallas con recubrimiento, por lo que las curvas con diferentes recubrimientos no pueden compararse directamente. El número de probetas de tejido seco ensayadas con *clevis* es 12 y con *clamping* es 24. Hay una gran dispersión en los resultados de las probetas ensayadas a *clamping*, aunque también hay una gran variabilidad en las propiedades de las mallas. La probeta con una resistencia a compresión de 48 MPa y una resistencia a tracción del tejido de 4800 MPa ensayada con *clamping* es el único sistema FRCM con una resistencia de fisuración mayor a 1000 MPa [96].

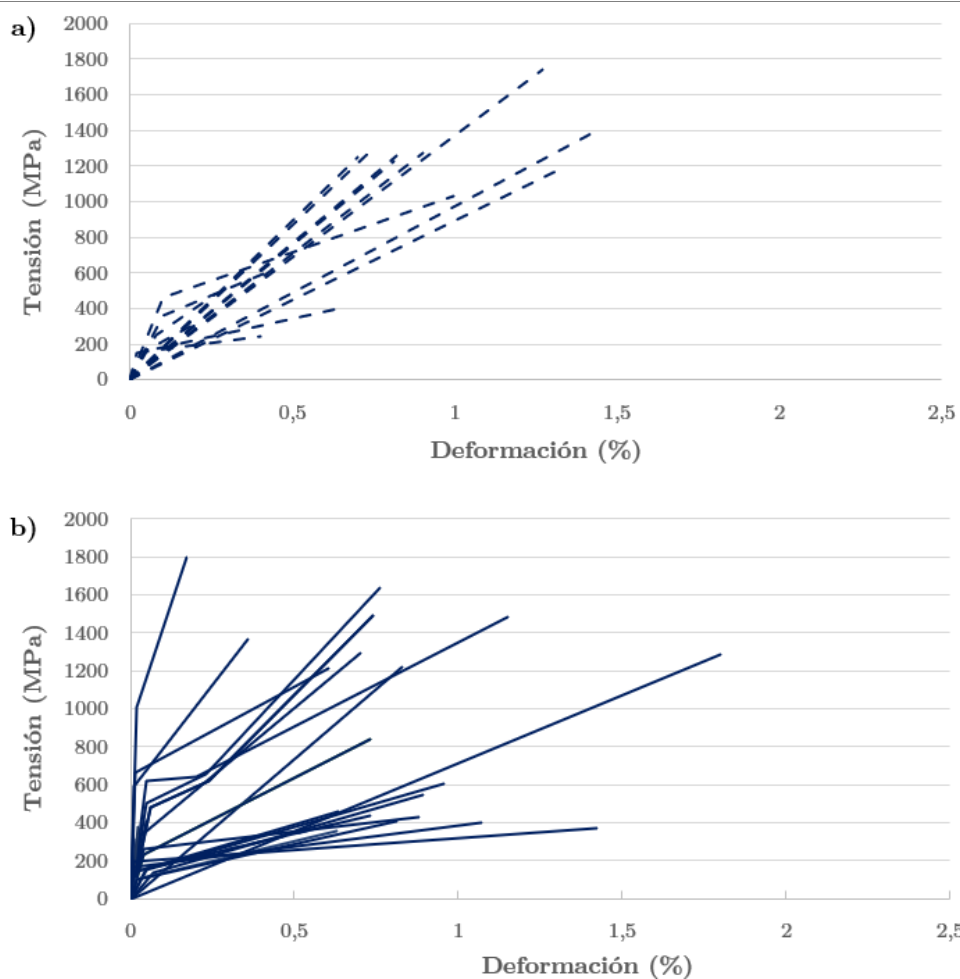


Figura 5.16. Curvas idealizadas tensión-deformación para sistemas de FRCM de mallas sin recubrimiento. a) Clevis, b) Clamping

Los sistemas con mallas recubiertas se han estudiado de manera menos extensa que las no recubiertas, el número de probetas ensayadas con mallas impregnadas es 26 frente a 36 con fibras sin recubrimiento. Aunque en el caso de la malla recubierta, el uso de *clamping* es mucho mayor (23 probetas) que el *clevis* (3 probetas). Hay dos grupos claramente diferenciados en los sistemas ensayados con *clamping*, las probetas con mejor comportamiento tienen una resistencia de fisuración mayor a 1000 MPa y una resistencia última mayor a 2500 MPa [11,14,96]. Las probetas con peor comportamiento tienen una resistencia de fisuración inferior a 500 MPa y una resistencia última inferior a 1500 MPa, la deformación de este grupo también es mayor. Cabe destacar que las propiedades mecánicas del tejido y la matriz son similares en ambos grupos, así como la configuración del ensayo, siendo la única diferencia posible el tipo de recubrimiento (resina acrílica o epoxi).

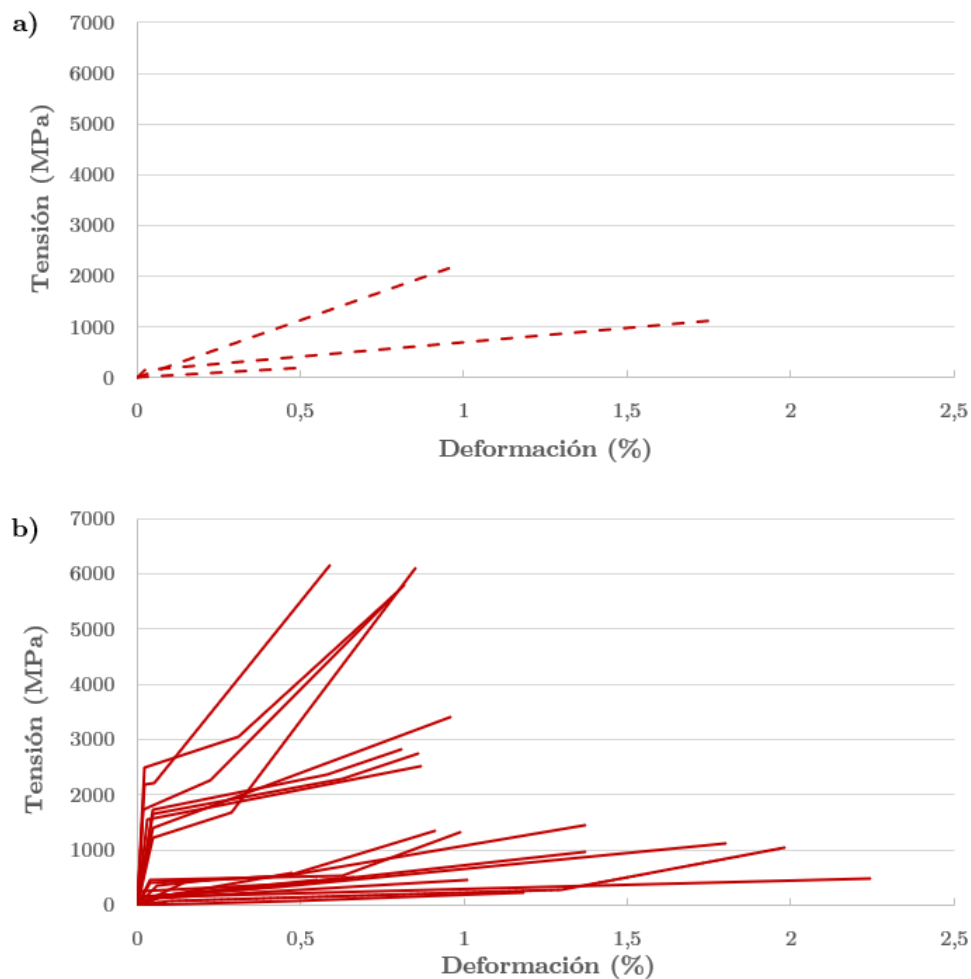


Figura 5.17. Curvas idealizadas tensión-deformación para sistemas de FRCM de mallas recubiertas.
 a) Clevis, b) Clamping

La Figura 5.18 presenta los resultados en términos de tensión última respecto a la resistencia a tracción de la malla.



Figura 5.18. Resistencia última del FRCM versus la resistencia a tracción del tejido

Se puede observar en la Figura 5.18 que la mayoría de los tejidos tienen una resistencia a tracción en el rango de 1500 MPa a 2500 MPa. Dentro de este grupo, hay una gran variación respecto a la resistencia última del composite, entre 1000 MPa y 3000 MPa, sin correlación entre la resistencia a tracción del tejido y del FRCM. Hay un pequeño grupo de probetas, con el tejido entre 3500 MPa y 4000 MPa, en el cual la explotación del composite es remarcable, alcanzando una resistencia última hasta dos veces la del tejido. No parece haber mejora significativa utilizando tejidos de 5000 MPa, debido a que el comportamiento depende más de la adherencia matriz-tejido y del deslizamiento que de la ruptura del tejido. Las 12 probetas [11,14,27,28,71,96,97] con mayor resistencia última del composite a tracción que la resistencia del tejido tienen diferentes propiedades mecánicas del tejido (entre 441 MPa y 3600 MPa) y la matriz (resistencia a compresión del mortero entre 10 MPa y 71 MPa), diferentes configuraciones de ensayo (*clevis* y *clamping*) y recubrimiento del tejido. Entonces, se puede concluir que no hay parámetros individuales determinantes para un buen comportamiento, ya que no comparten ninguna característica.

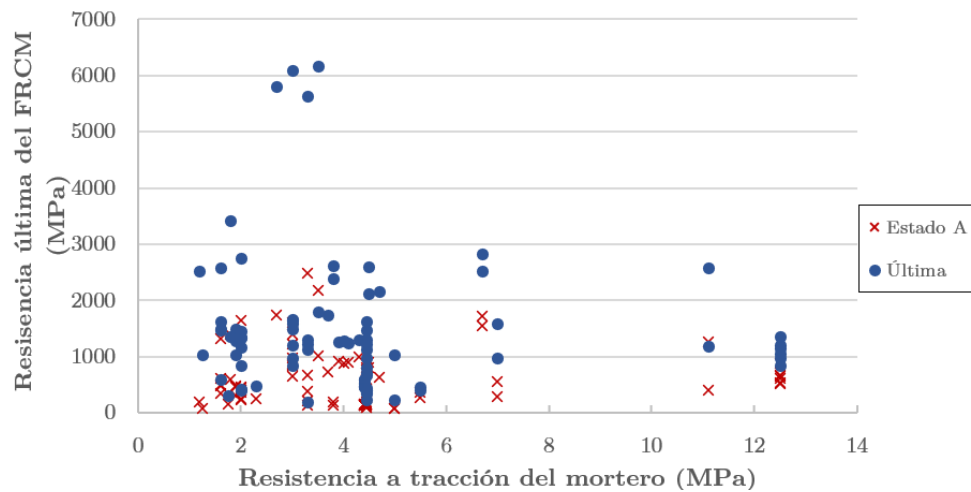


Figura 5.19. Resistencia de fisuración y última a tracción del FRCM versus la resistencia a tracción del mortero

La Figura 5.19 presenta los resultados del composite frente a la resistencia a tracción del mortero. Para cada valor de resistencia del mortero, hay un par de valores del FRCM, la cruz corresponde a la resistencia de fisuración (estado A) y el punto a la resistencia última. No existe correlación

entre la resistencia del mortero y la del FRCM, ni de fisuración ni última. La resistencia a tracción más común del mortero está entre 2 MPa y 6 MPa, y la mayor resistencia del composite corresponde a una resistencia del mortero de 3 MPa. La resistencia de fisuración del FRCM no afecta a la resistencia última, el ratio entre la resistencia última y de fisuración es de entre 2 y 4 para los sistemas de FRCM con mayor resistencia última. La resistencia a tracción del mortero no afecta a la relación entre la resistencia última y de fisuración, con los mayores ratios encontrados para resistencias del mortero inferiores a 5 MPa.

5.5.2.2 Ensayos a flexión

El análisis se enfoca en el comportamiento a flexión, evaluando así la relevancia de la inclusión de sistemas de anclaje de refuerzos longitudinales, y las diferencias en términos de vigas isostáticas e hiperestáticas.

El primer análisis incluye la comparación de los modos de fallo. En la Figura 5.20, se presentan la distribución de modos de fallo de las diferentes configuraciones de las vigas.

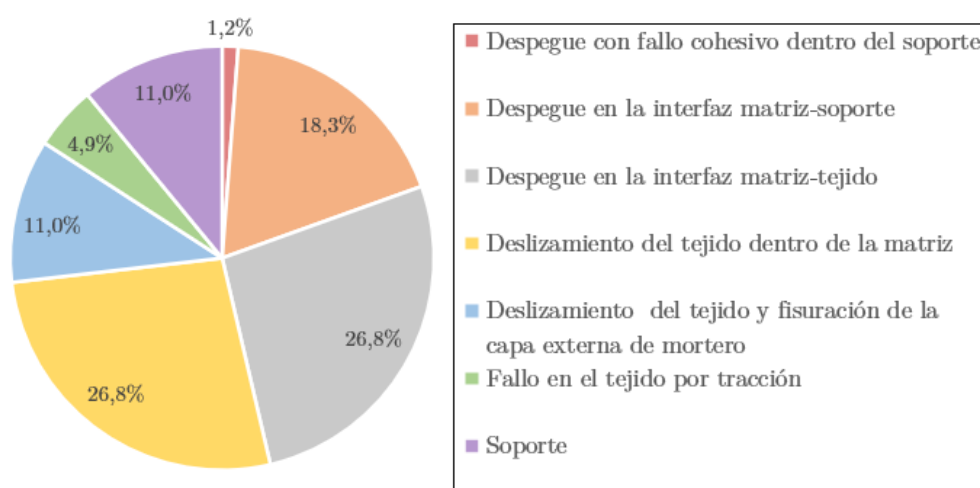


Figura 5.20. Modos de fallo

Se puede observar en la Figura 5.20 que los modos de fallo predominantes son el deslizamiento del tejido dentro de la matriz y el despegue en la interfaz matriz-tejido. Esto, junto con el deslizamiento del tejido y fisuración de la capa externa del mortero, son modos de fallo similares definidos en la CNR-DT 215 (2018) [24]. En todos los casos,

corresponden a una resistencia de adherencia insuficiente entre la matriz y el tejido, siendo la principal diferencia el despegue completo de algunas capas de tejido de primera capa de matriz, o mantener alguna adherencia entre las diferentes capas de la matriz. Corresponden a modos de fallo indeseados relacionados con la pobre adherencia reportada previamente en la mayoría de los ensayos a tracción, que dificulta el aprovechamiento de las propiedades de los compuestos.

La razón del fallo del soporte puede deberse a la optimización del diseño del ensayo y el tamaño de la probeta de acuerdo con el ratio de refuerzo [114], y esto se alcanzó en el 11% de todos los ensayos. Este modo de también puede deberse a una sección insuficiente del hormigón correspondiente a las bajas cargas últimas independientemente del diseño del refuerzo, previo a otros fallos, o incluso, a un bajo aprovechamiento de los refuerzos de cargas últimas respecto a las altas cargas de las vigas de control [115,119].

Es más interesante que el 19,5% de los ensayos falla por un despegue en la interfaz matriz-soporte o un despegue cohesivo del refuerzo, siendo los modos de fallo más relacionados con los composites FRP, en los que el comportamiento del material compuesto se mantiene hasta el fallo de la estructura. En este caso, dependiendo de las propiedades adherentes de la interfaz soporte-matriz, se puede observar un fallo cohesivo [111] o más comúnmente un despegue del refuerzo [109,114,116,117,121].

Si estudiamos el modo de fallo según el tipo de ensayo, podemos observar que para la flexión de 3 puntos el 41,7% de los ensayos fallo por un deslizamiento del tejido dentro de la matriz y el 58,3% por el despegue de la interfaz matriz-tejido. En los ensayos a flexión de 4 puntos, el modo de fallo es más variable, siendo predominante el deslizamiento del tejido dentro de la matriz (22,2%), seguido por el despegue de la interfaz matriz-tejido (20,4%) y despegue de la interfaz matriz-soporte (18,5%). En los ensayos a flexión de 5 puntos, la distribución de los modos de fallos es similar a los de 4 puntos,

aunque en este caso, el despegue de la interfaz matriz-soporte y el deslizamiento del tejido dentro de la matriz son los predominantes (31,3%).

Se estudian las propiedades mecánicas y geométricas de la viga y sus componentes, así como la configuración del ensayo, de las vigas con el incremento de carga en el rango del 10% superior. Se analizan las probetas provenientes de 6 artículos [93,106,108,114,117,122] y todos eran ensayos de 4 puntos. El FRCM estaba situado en la cara inferior y solo una de las vigas tenía anclaje en U [108]. El modo de fallo no es común: tres vigas fallaron en el soporte [114], aquellas correspondientes a una viga tipo losa con un canto de 20 cm, un ancho de 1 m y un largo de 1,8 m; dos fallaron por el deslizamiento del tejido (dentro de la matriz y con fisuración de la capa externa del mortero) [93,106]; una fallo por el despegue de la interfaz matriz-soporte [117] y una fallo por el despegue en la interfaz matriz-tejido [122]. La resistencia a compresión del hormigón de la viga varía entre 20 MPa y 68 MPa, con una resistencia a compresión de 40 MPa para la viga con mayor incremento [106]. La mayoría de las mallas no tenían recubrimiento, la única viga reforzada con un tejido recubierto tuvo un incremento en la carga última respecto a la carga de control del 95% [122]. La resistencia a tracción del tejido es muy variable (450-4800 MPa), así como el número de capas empleadas (1-5). La viga reforzada con el tejido con mayor resistencia (4800 MPa) y cinco capas tiene el mayor incremento [106]. La Figura 5.21 corresponde al ratio de carga última de la viga respecto a la carga de la viga de control dependiendo el modo de fallo. Se puede ver que todas las probetas con un fallo por ruptura del tejido tienen un incremento de carga última entre 20% y 40%, que es el menor rango en todos los modos de fallo. Por otro lado, el fallo debido al soporte tiene el mayor rango, los menores incrementos son el resultado de un diseño incorrecto del soporte (alta resistencia de las vigas de control o cargas últimas de las vigas independientemente del diseño del refuerzo) y los mayores incrementos debido a la explotación completa del refuerzo FRCM.

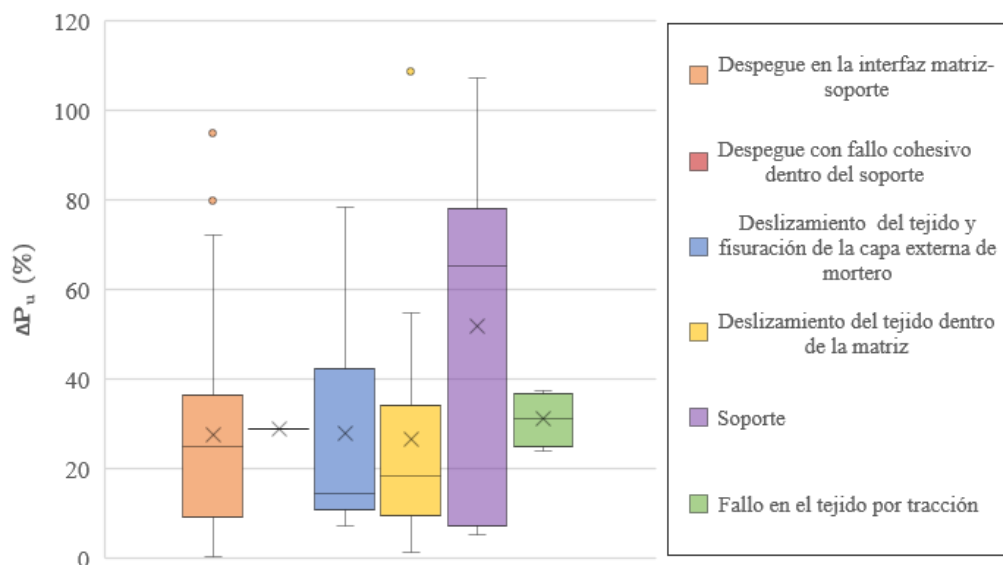


Figura 5.21. Ratio de carga última/ carga de control (ΔP_u) dependiendo del modo de fallo

La Figura 5.22 presenta las diferencias de ratio de carga última respecto a la carga de la viga de control según la presencia de anclajes. La distribución no es normal y no se encuentran diferencias significativas entre los sistemas sin anclaje, los anclados, o dentro de los diferentes sistemas de anclaje. La media y desviación típica del incremento de carga última para sistemas sin anclar es $27,05\% \pm 12,53\%$, para anclados es $33,09\% \pm 23,24\%$ y para anclados en U es $27,33\% \pm 23,29\%$.

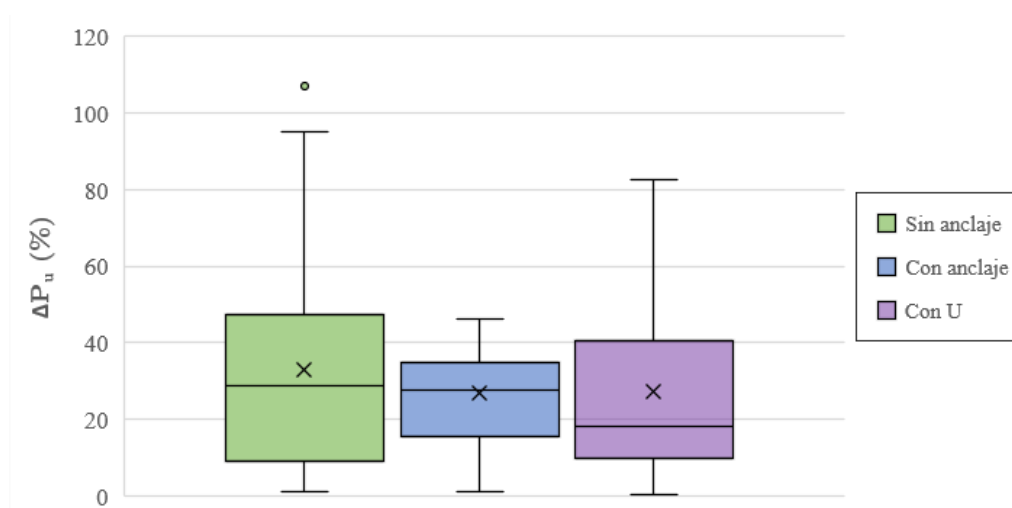


Figura 5.22. Ratio de carga última/ carga de control (ΔP_u) dependiendo de si existe anclaje y de su tipo

Similarmente a los ensayos a tracción, se evalúa la influencia potencial de los recubrimientos en la explotación de las fibras en las vigas. La Figura 5.23 muestra el ratio de carga última respecto a la carga de control para vigas

reforzados con tejidos con o sin recubrimiento. La distribución no es normal y no hay diferencias significativas entre grupos. La media y desviación estándar fueron $26,91\% \pm 19,61\%$ para mallas impregnadas y $40,33\% \pm 33,23\%$ para las no impregnadas. El modo de fallo de las vigas reforzadas con tejido recubierto es el deseado (soporte, ruptura a tracción del tejido, despegue del FRCM con fallo cohesivo dentro del soporte o despegue de la interfaz matriz-soporte) en el 45% de las probetas mientras que en mallas sin recubrimiento en el 44%.

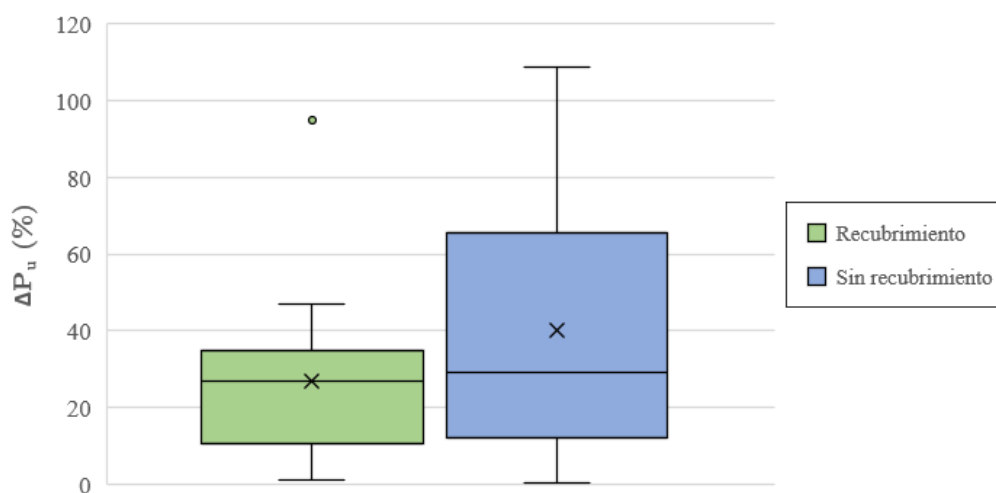


Figura 5.23. Ratio de carga última/ carga de control (ΔP_u) dependiendo del recubrimiento de la malla

La Figura 5.24 presenta el incremento de la carga última respecto a la viga de control dependiendo del número de capas del composite. Las diferencias entre grupos se analizan estadísticamente. La distribución no es normal y se encuentran algunas diferencias significativas entre algunos grupos. El test ANOVA empleado fue *Kruskal-Wallis* con un *p-value* significativo de 0,05. La media y desviación estándar de las vigas con 1,2,3 o 4 capas fueron $31,77\% \pm 19,04\%$, $20,51\% \pm 23,35\%$, $42,20\% \pm 25,05\%$ y $47,11\% \pm 39,69\%$, respectivamente. No hay diferencias estadísticas entre los grupos con 1, 3 o 4 capas, y tampoco entre 2 y 4 capas. Las diferencias se deben principalmente a la variabilidad en las propiedades mecánicas de los sistemas FRCM, así como las del soporte, y no tan significativamente al número de capas de tejido empleadas.

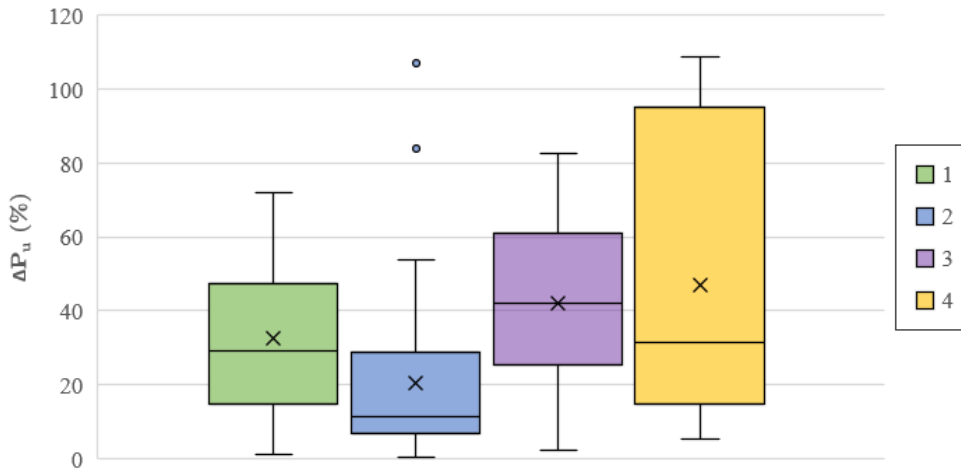


Figura 5.24. Ratio de carga última/ carga de control (ΔP_u) dependiendo del número de capas de tejido

También, se analiza la influencia de la resistencia a compresión del hormigón de la viga de soporte en el comportamiento general de las vigas, como puede observarse en la Figura 5.25. Se puede observar cómo la resistencia a compresión del soporte usualmente varía entre 20 y 50 MPa, incluso aunque no hay una fuerte correlación, generalmente el ratio de la carga última aumenta con la resistencia a compresión.

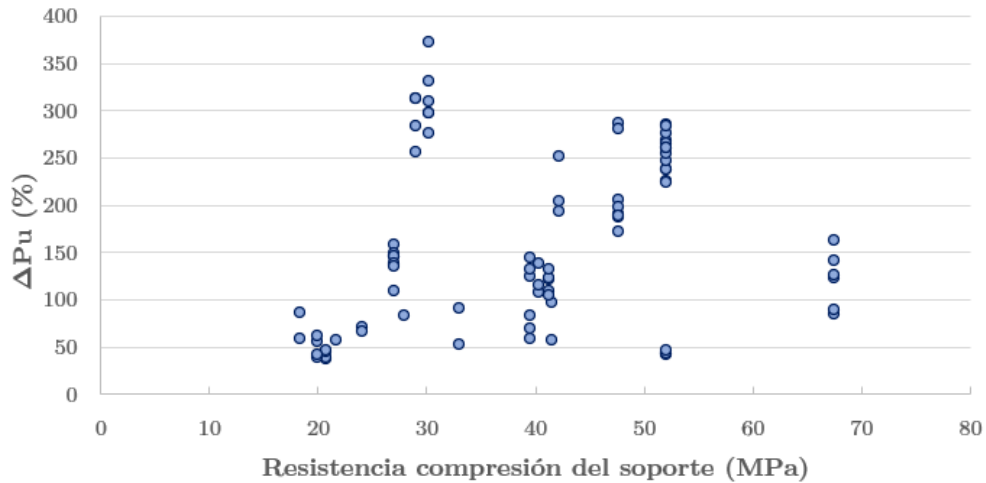


Figura 5.25. Ratio de carga última/ carga de control (ΔP_u) dependiendo versus la resistencia a compresión del soporte

Capítulo 6. Plan experimental y resultados de vigas de hormigón reforzadas con FRCM ensayadas a flexión

6.1 Introducción

Una vez establecido el comportamiento tensión-deformación a tracción de los FRCM es necesario evaluar el comportamiento de los composites junto a los soportes. Esto puede realizarse mediante ensayos de cortante [123–126] como en los sistemas FRP o de flexión [106,113,118,122]. En la literatura, existe una gran variabilidad de ensayos a flexión en vigas de hormigón reforzadas con FRCM, con multitud de parámetros implicado, no existiendo una pauta clara sobre cómo realizar los ensayos. El número de ensayos a flexión de vigas de hormigón reforzadas externamente con FRCM de carbono es limitado; la aplicación de estos ensayos comenzó en 2013 [104], pero no comienza a extenderse hasta 2017 [93,107,110,116,117]. La disposición geométrica del refuerzo depende de si está diseñada para momentos flectores negativos o positivos. Además, junto a los refuerzos a flexión pueden incluirse refuerzos a cortante, o anclajes para evitar el despegue como ocurre en los FRP (Figura 2.4). Otro aspecto que dificulta la comparación del rendimiento de los composites del FRCM en las investigaciones previas es el número de capas de tejido empleadas, que llegan a ser de 5 [127].

En la literatura, los ensayos a flexión pueden ser de 3 puntos [102,112,114] o de 4 puntos [93,103–110,118,120,121,127,128]. Las vigas ensayadas en la literatura varían entre 1,1 m [118] y 4,8 m [111]. Todos los

ensayos de vigas de hormigón reforzados con carbono disponían de armadura, aunque la cantidad y condición (algunos tenían problemas de corrosión) varía de forma considerable. La resistencia a compresión del hormigón de las vigas ensayadas está entre 18 MPa [71] y 68 MPa [93]. Todo esto, junto con la heterogeneidad de los FRCM, dificulta la extracción de conclusiones sobre el rendimiento de los sistemas de material compuesto.

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos de vigas reforzadas con tres tipos de FRCM en una o dos capas. Las vigas ensayadas contaban con armadura interna para evitar el fallo por cortante, aunque no contra el momento flector (mediante la desconexión de las armaduras longitudinales en el centro del vano). El objetivo de los ensayos es evaluar el comportamiento de los materiales compuestos en función de la matriz y el número de capas de tejido, y comparar el comportamiento del FRCM como refuerzo de estructuras de hormigón con las curvas tensión-deformación obtenidas a partir de ensayos de tracción uniaxiales (Figura 5.7).

6.2 Descripción de la campaña experimental

La matriz de ensayos consistía en 16 vigas de hormigón armado reforzadas con tres sistemas de composites diferentes de una capa y dos sistemas de dos capas. Se ensayaron tres vigas de capa tipo y adicionalmente se ensayó una viga sin FRCM como viga de control para facilitar el análisis independiente de la carga soportada por el refuerzo. Las vigas son de 900 mm de largo, 120 mm de ancho y 130 mm de canto. Están reforzadas con armadura a cortante para evitar este tipo de daño y no interferir con la evaluación del FRCM como refuerzo a flexión. Adicionalmente, se colocó una armadura mínima longitudinal por razones constructivas; para evitar la colaboración de la armadura longitudinal contra el momento a flexión, se realiza una entalla de 70 mm de profundidad que interrumpe la armadura longitudinal inferior, garantizando que el patrón de fisuración y la plastificación del hormigón se concentren en la mitad del vano desde el inicio del ensayo. Vigas de configuración similar se utilizaron en [129]. Se realizó un

ensayo a flexión de tres puntos con una luz de 800 mm, como se muestra en Figura 6.1.

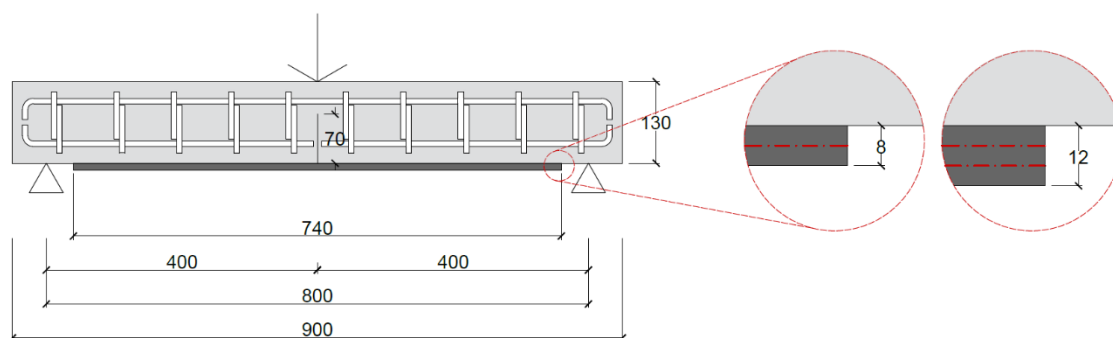


Figura 6.1. Geometría de la viga (mm)

El proceso de fabricación de las vigas consistió en: i) verter el hormigón en los encofrados de las vigas, extrayendo probetas para determinar la resistencia a compresión del hormigón; ii) curar de las vigas de hormigón durante 90 días; iii) abrir la entalla mediante un disco de sierra; iv) aplicar los sistemas de FRCM como refuerzo externo (humedeciendo las superficies de contacto, vertiendo una capa de mortero, colocando la malla y vertiendo la segunda capa de mortero, este proceso se repite cuando el refuerzo está formado por dos capas de tejido); v) preparar las probetas para la técnica DIC (pintado de las probetas con un primer elástico blanco y colocar un patrón moteado prediseñado mediante un gel de transferencia). Las condiciones de curado de las vigas y los refuerzos fueron a temperatura constante entre 18°C y 20°C y una humedad relativa de 60%.

6.2.1 Materiales empleados

Todas las vigas están fabricadas con el mismo tipo de hormigón. El hormigón se diseñó para tener una resistencia a compresión de 30 MPa y se empleó la siguiente dosificación por m³: 300 kg de cemento Portland con una resistencia de 42,5 MPa, 1055 kg de arena hasta 4 mm, 260 kg de áridos de tamaño entre 4 y 8 mm, 660 kg de árido entre 6 y 12 mm y 170 kg de agua. Como se trata de un producto no premezclado, el hormigón se ensayó de acuerdo a la UNE-EN 12390-3:2020 [43]. Se ensayaron 5 probetas y se obtuvo una resistencia a compresión media de 31,7 MPa. La armadura está formada por barras corrugas de acero normalizado de 8 mm de diámetro. La

resistencia a tracción y el módulo de elasticidad del acero es de 545 MPa y 210 GPa, respectivamente.

El tejido seleccionado tras el ensayo a tracción de los composites (Capítulo 5) fue la malla de carbón impregnada (GII) debido a los mejores resultados alcanzados. La descripción de la malla está recogida en la sección 4.2 y las propiedades mecánicas en la Tabla 4.1.

Se han utilizado tres tipos de morteros como matrices de los FRCM aplicados a las vigas. Los tres morteros tienen una resistencia a compresión entre los 40 MPa y los 52 MPa. Pero mientras MA2 es un mortero convencional de albañilería, MB y MD son morteros mejorados diseñados específicamente para reparación. La descripción de los morteros y sus propiedades mecánicas se encuentran detallados en la sección 4.3.

Los resultados obtenidos para cada sistema de FRCM (GII-MA2; GII-MB y GII-MD) para cada estado obtenidos mediante ensayos a tracción se recogen en la Tabla 5.2 del Capítulo 5.

La nomenclatura de las vigas ensayadas, el sistema de FRCM utilizado y el número de capas se recogen en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Matriz de ensayos de las vigas reforzadas con FRCM

NOMENCLATURA	SISTEMA	TEJIDO	MATRIZ	Nº DE CAPAS
VREF	-	-	-	-
V-1GII-MA2	GII-MA2	GII	MA2	1
V-1GII-MB	GII-MB	GII	MB	1
V-1GII-MD	GII-MD	GII	MD	1
V-2GII-MB	GII-MB	GII	MB	2
V-2GII-MD	GII-MD	GII	MD	2

6.2.2 Ensayos e instrumentalización

Se han realizado ensayos de flexión de tres puntos para evaluar el comportamiento de los sistemas de FRCM cuando están adheridos a hormigón. La configuración utilizada es similar a la empleada por Calabrese et al. [130], con el hormigón encima de la entalla plastificada desde los primeros estados de carga, y por tanto, trabajando como rótula. Se diseñó

una plataforma de flexión ad hoc para adaptar la máquina al ensayo, y se utilizó una máquina de ensayo electromecánica *Servosis ME-405/50/5* con una célula de carga *REP Transducer Type TC 4 50 kN* como se muestra en la Figura 6.2. Se diseñó un banco específico utilizando perfiles estructurales, se colocaron dos rodillos móviles de 45 mm a una distancia de 800 mm para soportar las probetas, que actúan como soportes puntuales. Además, se colocó un rodillo de 20 mm en el centro del vano para aplicar la carga. La carga estática se aplicó mediante un control de desplazamiento con una ratio de 1,2 mm/min.

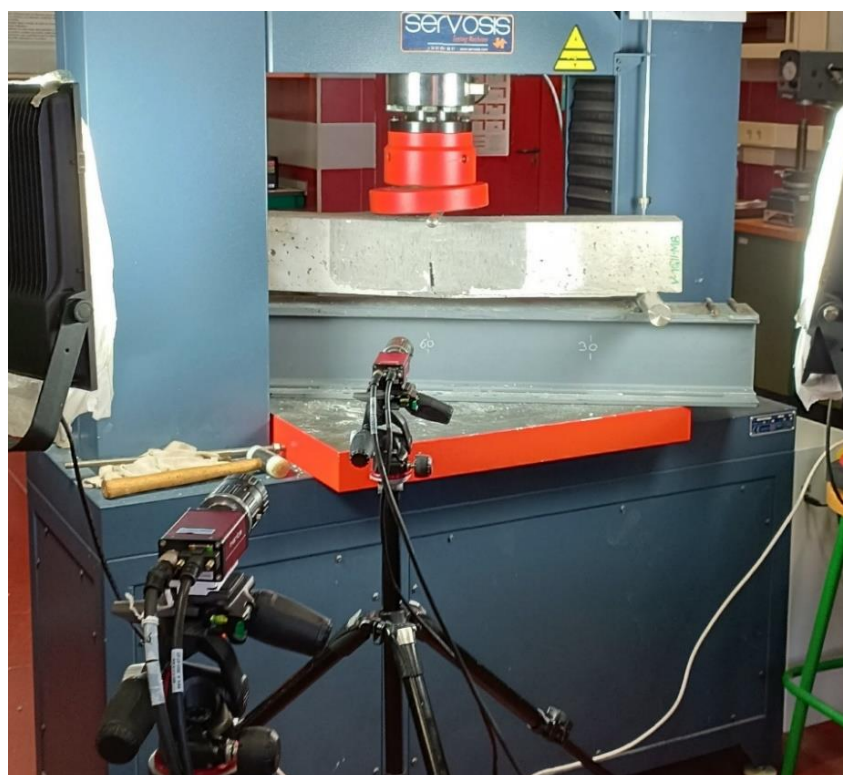


Figura 6.2. Configuración del ensayo

Las medidas de los desplazamientos y deformaciones en las vigas ensayadas se llevaron a cabo mediante la técnica de Correlación Digital de Imagen (DIC). Esta técnica permite calcular estos parámetros mediante imágenes obtenidas durante el ensayo, comparando las imágenes obtenidas en distintos estados de carga con una imagen inicial de referencia sin deformación [80]. Debido a la naturaleza del ensayo y que las vigas tienen una superficie plana con las deformaciones principales en los ejes horizontales y verticales, no se tienen en cuenta las deformaciones fuera del plano y se

emplea un enfoque DIC en 2D. De hecho, se utiliza un doble enfoque 2D-DIC con diferentes escalas: un análisis de un área mayor para conocer el comportamiento de la viga en torno a la entalla (*macro*) y un análisis más detallado para conocer el comportamiento de la interfaz hormigón-refuerzo y el comportamiento del composite (*micro*) (Figura 6.3).

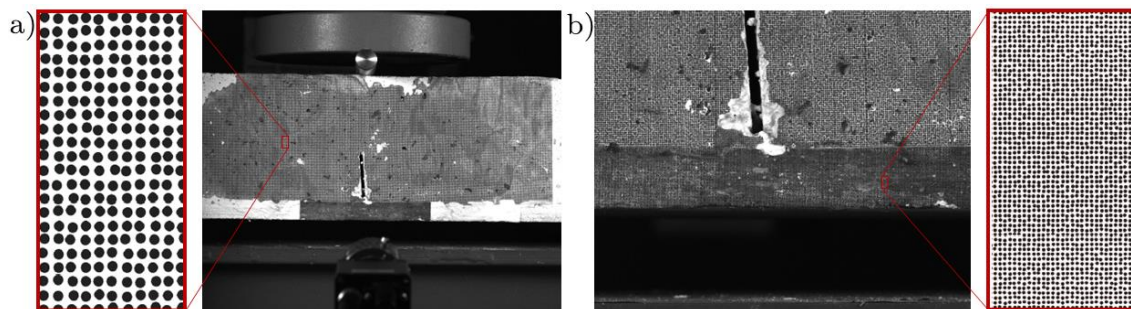


Figura 6.3. Doble enfoque 2D-DIC: a) macro, b) micro

En ambos casos, la superficie de las probetas se preparó previamente para el análisis del DIC. Primero, la superficie se imprimó con una pintura blanca elástica y, a continuación, se generó sobre ella un patrón moteado (*Speckle pattern*). En este caso, se utilizó un patrón artificial moteado generado por ordenador que se imprimió y transfirió a la superficie de las probetas. El patrón se evaluó con el gradiente de intensidad media (*MIG*) [83] para validar que fuera distinto, único, no periódico y con una escala de grises diferenciada y estable [82]. Como el patrón se ha generado artificialmente por ordenador para cumplir los requisitos, el valor medio del MIG era 45 con un coeficiente de cobertura era 44% que es considerado el óptimo por Lecompte et al. [84].

Se diseñó un prototipo de 2D-DIC personalizado basado en la configuración estándar utilizada en los ensayos de caracterización mecánica [85,131] para adquirir las imágenes. El prototipo se compone de dos cámaras de alta resolución Manta G-917 B 1" Monocromática CCD equipadas con lentes macro de 50 mm y luces LED para mejorar la iluminación y facilitar la adquisición de imágenes (Figura 6.2). Se utilizaron un sistema de adquisición de datos Quantum junto a un controlador lógico programable (PLC) Omron CP1H para sincronizar y programar el disparo de las diferentes

cámaras. Estos dispositivos permiten sincronizar los datos proporcionados por la máquina de ensayo y asociarlos con las imágenes correspondientes.

Se emplearon dos cámaras independientes para los enfoques macro y micro, aunque ambas capturaban las imágenes simultáneamente. Como ambas áreas se medían en el centro del vano, el eje de las cámaras estaba alineado y situado perpendicularmente al plano de medida mediante un anclaje *socket*. No obstante, la altura de las cámaras es diferente, ya que el centro óptico de la cámara para el enfoque macro se encuentra en la entalla en el centro de la viga, mientras que el centro óptico del enfoque micro se encuentra en la parte inferior de la viga, en el refuerzo. Las cámaras también se posicionaron a una distancia diferente. Para el enfoque macro, se situó la cámara a 1,25 m del plano de medida capturando un área de 375 x 300 mm con un GSD de 0,11 mm/px. Para el enfoque micro, la distancia del plano de medida era 0,5 m con un área de medida aproximada de 125 x 100 mm y un GSD de 0,04 mm/px, proporcionando mayor detalle y precisión de esta área de interés. En ambos casos, dada la baja velocidad de desplazamiento del ensayo, las imágenes se adquieren a 1 FPS con la primera imagen tomada antes de empezar el ensayo para obtener la imagen de referencia sin deformaciones. Se ajustaron una velocidad de obturación de 1/100 s y una apertura de f8 para obtener imágenes con la adecuada iluminación, profundidad de campo y nitidez.

Una vez que las imágenes han sido capturadas, estas son procesadas usando el software libre *Ncorr* para obtener los desplazamientos y las deformaciones, de forma análoga a los ensayos a tracción de FRCM. Este proceso consiste en dividir la región de interés (*ROI*) en subconjuntos de píxeles. *Ncorr* usa *zero-mean normalised cross-correlation (ZNCC)* [87] para analizar y comparar los subconjuntos, un proceso viable por el patrón moteado en escala de grises. La aplicación de este criterio a todos los subconjuntos del ROI y las sucesivas imágenes se lleva a cabo mediante algoritmos de optimización combinados con interpolaciones para alcanzar precisión de sub-píxeles [88].

6.3 Resultados de la campaña experimental y discusión

Los resultados experimentales se recogen en la Tabla 6.2. Los principales parámetros estudiados son la carga última y la flecha, que están relacionados con la carga última y la resistencia a tracción en el refuerzo de FRCM. La deformación en el FRCM se evaluó utilizando los datos obtenidos mediante el DIC, y se calculó la correspondiente tensión de adherencia (media). Las fibras son observables desde el lateral de la viga, ya que no existe matriz recubriéndolas. La Figura 6.4 muestra la deformación obtenida con el DIC en diferentes estados de carga. Finalmente, la carga última de cada viga se comparó con la viga de referencia (VREF) que no está reforzada para calcular el incremento de la carga última alcanzado con cada sistema de FRCM.

La flecha se mide mediante el DIC, que proporciona medidas similares, pero más precisas que el desplazamiento de la máquina. Los desplazamientos se midieron en un punto a 20 mm del borde superior en el centro de la viga.

El comportamiento de las vigas de hormigón armado reforzadas con FRCM se analizó mediante el análisis de tradicional de la sección transversal [132] para determinar la fuerza de tracción a la que está sometido el material compuesto. La tensión en el FRCM se calculó con la fuerza de tracción obtenida del equilibrio y con la sección transversal de tejido ($2,09 \text{ mm}^2$ para una capa y $4,19 \text{ mm}^2$ para dos capas). El momento de la viga se calcula con la carga aplicada y siendo la luz entre soporte de 80 cm. Se asume que el momento de la sección y el brazo mecánico entre las fuerzas es conocido, siendo 127,1 mm para una capa de refuerzo y 129,1 mm para dos capas, ya que el hormigón plastifica desde el comienzo evitando el movimiento de la línea neutra. La línea neutra se identifica mediante el DIC, y está situada a 6,9 mm del borde superior.

El modo de fallo predominante fue el despegue en la interfaz matriz-tejido. Cuando los refuerzos están formados por dos capas de tejido, el despegue ocurre en la capa interna, la capa más cercana al soporte. Solo una

de las vigas, B-2GII-MD tuvo un modo de fallo diferente, el despegue de la interfaz matriz-soporte.

Tabla 6.2. Resultados experimentales

Viga	Carga última (kN)	Flecha (mm)	Tensión max FRCM (MPa)	Deformación FRCM (%)	Tensión de adherencia (MPa)	Incremento de carga	Modo de fallo
VREF	4,53	5,13	-	-	-	-	-
V-1GII-MA2-1	8,97	4,04	6740	1,78	0,85	-	C
V-1GII-MA2-2	8,62	2,83	6476	1,65	0,55	-	C
V-1GII-MA2-3	9,93	3,59	7462	1,71	0,65	-	C
V-1GII-MA2	9,17	3,49	6893	1,71	0,68	203%	-
V-1GII-MB-1	9,61	3,27	7221	0,58	0,58	-	C
V-1GII-MB-3	14,76	5,06	11 084	2,43	0,95	-	C
V-1GII-MB	12,19	4,17	9153	1,51	0,77	269%	-
V-1GII-MD-1	15,73	2,81	11 818	0,87	0,83	-	C
V-1GII-MD-2	13,84	6,49	10 397	0,95	0,80	-	C
V-1GII-MD-3	16,43	5,24	12 345	1,18	1,04	-	C
V-1GII-MD	15,33	4,85	11 520	1,00	0,89	338%	-
V-2GII-MB-1	20,36	6,28	7572	1,19	1,30	-	C
V-2GII-MB-2	20,33	4,80	7516	0,76	1,25	-	C
V-2GII-MB-3	20,29	5,32	7505	1,62	1,22	-	C
V-2GII-MB	20,33	5,47	7516	1,19	1,26	449%	-
V-2GII-MD-1	13,93	2,92	5152	0,77	0,77	-	C
V-2GII-MD-2	18,28	4,90	6760	0,78	1,16	-	C
V-2GII-MD-3	15,40	5,08	5693	1,02	1,11	-	B
V-2GII-MD	15,87	4,30	5868	0,86	1,01	350%	-

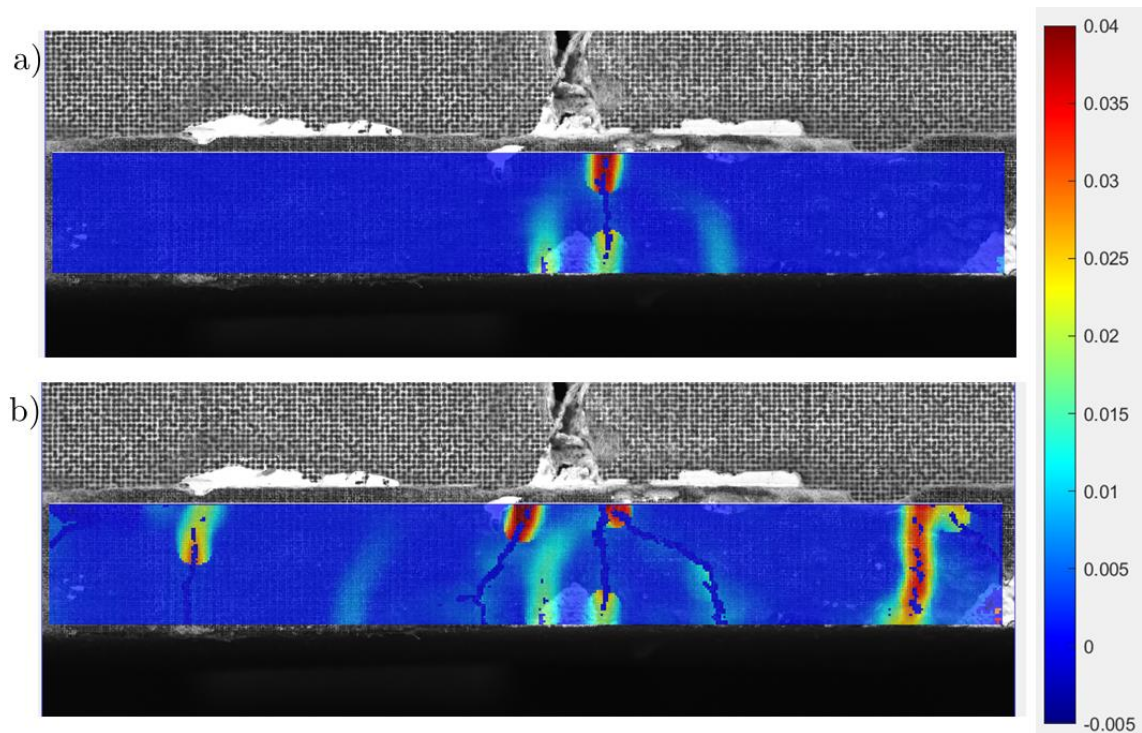


Figura 6.4. Deformación del FRCM medida con DIC para V-2GII-MD a) Carga de 7,1 kN b) Carga de 13,4 kN

La Figura 6.5 muestra las curvas carga-flecha de las vigas reforzadas con FRCM. Todas las vigas reforzadas soportaron una carga superior a la viga de control, con un incremento de carga entre 200% para las vigas reforzadas con una capa de GII-MA2 y 449% para la tipología V-2GII-MB. El comportamiento de las vigas de cada serie fue similar, especialmente en los primeros estados de carga.

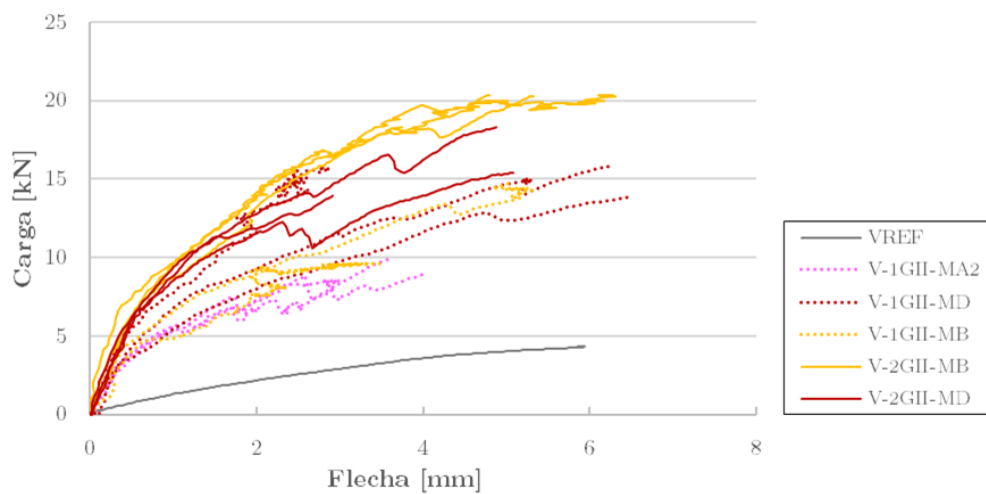


Figura 6.5. Curvas carga-flecha de las vigas reforzadas con FRCM

Las Figura 6.6, Figura 6.7 y Figura 6.8 comparan las curvas tensión-deformación de los sistemas de FRCM aplicados en las vigas con la curva idealizada de cada material obtenida mediante ensayos a tracción (Figura 5.7). La rigidez de los refuerzos es similar a la de las curvas idealizadas, antes y después de la fisuración de la matriz, aunque en las vigas solo se pueden distinguir claramente dos ramas. La deformación última del FRCM en las vigas es superior a la obtenida con los ensayos de tracción, por tanto, la resistencia última alcanzada es también superior. Las mayores deformaciones alcanzadas en los ensayos de las vigas pueden deberse a la colaboración entre el soporte y la primera capa de la matriz, o a la mayor longitud de las fibras aplicadas en las vigas comparadas con las probetas del ensayo a tracción. La explotación de las fibras es menor cuando se aplican dos capas de refuerzo, debido en parte a la rigidez ligeramente inferior, pero principalmente debido a la menor deformación última alcanzada.

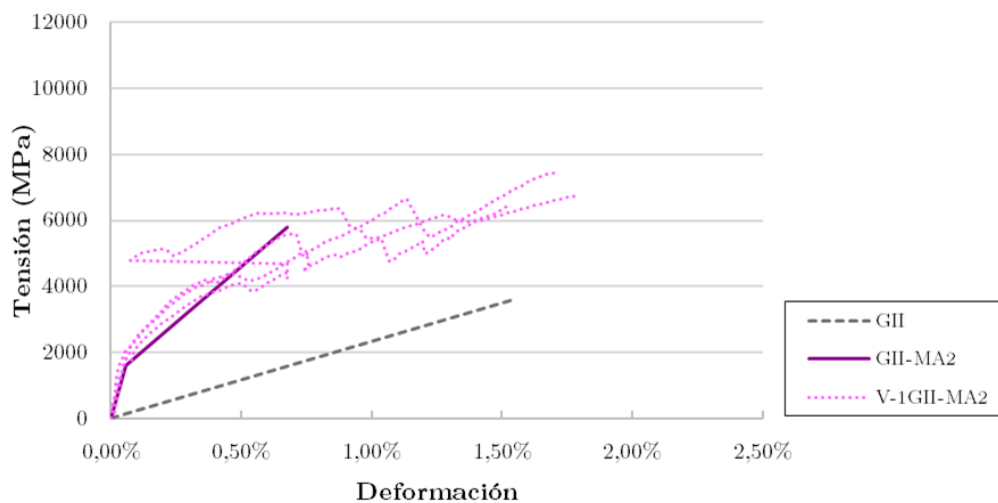


Figura 6.6. Tensión-deformación del FRCM GII-MA2

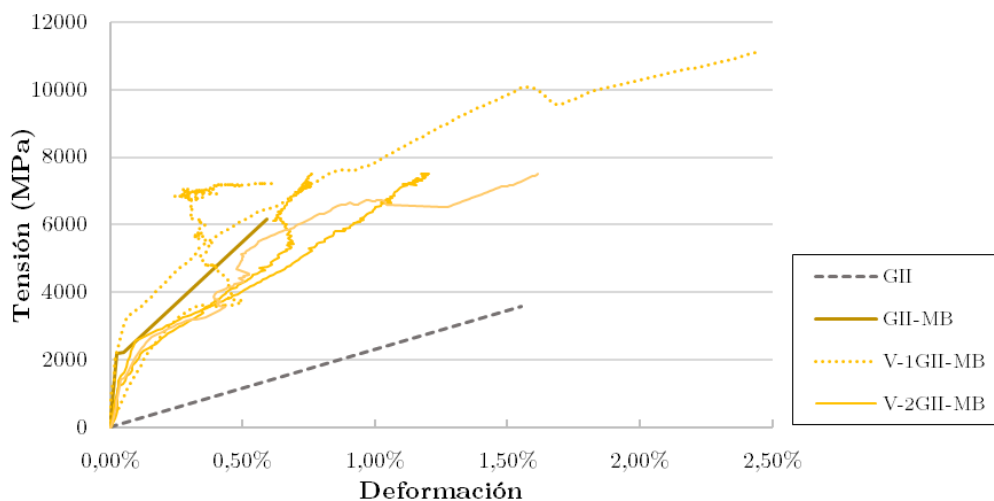


Figura 6.7. Tensión-deformación del FRCM GII-MB

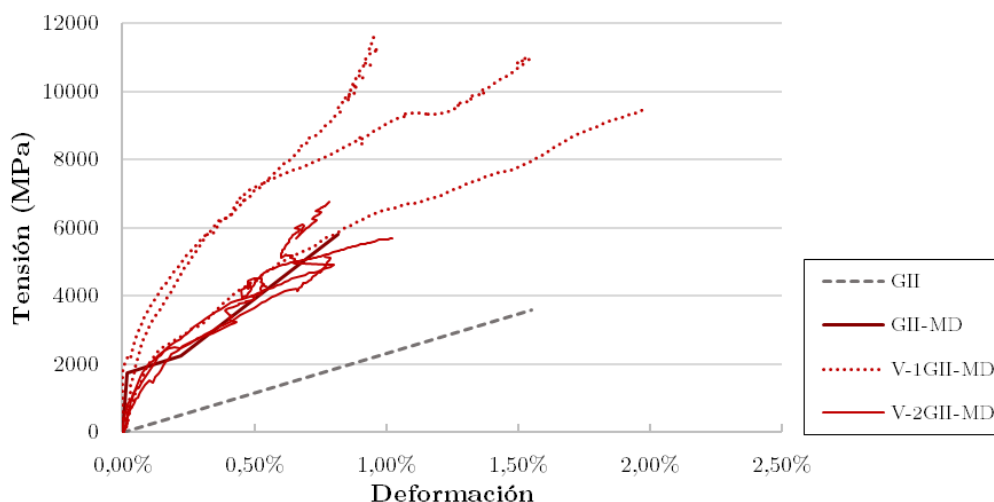


Figura 6.8. Tensión-deformación del FRCM GII-MD

La Figura 6.9 muestra la tensión de adherencia en la interfaz FRCM-hormigón. La tensión aumenta con la carga, y también, con el despegue progresivo. La tensión de adherencia es un parámetro clave que afecta a los sistemas de refuerzo de materiales compuestos; por lo tanto, ha sido estudiado por varios autores [133–135]. La tensión media de adherencia se ha calculado en varios estados de carga para comparar el comportamiento de los diferentes sistemas de FRCM. Se calcula asumiendo que la tensión es constante a lo largo de toda la longitud del composite adherida, una simplificación comúnmente aplicada cuando se calcula la tensión de adherencia de los FRP [136–138]. La fuerza a la cual se somete el composite se calcula mediante el procedimiento explicado para calcular la tensión en el FRCM. El área adherida se conoce estudiando el progreso de la fisura en la

interfaz mediante el DIC. En los primeros estados de carga, el área adherida es la superficie total de contacto entre el soporte y el composite, que va disminuyendo con la aplicación de la carga y el progreso de la fisuración. Los puntos cercanos a la carga última muestran un aumento en la pendiente de la curva tensión-deformación, que no corresponde con el aumento de la carga. Esto puede estar relacionado con la *longitud efectiva*, que ha sido profundamente estudiada en el FRP [139,140], pero que ha recibido limitada atención en las matrices cementosas y actualmente no está incluida en las guías de diseño del FRCM. Los modelos existentes que emplean el concepto de longitud efectiva para el FRCM se basan generalmente en modelos previos desarrollados para el FRP, como en [141]. Ensayos previos de sistemas de FRCM de PBO sometidos a ensayos de cortante [17] revelan que la longitud efectiva es de entre 150 mm y 200 mm, similar a la del FRP para los especímenes reforzados con una o dos capas. Estos valores son acordes a lo obtenido en esta investigación, según se recoge en la Figura 6.9.

Las vigas V-1GII-MA2 tienen un incremento repentino de la tensión de adherencia entre los 10 y los 15 kN, mientras que aumenta gradualmente cuando se utilizan las matrices MD y MD. Dos capas de GII-MB exhiben mejores resultados en términos de tensión de adherencia tras el inicio del despegue, soportando mayores tensiones.

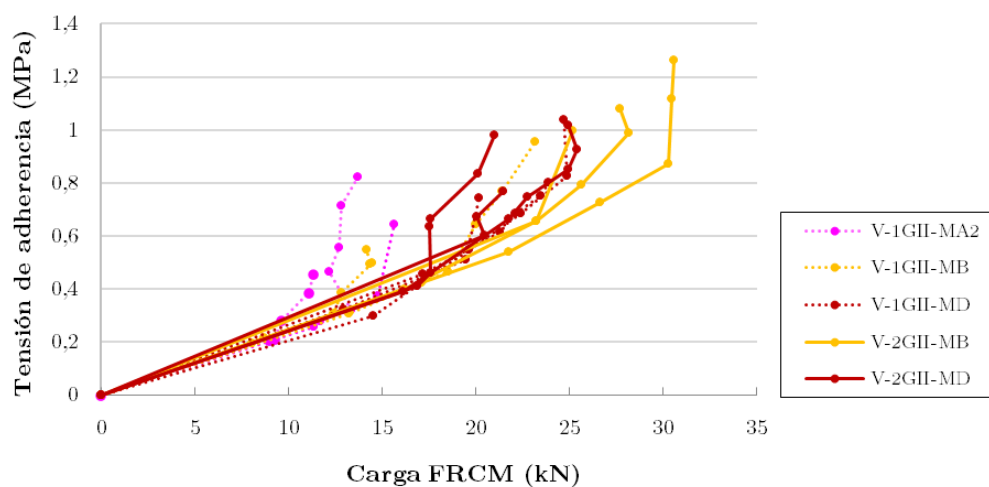


Figura 6.9. Tensión de adherencia del FRCM respecto a la carga del FRCM

La influencia de la matriz y el número de capas se puede analizar estudiando la Figura 6.10. Los mejores resultados en términos de tensión última en el FRCM se alcanzan una capa de GII-MD, seguido de una capa de GII-MB. Los refuerzos de una capa alcanzan mayores tensiones para todos los morteros estudiados, pero en todos los casos la resistencia última de los composites aplicados a vigas es mayor que la obtenida mediante ensayos a tracción.

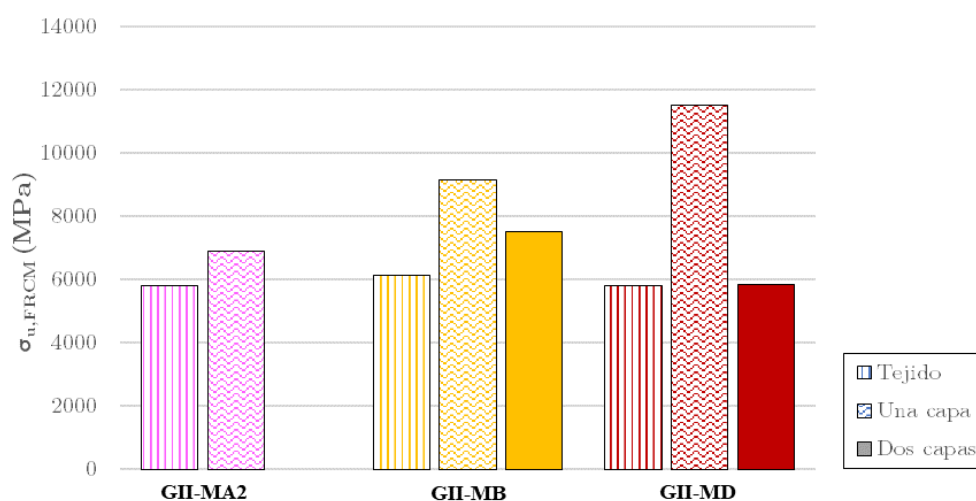


Figura 6.10. Resistencia última de cada sistema de FRCM

6.4 Comparación de la influencia del ancho de la viga en el comportamiento global

Con los resultados obtenidos en los ensayos de flexión de vigas de 12 cm de ancho, en los que se refleja la influencia del mortero y del número de capas de refuerzo en el comportamiento global de la viga, se ha decidido ensayar dos vigas de mayor ancho para comparar la influencia del soporte. El objetivo de estos ensayos es comprobar si los resultados obtenidos para las vigas ensayadas en la campaña de sistemas FRCM son extrapolables para otros anchos de refuerzo.

Se han reforzado dos vigas de 36 cm de ancho con 2 capas de GII-MB, ya que son la tipología de vigas que ha alcanzado mayor carga última en las vigas de 12 cm de ancho. En este caso, el composite no se ha aplicado en todo el ancho de viga sino solo en los 24 cm centrales, dejando 6 cm libres a cada lado del refuerzo (Figura 6.11).

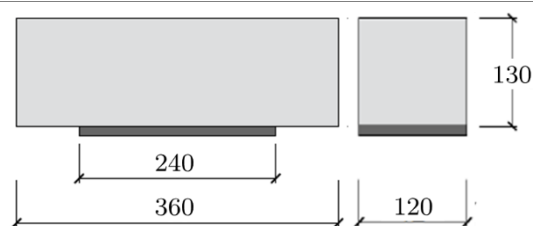


Figura 6.11. Geometría de las vigas ensayadas y posición del refuerzo.

Los ensayos de las vigas de triple ancho (3V) se han llevado a cabo con la misma configuración que el resto de las vigas, detallada en el apartado 6.2.2, y los materiales empleados para su fabricación se describen en el apartado 6.2.1. Por la limitación en las dimensiones y carga última, estos ensayos tuvieron que realizarse en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la UPM. La máquina de ensayos empleada es un modelo de *Microtest* de 30 tN de capacidad, con posibilidad de ensayo a flexión a 3 puntos o a 4 puntos con una luz máxima de 1,2 m.

La Figura 6.12 muestra las curvas carga-flecha obtenidas para todas las vigas reforzadas con 2GII-MB. Se aprecia cómo las vigas de 36 cm de ancho soportan una carga última de 38 kN, aproximadamente el doble que las vigas de 12 cm, estando este valor directamente relacionado con la cantidad de composite aplicado en las vigas de forma superficial (doble). La flecha de la viga de triple ancho es menor para la misma carga que la viga de 12 cm a partir de los 10 kN de carga, llegando a ser aproximadamente la mitad en la carga próxima a la rotura de la viga de menor ancho, debido principalmente a la mayor inercia del soporte. La flecha final alcanzada en las vigas 3V es un 40% superior, ya que el soporte alcanza una mayor deformación, debido a la mayor carga a tracción soportada en el composite.

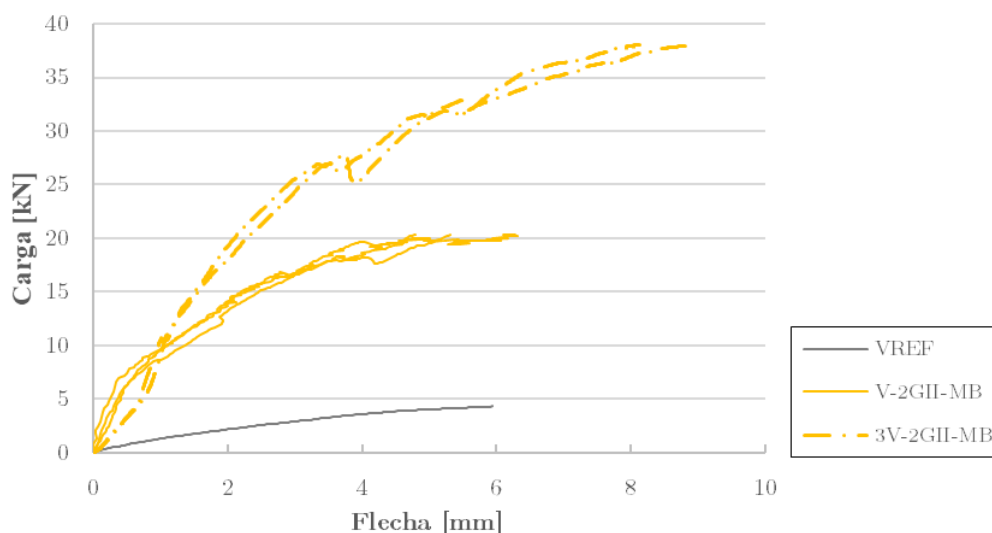


Figura 6.12. Curvas carga-flecha obtenidas experimentalmente para las vigas reforzadas con 2GII-MB

Los modos de fallo observados en las vigas de triple ancho corresponden con el modo de fallo más común en el resto de vigas ensayadas. En ambos casos, el fallo se debía a un despegue en la interfaz matriz-tejido en la capa más próxima al soporte. La Figura 6.13 muestra el comienzo del despegue en la zona central de la viga y su progresión hasta el apoyo externo.

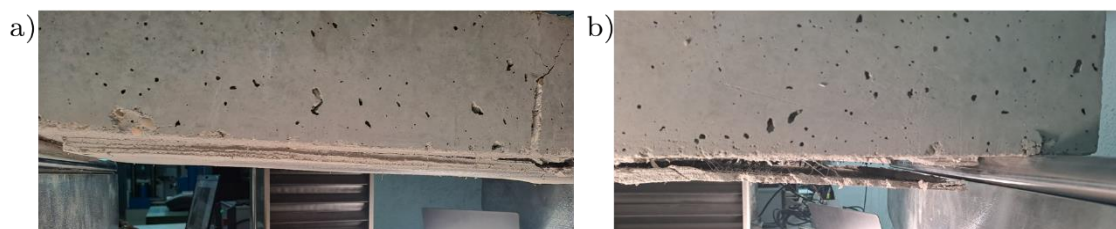


Figura 6.13. Modo de fallo de las vigas 3V, a) inicio de despegue en la entalla; b) despegue completo

Se puede observar que tanto como las curvas carga-flecha, como el modo de fallo, de las vigas de 36 cm se obtiene el comportamiento esperable. La carga obtenida es directamente proporcional al FRCM aplicado a la viga, y el modo de fallo coincide con el obtenido mayoritariamente.

Capítulo 7. Simulación del comportamiento a flexión de vigas de hormigón reforzadas con FRCM mediante un macro-modelado de elementos finitos

7.1 Introducción

Dada la complejidad del comportamiento de los FRCM, varios autores han llevado a cabo investigaciones basadas en simulaciones numéricas con elementos finitos. La modelación numérica de los FRCM sometidos a tracción se puede usar para comprender mejor el comportamiento mecánico obtenido experimentalmente [5,142–144].

Entre los trabajos de modelización numérica de FRCM cabe destacar algunos planteamientos que se reseñan a continuación. Bertolesi et al [5] usaron un modelo en el que el tejido se modelaba como un elemento tipo barra y la matriz con elementos de deformación plana elasto-frágiles o elasto-dúctiles. En estos estudios se modelaron las imperfecciones para simular la dispersión de los resultados experimentales tales como la desviación del cordón del tejido, la deformación inicial de la probeta y la fisuración inicial en diferentes posiciones. Urso et al [142] emplearon un modelo de elementos finitos que permite la iniciación y propagación de fisuras entre los elementos sin grados de libertad adicionales. El modelo está formado por dos capas de mortero definidas como capas continuas, con el tejido como capa continua, un elemento cohesivo de enlace para conectar las dos capas de mortero y elementos cohesivos de espesor cero para conectar el tejido a la

matriz. Monaco et al [143] y Monaco et al [144] usaron técnicas de micro-modelado con diferentes niveles de detalle para las simulaciones y lo compararon con los resultados experimentales, ambos modelos tenían la malla definida como un elemento continuo tipo *shell*, con una adherencia perfecta o una interfaz matriz-fibras cohesiva.

La unión entre materiales compuestos FRCM y el soporte también se ha estudiado mediante simulaciones numéricas [145–147]. La mayoría de ellas se basan en ensayos de cortante simple en soportes de fábrica con diversos modelos de la interfaz (por ejemplo, elementos de muelle no lineales [145]) y calibración de las curvas adherencia-deslizamiento frente a resultados experimentales [147]. Los muros de fábrica reforzados con FRCM se han estudiado con un enfoque de micro-modelado simplificado o de escala meso [148,149] y de macro-modelado [150,151]. Generalmente, se simula el comportamiento de muros con cargas en el plano [148–151], aunque simultáneamente se pueden estudiar las cargas fuera del plano [150,151]. También, se han analizado con éxito estructuras curvas de mampostería reforzadas con FRCM [152].

Por su parte, las simulaciones realizadas de vigas de hormigón reforzadas con FRCM pueden tener diferentes propósitos como: estudiar la interfaz entre el soporte y la matriz del FRCM [153,154], analizar la influencia del refuerzo [111] o estimar el comportamiento global [155]. Elsanadedy et al [155] simularon en 3D vigas de hormigón armado ensayadas a flexión de 4 puntos considerando el tejido como *shell* y calibrando el comportamiento de la interfaz viga-FRCM según los resultados de los ensayos del *pull-out*. Aljazaeri y Al-Jaberi [154] modelaron vigas de hormigón armado con el FRCM como laminado con las propiedades obtenidas de los ensayos a tracción, usando diferentes interfaces entre el hormigón y el composite. Mercedes et al [156] utilizaron elementos tipo barra para la armadura y el tejido embebidos en elementos sólidos para el hormigón y la matriz de mortero. Feng et al [157] emplearon un modelo en 3D para estudiar paramétricamente el efecto del tamaño de la viga reforzada con FRCM y el grado de corrosión de la armadura. Khattak et al [111] realizaron una

simulación en 3D de una viga de hormigón armado ensayada a 5 puntos con refuerzo FRCM en los momentos negativos y positivos, en dos o cuatro capas de tejido de carbono o PBO, asumiendo una adherencia perfecta y una ley de adherencia-deslizamiento predefinida en la interfaz matriz-tejido.

En este caso, las vigas de hormigón armado reforzadas con FRCM se simularon mediante técnicas de macro-modelización. Se simuló el comportamiento de las vigas reforzadas con GII-MA2 y GII-MB, debido a que estos fueron los comportamientos más extremos en los resultados de los ensayos a flexión. El comportamiento de los composites se simuló utilizando los datos obtenidos del ensayo a tracción (Capítulo 5) y los resultados se compararon con los obtenidos en los ensayos a flexión (Capítulo 6).

7.2 Resultados experimentales

Las vigas simuladas experimentalmente están reforzadas con dos tipos de FRCM, GII-MA2 y GII-MB. Los morteros de las matrices y la malla que forman los sistemas se explican detalladamente en el Capítulo 4.

Las vigas de hormigón armado utilizadas como soporte se describen en el apartado 6.2. El hormigón tiene una resistencia a compresión media de 31,7 MPa obtenida según las indicaciones de la UNE-EN 12390:2020 [43]. La armadura de acero normalizado está formada por barras corrugadas de 8 mm de diámetro, con una resistencia a tracción de 545 MPa y un módulo de elasticidad de 210 GPa.

Las curvas tensión-deformación de los ensayos a tracción se muestran en las Figura 7.1 y Figura 7.2. Las curvas idealizadas se calculan siguiendo las recomendaciones de la guía CNR-DT 215/2018 [24], aunque se calculan con el área de la matriz en lugar del tejido para poder aplicar los datos en la simulación y se muestran junto a las curvas experimentales.

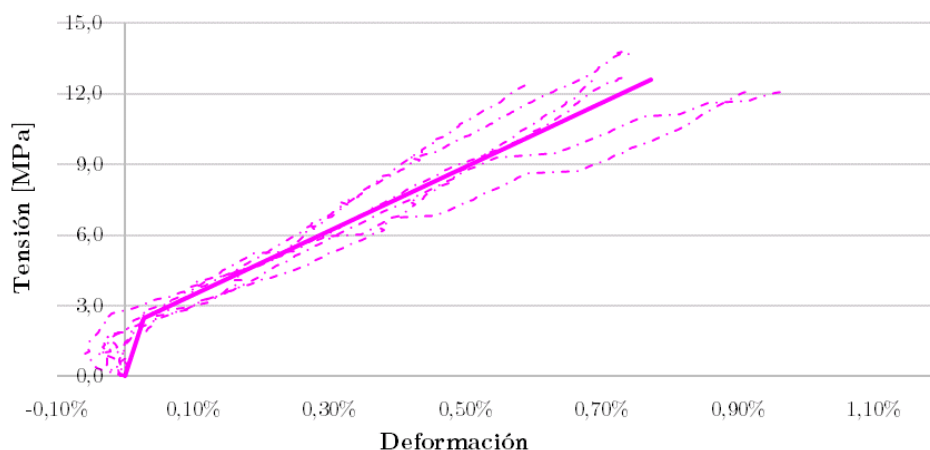


Figura 7.1. Curvas tensión-deformación experimentales e idealizada de los sistemas de GII-MA2

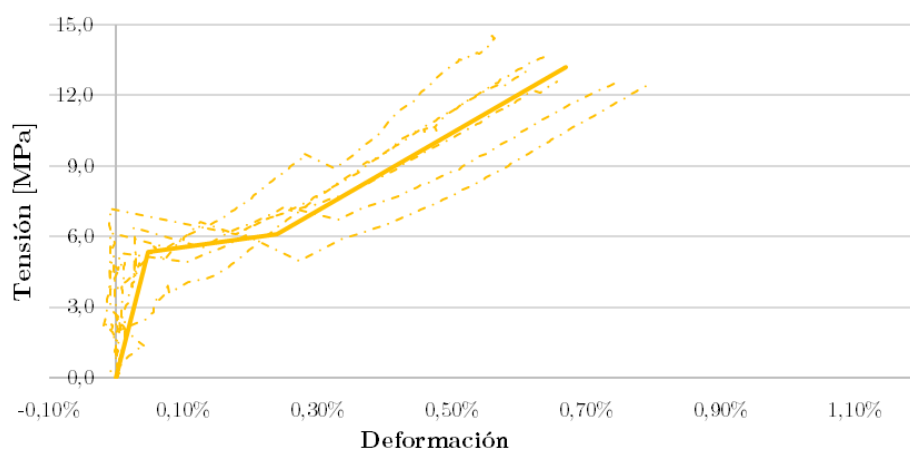


Figura 7.2. Curvas tensión-deformación experimentales e idealizada de los sistemas de GII-MB

La resistencia (σ_{FRCM}), deformación (ϵ_{FRCM}) y módulo de elasticidad (E_{FRCM}) de cada estado para los sistemas GII-MA2 y GII-MB se recogen en la Tabla 7.1. Los valores se calculan con la sección del composite (matriz y tejido).

Tabla 7.1. Resultados obtenidos de los ensayos a tracción de las probetas de FRCM.

SISTEMA	ESTADO	σ (MPa)	ϵ	E (GPa)
GII-MA2	A	2.47	0.03%	8724
	B	12.62	0.77%	1363
	C, último			
GII-MB	A	5.35	0.05%	11321
	B	6.10	0.24%	389
	C, último	13.20	0.67%	1650

Los resultados de los ensayos a flexión se detallan en el Capítulo 6. La Figura 7.3 muestra las curvas carga-flecha obtenidas experimentalmente para

los tipos de vigas simuladas numéricamente, donde se puede apreciar la diferencia entre familias.

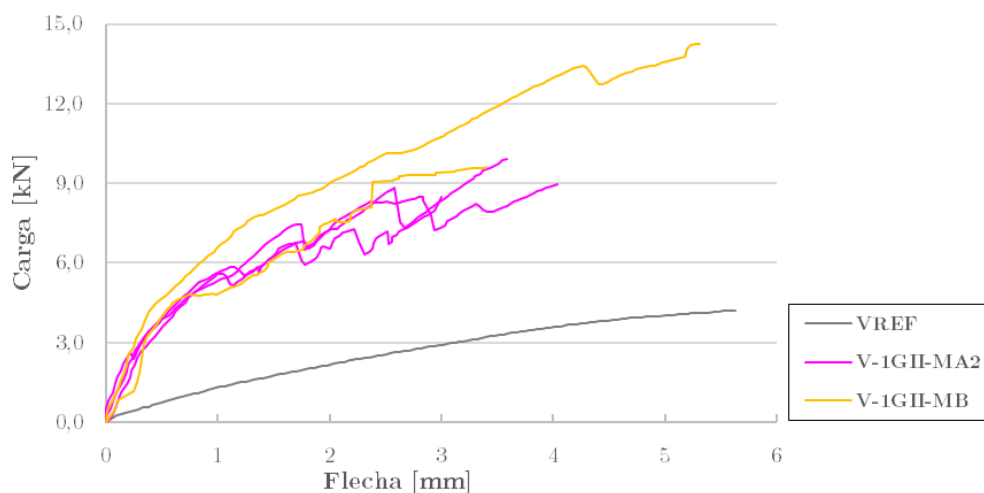


Figura 7.3. Curvas carga-flecha de las vigas reforzadas con FRCM

7.3 Modelización mediante elementos finitos de vigas reforzadas con FRCM

Se emplea un modelo bidimensional para simular el comportamiento no lineal de vigas de hormigón, utilizando un enfoque de modelo macro (*macro-modelling*). La geometría del modelo es lo más parecida posible a los ensayos y resultados experimentales descritos previamente. Se utiliza la versión 10.7 del *software DIANA FEA*, ya que proporciona elementos específicos y modelos constitutivos para el hormigón, la armadura y los sistemas FRCM [158].

Se desarrollan cuatro tipos de modelos: i) viga de hormigón en masa con una entalla para estudiar el comportamiento del hormigón; ii) viga de hormigón armado con una entalla para compararla con los resultados experimentales de la viga de control (VREF) y poder garantizar que el posible mal ajuste de la simulación de las vigas reforzadas con FRCM no se debe a la simulación del soporte; y iii) dos vigas de hormigón armado con una entalla reforzadas con dos composites diferentes para poder comparar con los resultados experimentales. Los cuatro modelos utilizan los mismos

modelos constitutivos para el hormigón, siendo la diferencia los elementos añadidos como refuerzo.

Los siguientes apartados describen las características del modelo en términos de tipo y tamaño de los elementos, condiciones de contorno (apoyos), esquema de carga y modelo constitutivo para los materiales detallando la respuesta no lineal del acero, hormigón y los sistemas FRCM.

TIPOS Y TAMAÑO DE LOS ELEMENTOS (*ELEMENT TYPE AND SIZE*)

La malla adoptada se detalla en la Figura 7.4. Se utilizan tres tamaños de elementos: 15 mm para la escala macro de la viga, 4 mm para el FRCM y 3 mm para el refinamiento de la malla en la zona superior a la entalla. Se emplea principalmente un elemento de tensión plano isoparamétrico cuadrilátero de ocho nodos (CQ16M), junto con un elemento de tensión plano isoparamétrico triangular de seis nodos (CT12M) para la transición entre elementos de diferentes tamaños. En la interfaz matriz-soporte, se emplea un elemento de interfaz entre dos líneas en una configuración bidimensional.

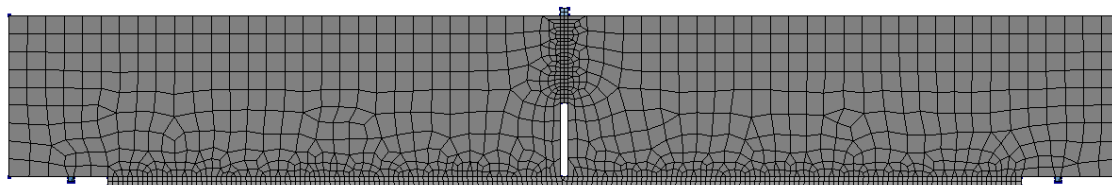


Figura 7.4. Malla detallada

La interacción entre el hormigón y el FRCM se define como lineal elástica con un módulo de rigidez normal y de rigidez cortante de 1000 MPa/mm, siguiendo las recomendaciones para una unión perfecta rígida [159,160]. No obstante, se realizó un análisis de la sensibilidad para estos valores, sin encontrar ningún efecto significativo en los resultados.

CONDICIONES DE CONTORNO (*BOUNDARY CONDITIONS*)

Se simulan los ensayos a flexión de tres puntos, utilizando bloques de acero para transferir la carga y soportar la viga. Estos bloques están unidos a la viga mediante una interfaz elástica que impide el desplazamiento normal

y permite los movimientos a cortante. La interfaz tiene una rigidez normal de 1000 MPa/mm y una rigidez a cortante de 10 MPa/mm.

Los dos bloques se colocan en la parte inferior de la viga para impedir el desplazamiento vertical; el bloque derecho impide además el desplazamiento horizontal. En la parte superior de la viga, en la región sobre la entalla, se coloca un tercer bloque para transferir la carga. En este caso, la carga se aplica mediante un desplazamiento vertical impuesto.

ESQUEMA DE CARGA (*LOADING SCHEME*)

La carga se aplica como un desplazamiento vertical del eje superior completo del bloque de acero. La carga se aplica en escalones diferentes: 5 pasos de 0,01 mm hasta 0,05 mm, 200 pasos de 0,001 mm hasta 0,25 mm, 250 pasos de 0,005 mm hasta 4,5 mm y 10 pasos hasta 5,5 mm. El tamaño de los pasos se adapta para conseguir la convergencia de la simulación.

El método de iteración de equilibrio elegido es *Newton-Raphson*, que establece la rigidez inicial antes de cada iteración, con 30 iteraciones como máximo. Los criterios de convergencia para el proceso de iteración de equilibrio se definieron limitando la energía interna a 0,001.

MODELOS CONSTITUTIVOS DE LOS MATERIALES

En la simulación numérica se consideran tres modelos constitutivos para reproducir el comportamiento no lineal de la armadura de acero, el hormigón y los sistemas de FRCM.

El acero se idealiza mediante un comportamiento elastoplástico con un módulo de Young de 210 GPa y un límite elástico de 545 MPa, como se indica en el apartado 6.2.1.

El hormigón descrito en el apartado 6.2.1 alcanza una resistencia a compresión de 31,7 MPa y una densidad de 2445 kg/m³. El resto de valores requeridos para la simulación se obtuvieron de acuerdo a la *fib Model Code for Concrete Structures 2010* [161]. La resistencia a tracción obtenida fue

2,1 MPa, la energía de fractura 136 N/m, y el módulo de elasticidad fue 23 410 MPa. El modelo constitutivo usado en la simulación es *total strain-based crack model con rotating crack approach*. En tensión, se emplea la curva de tensión del del *fib Model Code for Concrete Structures 2010* [161]. Además, se eligió una curva de compresión ideal para simular el comportamiento a compresión.

Los sistemas FRCM se modelan también con *total strain-based crack model con rotating crack approach*. El comportamiento elástico corresponde a la primera rama de la curva idealizada obtenida mediante ensayos a tracción, con un módulo de Young de 8724 MPa para GII-MA2 y 11 321 MPa para GII-MB. El comportamiento a compresión se asume elástico, aunque su influencia es limitada, ya que el material compuesto solo trabaja bajo esfuerzos de tracción. El comportamiento a tracción se define mediante una curva multilineal definida por los puntos de transición obtenidos en los ensayos a tracción (Tabla 7.1).

7.4 Simulación de la respuesta de las vigas reforzadas con FRCM

Los resultados de los modelos de las cuatro simulaciones se analizan individualmente. El comportamiento de cada modelo se ilustra con las curvas carga-flecha, las tensiones principales de compresión y las deformaciones principales a tracción en tres momentos significativos. Las curvas obtenidas de la simulación se comparan con los resultados experimentales cuando es posible.

7.4.1 Viga de hormigón en masa

La simulación de la viga de hormigón en masa con entalla se emplea para estudiar el comportamiento del hormigón, y no corresponde a ningún ensayo experimental. La curva carga-flecha se muestra en la Figura 7.5, presentando una carga pico que desciende con el proceso de fisuración. Los círculos negros corresponden a tres momentos clave: (a) comportamiento típico elástico hasta la carga pico; (b) carga pico; (c) respuesta post-pico. La

tensión principal de compresión y la deformación principal de tracción en tres puntos se observan en las Figura 7.6 y Figura 7.7, respectivamente.

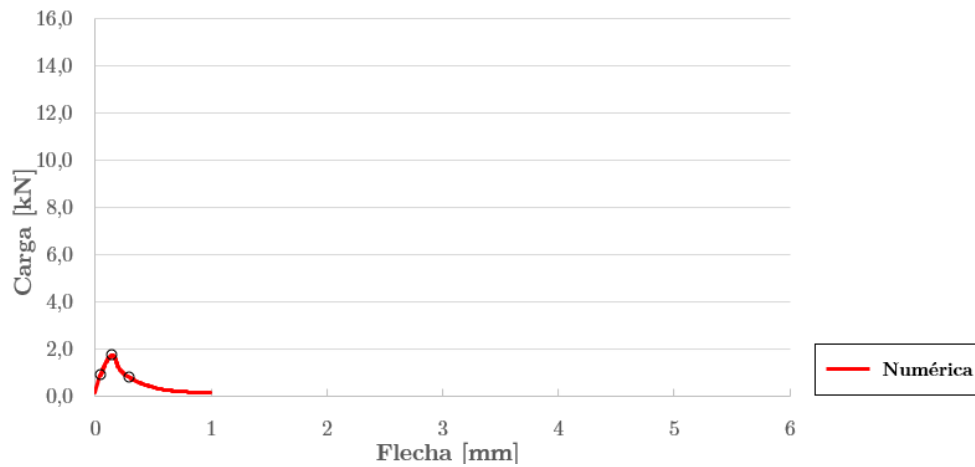


Figura 7.5. Curvas carga-flecha de las vigas de hormigón en masa con una entalla

En la Figura 7.6 se representan las tensiones principales de compresión a 0,05 mm, 0,15 mm y 0,30 mm de desplazamiento vertical impuesto. Las compresiones se localizan en la zona superior central, sobre la entalla. Los valores de la tensión a compresión aumentan con la carga, aunque el área comprimida permanece aproximadamente constante.

La Figura 7.7 muestra las deformaciones principales a tracción con las mismas condiciones de carga. Según se aumenta la deformación aplicada, la fisura en la entalla aumenta. Antes de alcanzar la carga pico, la deformación se puede observar sobre la entalla, aunque la fisuración no ha comenzado. En la carga máxima, la fisura ya ha aparecido, ya que hay puntos en la región con una deformación superior a 3,5‰. En el tercer punto, la carga ha descendido y la viga está fisurada.

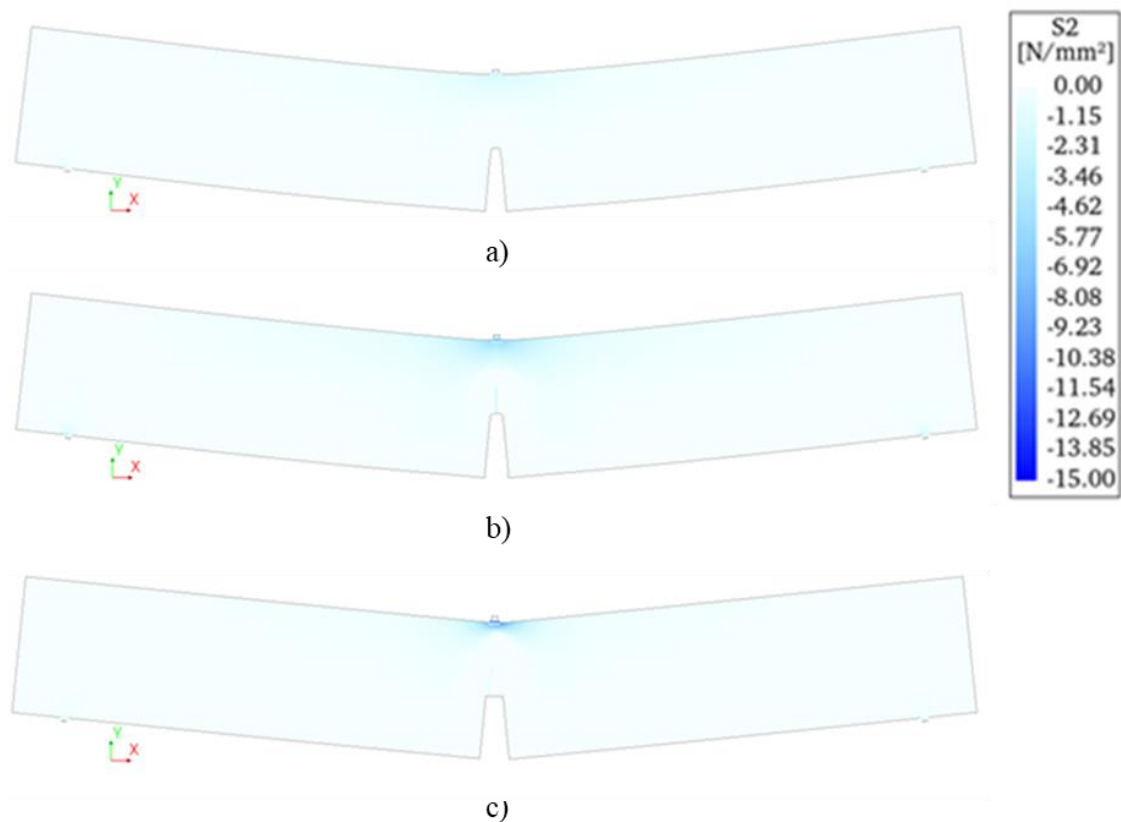


Figura 7.6. Tensiones principales de compresión de la viga de hormigón en masa con entalla.

a) Comportamiento elástico típico; b) Carga pico; c) Respuesta tras la carga pico

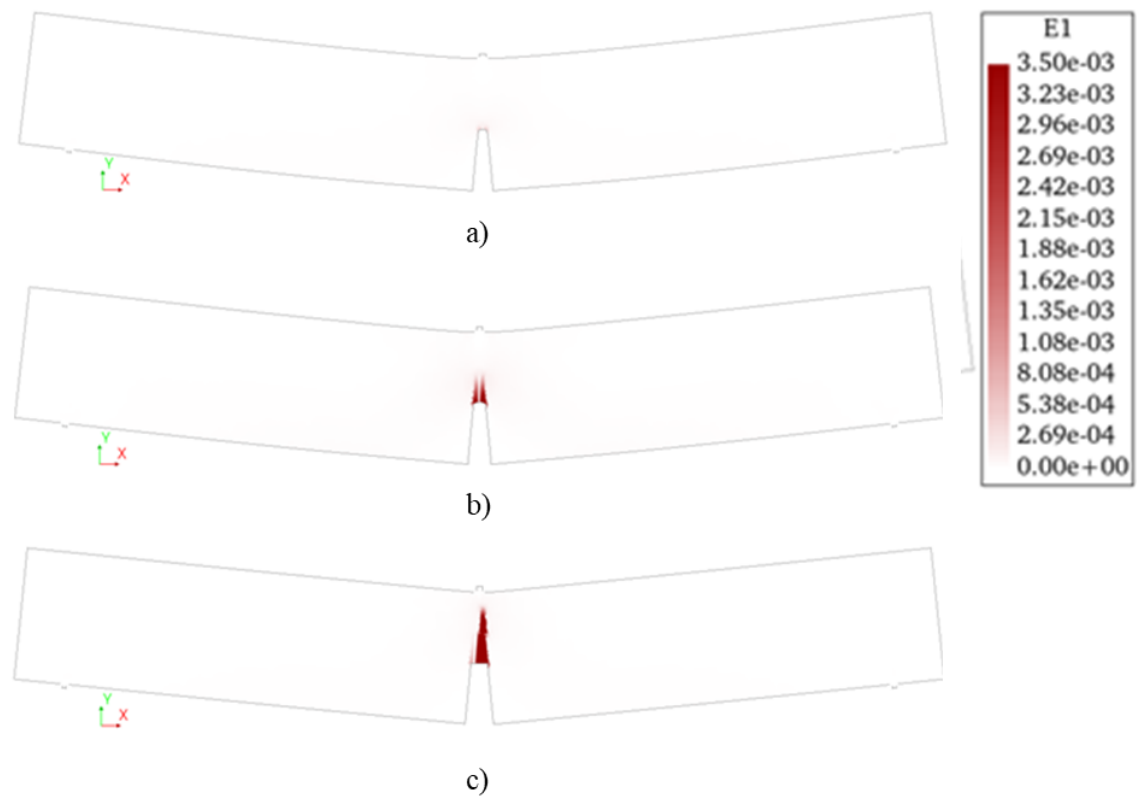


Figura 7.7. Deformaciones principales de tracción de la viga de hormigón en masa con entalla.

a) Comportamiento elástico típico; b) Carga pico; c) Respuesta tras la carga pico

7.4.2 Viga de hormigón armado

Los resultados obtenidos de la simulación numérica para la viga de hormigón armado se comparan con los resultados experimentales mediante la comparación de las curvas carga-flecha, como se puede apreciar en la Figura 7.8. El objetivo de este análisis es evaluar el comportamiento de la simulación del soporte respecto a la viga de referencia (VREF).

El comportamiento obtenido mediante simulación numérica es similar al obtenido experimentalmente. Los tres puntos clave que definen el comportamiento de la viga se han marcado en la curva, y las tensiones principales de compresión (Figura 7.9) y las deformaciones principales de tracción (Figura 7.10) se han obtenido también para esos puntos. El primer punto corresponde al final de la rama elástica, el segundo punto a la carga máxima y el tercer punto a un pronunciado comportamiento post-pico. El pico de carga obtenido numéricamente no puede identificarse en la curva experimental debido a la frecuencia de adquisición de datos durante el ensayo.

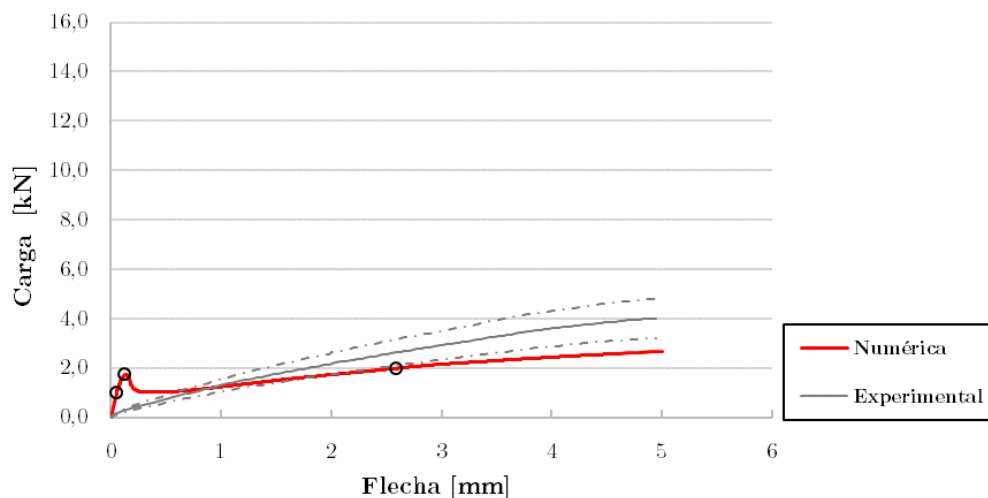


Figura 7.8. Curvas carga-flecha de las vigas de hormigón armado con una entalla

La Figura 7.9 muestra la tensión principal de compresión a 0,05 mm, 0,13 mm y 2,6 mm de desplazamiento vertical impuesto. El área sometida a compresión está localizada en la zona central superior de la viga. En el primer estado de carga, es casi imposible de identificar la zona comprimida debido a su bajo valor. El área comprimida comienza a apreciarse en el segundo

estado. En el último estado de carga, el área comprimida ha amentado su tamaño, aunque es más estrecho verticalmente, y su valor es mayor.

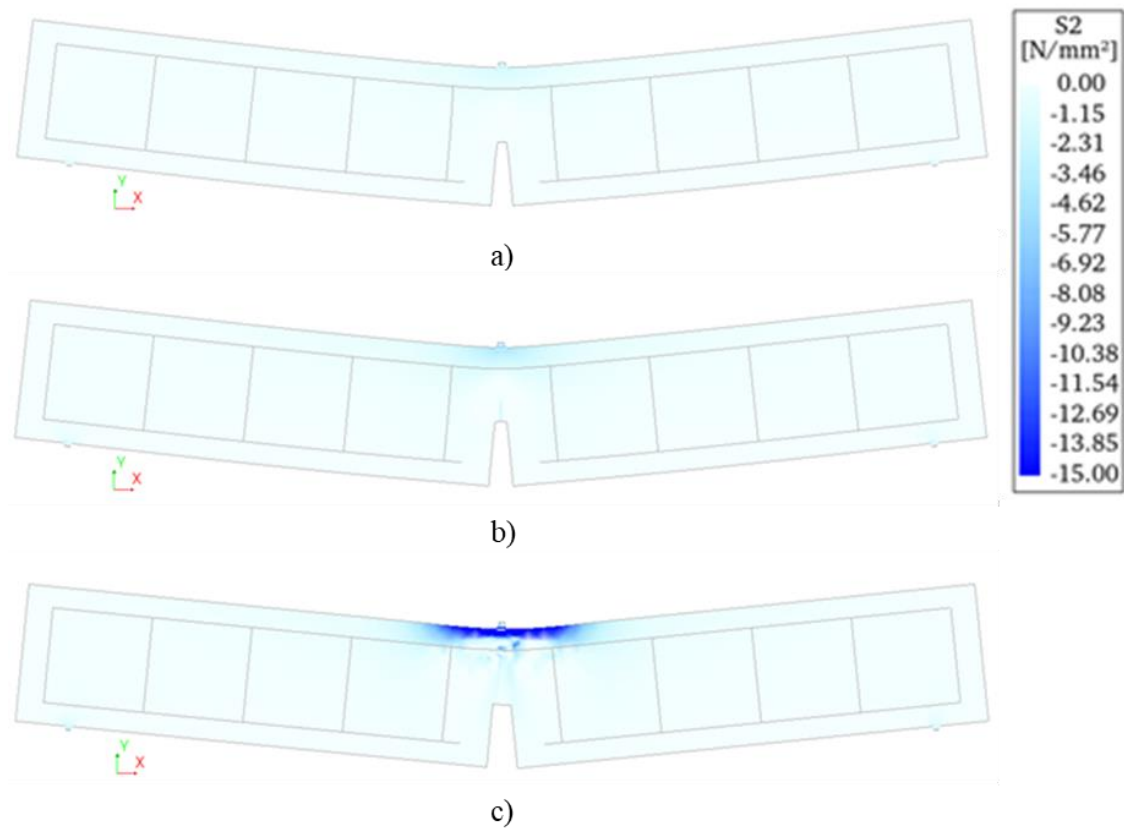


Figura 7.9. Tensiones principales de compresión de la viga de hormigón armado con entalla.

a) Comportamiento elástico típico; b) Carga pico; c) Respuesta tras la carga pico

La Figura 7.10 muestra las deformaciones principales a tracción para los mismos desplazamientos impuestos que los usados para las tensiones principales de compresión. Las deformaciones, así como las tensiones, son mínimas en la fase elástica, y se concentran en el borde de la entalla. En la carga máxima, las deformaciones son mayores al 3,5‰ y las fisuras aparecen. En el tercer punto, la fisura alcanza la zona de la armadura longitudinal superior y la deformación se extiende horizontalmente a través de ella.

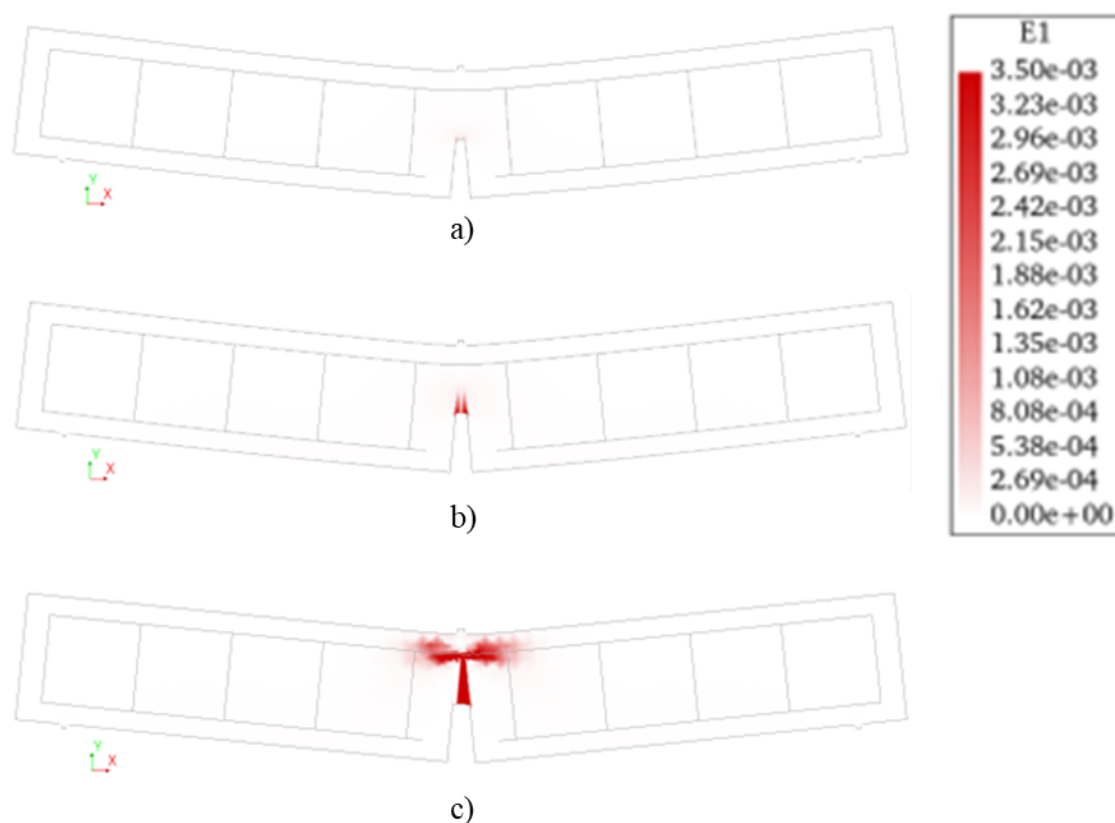


Figura 7.10. Deformaciones principales de tracción de la viga de hormigón armado con entalla.

a) Comportamiento elástico típico; b) Carga pico; c) Respuesta tras la carga pico

7.4.3 Viga de hormigón armado reforzada con el sistema de FRCM GII-MA2 (V-1GII-MA2)

Las curvas carga-flecha obtenidas experimentalmente y con el *software* DIANA para la viga de hormigón armado reforzada con el FRCM GII-MA2 se comparan en la Figura 7.11. La rigidez al inicio de la curva simulada es mayor, por lo que cuando la flecha es 1,5 mm, la carga obtenida mediante la simulación es de alrededor al 130% superior a la carga experimental. Sin embargo, para una flecha de 4 mm, la carga obtenida con ambos métodos es similar y ronda los 9 kN.

Una vez más, los tres puntos marcan momentos clave en el comportamiento de la viga. El primer punto indica el inicio de fisuración del hormigón en la entalla. El segundo punto corresponde a la fisuración del FRCM, al punto de transición A de la curva tensión-deformación obtenida en tracción. El tercer punto representa el comportamiento de la segunda rama del composite FRCM, cuando la matriz está fisurada.

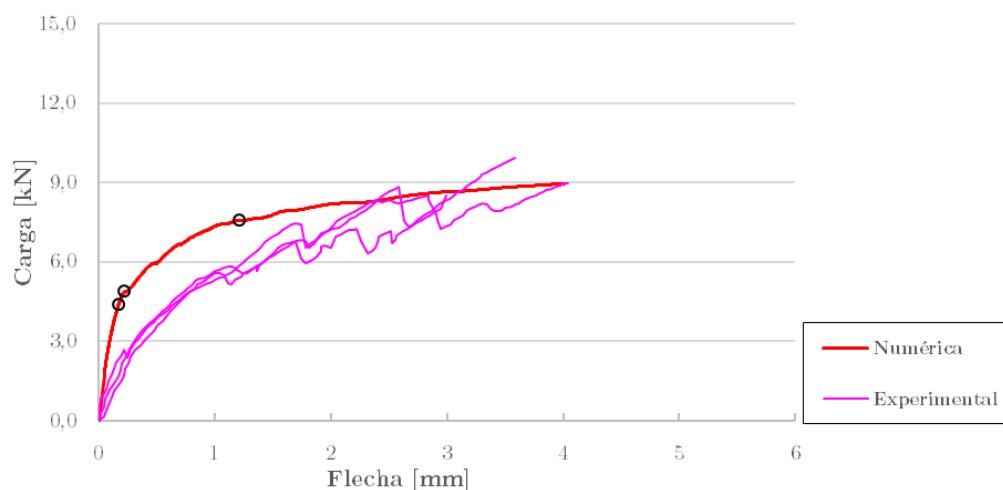


Figura 7.11. Curvas carga-flecha de las vigas de hormigón armado con una entalla reforzada con el sistema GII-MA2

Las tensiones principales de compresión para 0,18 mm, 0,23 mm y 1,21 mm de desplazamiento vertical impuesto se representan en la Figura 7.12. Las tensiones de compresión inicialmente se concentran en el área central superior de la viga, correspondientes a un diagrama en el que la línea neutra se encuentra en la zona superior del hormigón y la fuerza de tracción se concentra en el FRCM. A continuación, las tensiones aumentan tanto en valor como en área afectada, a medida que aumenta el desplazamiento impuesto. En el tercer punto, la zona superior central de la viga está sometida a compresión; en la zona del soporte cercana a la interfaz con el composite, aunque muestra pequeñas líneas a compresión, estas en realidad se deben a la aparición de fisuras.

Las deformaciones principales de tracción se muestran en la Figura 7.13. La fisuración del hormigón sobre la entalla se puede ver desde el primer punto. La fisuración del FRCM se muestra en el segundo punto con una deformación superior al 0,03%. En el tercer punto, la viga y el refuerzo están fisurados, la deformación se extiende sobre la armadura longitudinal superior y el FRCM trabaja con la segunda rama de la curva idealizada tensión-deformación del composite.

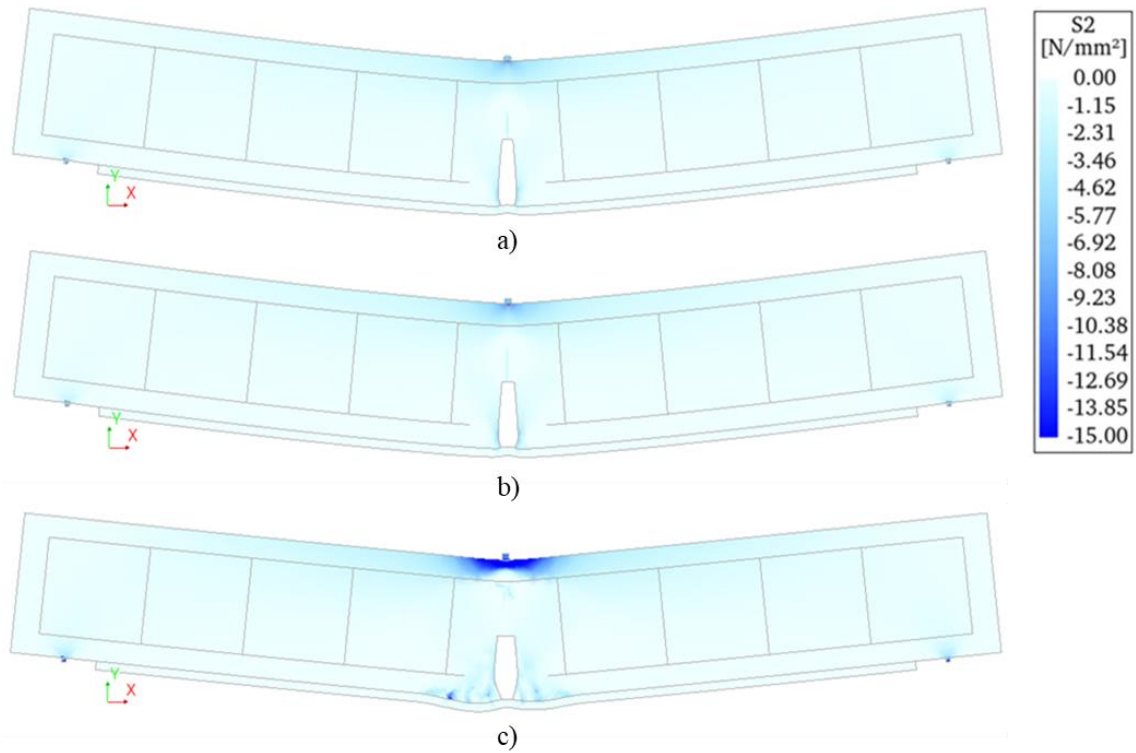


Figura 7.12. Tensiones principales de compresión de la viga de hormigón en masa con entalla reforzada con el sistema GII-MA2. a) Fisuración del hormigón; b) Fisuración del FRCM; c) Post-fisuración del FRCM

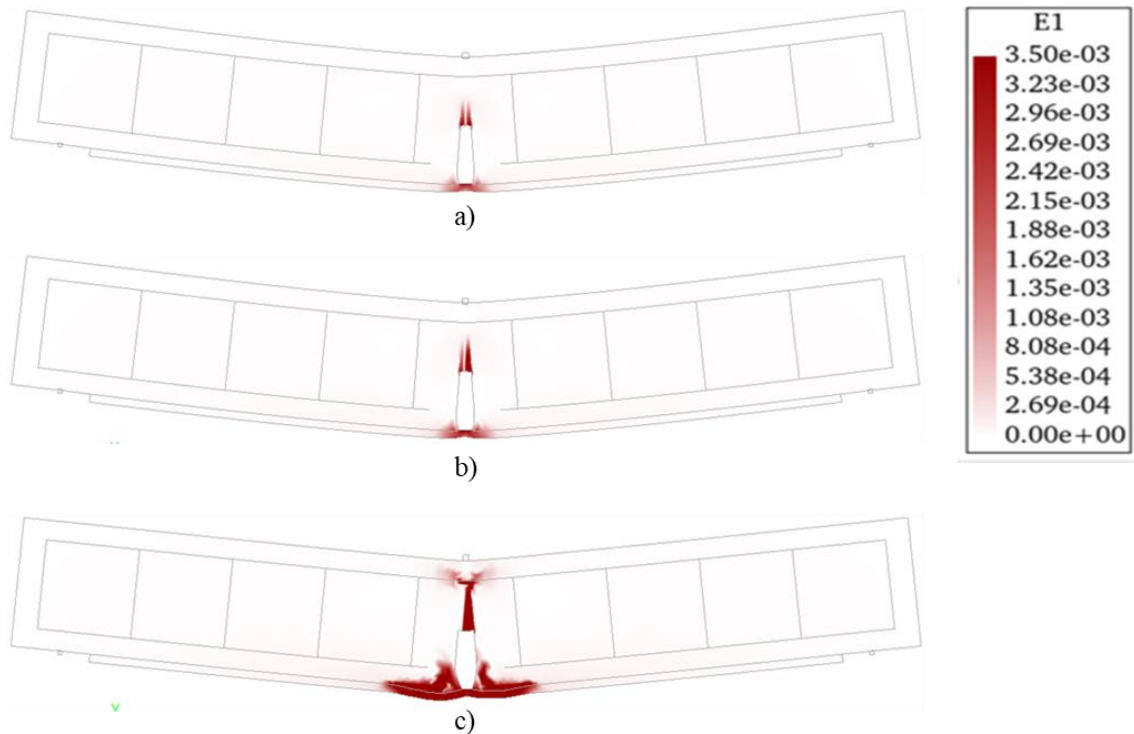


Figura 7.13. Tensiones principales de tracción de la viga de hormigón en masa con entalla reforzada con el sistema GII-MA2. a) Fisuración del hormigón; b) Fisuración del FRCM; c) Post-fisuración del FRCM

7.4.4 Viga de hormigón armado con una entalla reforzada con el sistema de FRCM GII-MB (V-1GII-MB)

Los resultados de la simulación numérica y los ensayos a flexión se comparan usando las curvas carga-flecha en la Figura 7.14. Los tres puntos marcados, como en la curva carga-flecha obtenida en la viga reforzada con el sistema GII-MA2 (Figura 7.11), indican la fisuración del hormigón, la fisuración del FRCM y un punto donde el composite trabaja dentro de la tercera rama de la curva idealizada. La curva obtenida con *DIANA* tiene mayor rigidez que las curvas experimentales hasta el primer punto y la rigidez entre las dos curvas experimentales tras el tercer punto.

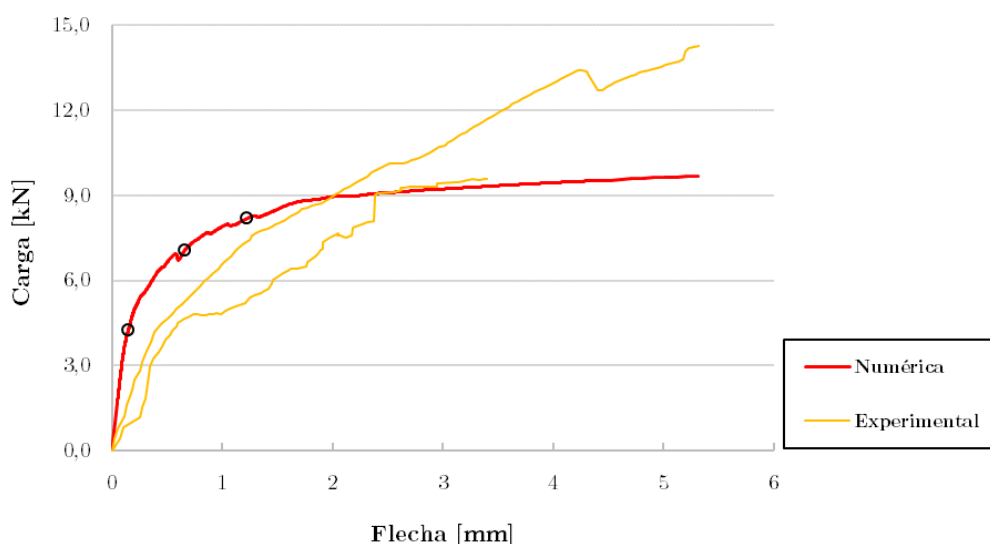


Figura 7.14. Curvas carga-flecha de las vigas de hormigón armado con una entalla reforzada con el sistema GII-MB

La tensión principal de compresión obtenida a 0,16 mm, 0,66 mm y 1,21 mm de desplazamiento impuesto se muestran en la Figura 7.15. La compresión se localiza principalmente en la viga, especialmente en la zona superior central. Aunque existen puntos en la zona central cercana a la interfaz que parecen sometidos a compresión, esto se debe a la aparición de fisuras.

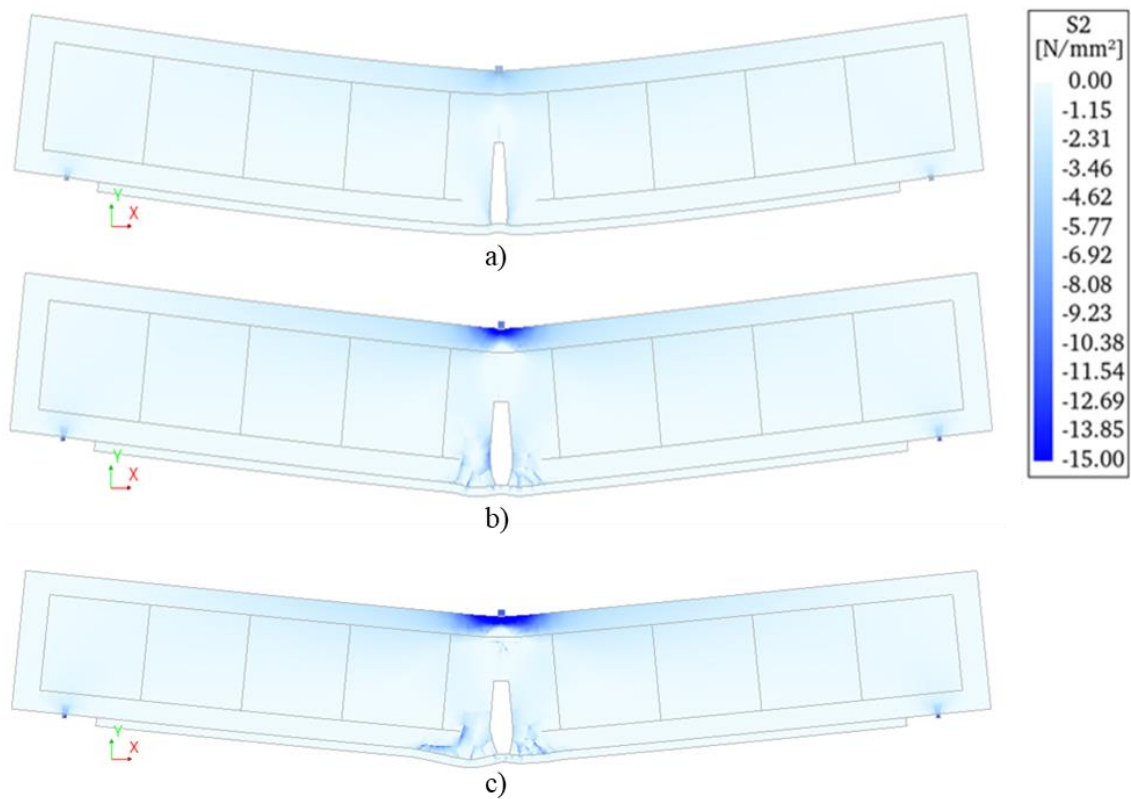


Figura 7.15. Tensiones principales de compresión de la viga de hormigón en masa con entalla reforzada con el sistema GII-MB. a) Fisuración del hormigón; b) Fisuración del FRCM; c) Post-fisuración del FRCM

La Figura 7.16 muestra las deformaciones principales de tracción en los tres puntos clave. Las deformaciones alcanzadas para conseguir la fisuración en la viga y el composite son mayores que en la viga V-1GII-MA2 (Figura 7.13). En el tercer punto, las áreas sometidas a tracción aumentan en la viga y de forma más significativa en el composite y la interfaz entre ambos.

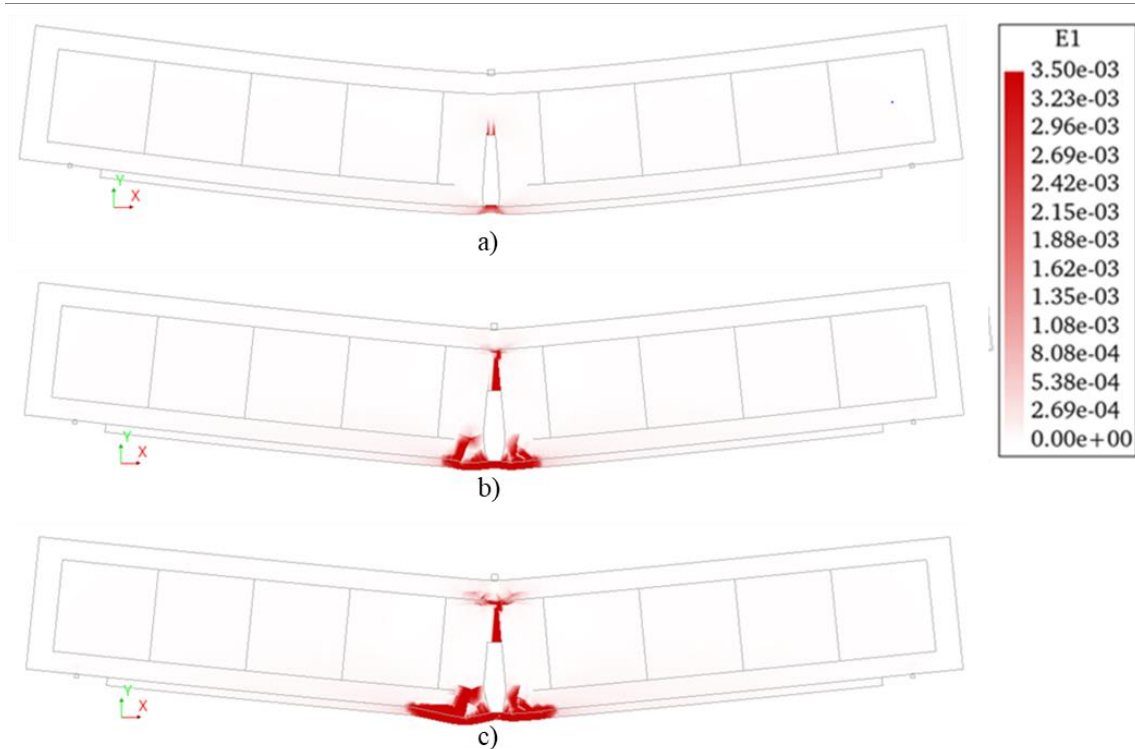


Figura 7.16. Tensiones principales de tracción de la viga de hormigón en masa con entalla reforzada con el sistema GII-MB. a) Fisuración del hormigón; b) Fisuración del FRCM; c) Post-fisuración del FRCM

7.5 Limitaciones del modelo propuesto

El modelo propuesto se basa en utilizar un enfoque macro para obtener una estimación del comportamiento de las vigas reforzadas con FRCM. Los objetivos alcanzados por el modelo son conocer la fisuración del hormigón y del FRCM, y aproximar el comportamiento global de la viga. El modelo bidimensional parte de los resultados obtenidos experimentalmente para las propiedades de los materiales (hormigón, acero y FRCM) y supone una adherencia perfecta entre la viga y el composite, sin necesidad de estimar ningún parámetro.

Por la propia concepción del modelo, es imposible estudiar el comportamiento de las interfaces y, por tanto, el modo de fallo. La interfaz viga-composite se define en el modelo como adherencia perfecta, con lo cual, no se puede producir el despegue que sí puede ocurrir ocasionalmente en la realidad. El despegue en la interfaz fibras-matriz dentro del FRCM es el modo de fallo más común. En el modelo, se supone el composite como un material único con propiedades homogéneas. Esto conlleva a que, aunque el

comportamiento de las vigas general sí se asemeja con la realidad, no así el del composite. Para comprobar el estado del FRCM, es necesario comparar las tensiones y deformaciones de la zona analizada con la curva idealizada tensión-deformación obtenida de los ensayos a tracción uniaxial del composite.

Capítulo 8. Conclusiones y futuras líneas de investigación

8.1 Introducción

En este capítulo se exponen las conclusiones más relevantes extraídas de los resultados obtenidos en las campañas experimentales y el modelo numérico. Las conclusiones están agrupadas según la campaña experimental, primero se exponen las conclusiones procedentes de los ensayos de durabilidad de los morteros. A continuación, se presentan las conclusiones procedentes de los ensayos a tracción uniaxial en los sistemas de FRCM. De estos resultados, se selecciona la matriz de ensayos a flexión, las conclusiones obtenidas a partir de estos ensayos son las siguientes expuestas. Por último, están recogidas las conclusiones obtenidas de la modelización numérica de las vigas reforzadas con FRCM.

Las conclusiones presentan la influencia de los materiales que forman el sistema FRCM en cada una de las fases experimentales, permitiendo comprender más profundamente el comportamiento global.

8.2 Conclusiones del estudio de la durabilidad de los morteros

Se estudian las propiedades mecánicas y la durabilidad de los morteros aplicados como matrices en sistemas de FRCM. De tal forma que se evalúe la doble función del composite, proteger el soporte de hormigón y ser un refuerzo estructural. De los ensayos se han podido extraer las siguientes conclusiones:

1. Los morteros de reparación estudiados exhiben mejores comportamientos contra la penetración de cloruros que los morteros de albañilería, con un notable incremento a profundidades mayores a 5 mm. Esto es relevante para proteger los soportes de hormigón, ya que las profundidades nominales para sistemas de reparación y refuerzo suelen ser mayores de 4 mm. Se obtuvieron resultados generales similares en cuanto a la resistencia a la carbonatación.
2. Con respecto a los modelos de predicción de la vida útil, el empleado para la penetración de cloruros es mucho más preciso que el de la carbonatación con morteros especializados (con fibras, polímeros, alto contenido en cemento,...). El método para la carbonatación no es capaz de reproducir adecuadamente el comportamiento de los morteros de reparación, presentándose discrepancias entre los resultados experimentales y la predicción.
3. La resistividad eléctrica y la permeabilidad a gas son métodos de ensayos no destructivos que permiten obtener información relevante sobre la conectividad y el refinamiento de la red porosa. En este sentido, los datos experimentales revelan una fuerte correlación entre estas propiedades y el comportamiento contra la penetración de cloruros.
4. Los dos morteros que exhiben mejores resultados en las propiedades mecánicas y durables son MB y MD. En este sentido, las principales diferencias entre los dos morteros permiten concluir el alto rendimiento en escenarios particulares. MD tiene mayor resistencia a compresión y flexión desde edades tempranas, que es especialmente conveniente para aplicaciones de reparación; sus resultados en términos de carbonatación son los mejores (1/10 de la profundidad de carbonatación del hormigón de referencia). Por su parte, MB tiene mejores resultados en términos de durabilidad contra la penetración de cloruros, con buena correlación con su baja permeabilidad a gas; con respecto a las propiedades mecánicas, los resultados a los 28 días son muy altos.

8.3 Conclusiones de los ensayos a tracción de las probetas de FRCM

Los ensayos a tracción se llevaron a cabo en sistemas de FRCM de carbono para estudiar las propiedades mecánicas y comparar la influencia de diferentes combinaciones de mortero y tejido. Se hizo hincapié en el empleo de la malla impregnada, con el fin de evaluar el potencial de mejora en términos de comportamiento de la unión fibra-matriz con dicho tejido. Se compararon una serie de morteros mejorados con dos morteros de albañilería. La técnica de adquisición de datos utilizada durante el ensayo de caracterización mecánica fue la correlación digital de imágenes (DIC). Basadas en los resultados y el debate presentados, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

1. El comportamiento de los composites FRCM depende de las propiedades del mortero y, especialmente, de la malla. El empleo de malla impregnada supone mejores resultados en términos de menor distancia media entre fisuras, resistencia última mayor y mayor módulo de elasticidad.
2. El recubrimiento de la malla durante el proceso de fabricación mejora el comportamiento del composite. Debido a la capacidad de desarrollar una mayor tensión de adherencia entre la matriz y el tejido y a la posibilidad de realizar un mejor control de calidad durante la ejecución como resultado de la rigidez de la malla impregnada.
3. Se ha obtenido un aumento de la resistencia media última a tracción del 285% para el mortero de mejor rendimiento, cuando se utilizó la malla impregnada (GII). Los mejores resultados se obtuvieron para GII con MB, un mortero con alta resistencia a compresión (48 MPa) y fibras cortas. Se han conseguido resultados similares en términos de resistencia última a tracción para GII con MC, un mortero con una elevada resistencia a la compresión (45 MPa) y fibras largas.

4. La rigidez de los composites cambia con los estados. Decece significativamente durante el proceso de fisuración. En sistemas con malla impregnada y morteros mejorados, es posible identificar la curva trilineal tensión-deformación de acuerdo al comportamiento idealizado de los sistemas de FRCM. Esto indica que el deslizamiento de las fibras en la matriz se previene correctamente, permitiendo una explotación total de las propiedades mecánicas del tejido. La ausencia de la tercera rama en las probetas de GII con morteros de albañilería está en consonancia con los resultados previos de la literatura, en los que se encuentra que el comportamiento trilineal en composites con matrices de baja resistencia es poco común.
5. La selección de la técnica DIC para la adquisición de datos durante el ensayo permite la observación detallada del proceso de fisuración, procurando una mejor identificación del comportamiento trilineal de la curva tensión-deformación, así como una medida precisa del espacio entre fisuras.
6. El espacio medio entre fisuras (patrón de fisuración) es similar entre sistemas con la misma malla como refuerzo. Todos los sistemas con el tejido impregnado tenían una distancia media entre fisuras inferior a 45 mm, mientras que los sistemas con la malla sin recubrimiento tenían una distancia entre fisuras superior a 60 mm. La menor distancia media entre fisuras se obtuvo para el sistema GII-MC.
7. El factor de eficiencia es un factor empleado habitualmente para evaluar la bondad de un sistema FRCM. Se define como la relación entre la resistencia última del composite y la cantidad de refuerzo y su resistencia última. Los mejores resultados en términos de factor de eficiencia se obtuvieron para los sistemas GII-MB y GII-MC, siendo 768% y 760% respectivamente.
8. La comparación con los resultados obtenidos de la literatura es difícil, ya que existe gran dispersión. Sin embargo, se puede observar como la utilización del sistema de agarre *clamping* es la

única que permite la aparición de curvas trilineales. Además, se ha observado que la carga última obtenida para el mismo sistema es mayor si se ensaya con *clamping* que con *clevis*. Por otro lado, se ha observado que no existe correlación entre la resistencia de fisuración del composite y la resistencia última, ni tampoco entre la resistencia a tracción del mortero de la matriz y la resistencia de fisuración y última del composite.

8.4 Conclusiones de los ensayos a flexión de vigas reforzadas con FRCM

Se ensayaron a flexión de tres puntos vigas reforzadas con FRCM de carbono para analizar la influencia del número de capas de tejido y el mortero usado como matriz en la carga última y el ratio de explotación de la fibra. Las vigas tenían una entalla de 70 mm de profundidad para evitar la influencia de la armadura y controlar el patrón de fisuración de las vigas. Los sistemas de FRCM se seleccionaron entre los ensayados previamente en tracción, para comparar el comportamiento de un mortero convencional de albañilería con dos morteros mejorados cuando existe una interfaz matriz-hormigón. La adquisición de datos utilizada durante los ensayos fue la Correlación Digital de Imagen (DIC). Basadas en los resultados y en la discusión, se han obtenido las siguientes conclusiones:

1. Se alcanza una carga última mayor para todas las vigas reforzadas con FRCM, el aumento de capacidad de carga es de aproximadamente entre el 200% y el 450% con respecto al patrón adoptado.
2. El tipo de fallo más común es el despegue en la interfaz matriz-tejido en la capa más interna de malla cuando se aplican dos capas. El otro modo de fallo observado fue el despegue en la interfaz matriz-soporte en la viga reforzada con dos capas de GII-MD.
3. Las curvas tensión-flecha son similares en vigas del mismo tipo, especialmente en los primeros estados de carga.

4. La técnica DIC permite observar adecuadamente el comportamiento del FRCM en términos de deformación y patrón de fisuración durante los ensayos. Además, esta técnica permite analizar el proceso de despegue de las interfaces FRCM-viga y tejido-matriz.
5. Comparando el comportamiento del composite cuando está aplicado en las vigas con el obtenido en los ensayos a tracción, se concluye que la rigidez es similar, aunque la deformación última es mayor y, por lo tanto, la resistencia última también es mayor.
6. El análisis de la tensión de adherencia en la interfaz FRCM-hormigón revela que la longitud efectiva es de entre 150 mm y 200 mm, resultados comparables con la longitud efectiva del FRP.
7. El ratio de explotación de las fibras es mayor para los refuerzos de una capa de tejido, aunque todos los sistemas aplicados en vigas tienen un ratio de explotación mayor al obtenido con los ensayos a tracción.
8. La comparación con una viga de mayor ancho y doble ancho de tejido que las de referencia presenta una adecuada coherencia en términos de carga última y de modo de fallo obtenido.

8.5 Conclusiones de la modelización numérica de las vigas de hormigón reforzadas con FRCM mediante técnicas de macro-modelización

Se realizó un análisis numérico detallado para estudiar el comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas con sistemas de FRCM. Se modelaron cuatro tipos de vigas de hormigón con entalla para evaluar la influencia de varios parámetros, la precisión de la simulación de la viga de hormigón en masa y armado y, principalmente el comportamiento de las vigas reforzadas con FRCM. En todos los casos, se ha aplicado la ley de plasticidad de Von Mises para la armadura y el modelo *total strain-based crack* para el hormigón y el FRCM. Los modelos adoptados son capaces de representar la fisuración del hormigón, la fisuración del FRCM y el

comportamiento global de la viga. El despegue en la interfaz matriz-viga no se considera explícitamente en el modelo, ya que el modo de fallo más común ocurre por la delaminación interna de las fibras en la matriz del composite. El objetivo principal de la simulación es evaluar si la simplificación del comportamiento de la interfaz afecta al comportamiento idealizado global de las vigas.

Los resultados numéricos, de todos los modelos, se comparan en términos de curvas carga-flecha con los resultados experimentales. También, se estudian las tensiones principales de compresión y las deformaciones principales de tracción en los momentos críticos del comportamiento de cada viga.

Se han extraído las siguientes conclusiones:

1. La conclusión principal obtenida es la posibilidad de estimar el comportamiento de una viga de hormigón armado reforzada con FRCM mediante simulaciones numéricas con un enfoque de macro-modelado.
2. El modelo tiene suficiente precisión para representar la viga. La caracterización de los materiales se realiza mediante ensayos de tracción de probetas prismáticas de FRCM, lo que permite estudiar sus propiedades mecánicas de forma más sencilla y barata que los ensayos de flexión de vigas reforzadas con FRCM.
3. Respecto a la viga de referencia (VREF), la carga desciende cuando se alcanza la resistencia del hormigón y después de la caída comienza a aumentar ligeramente. En las vigas reforzadas con FRCM, no hay descensos de la carga, simplemente desciende la rigidez. Si comparamos el comportamiento de los dos tipos de vigas reforzadas, podemos apreciar como el comportamiento es similar (las curvas carga-flecha tienen la misma forma), pero al igual que ocurre con los resultados de tracción, la carga alcanzada por las vigas reforzadas con GII-MB es mayor.

4. El modelo alcanza una precisión alta, y suficiente para fines de ingeniería, basándose exclusivamente en los modelos constitutivos del hormigón y el FRCM y considerando una unión perfecta entre el composite y el soporte.
5. La combinación del enfoque de macro-modelado con la unión perfecta de la viga con el FRCM y el uso de los resultados experimentales de los ensayos a tracción reducen el coste computacional y la necesidad de realizar ensayos a flexión.

8.6 Futuras líneas de investigación

La investigación realizada ha permitido alcanzar conclusiones acerca del comportamiento de los refuerzos de FRCM en función de sus componentes (matrices y mallas). Asimismo, se ha podido observar la eficacia de refuerzos en vigas de hormigón armado, y se ha desarrollado un macro-modelo de cálculo con buena capacidad predictiva del comportamiento general. El estudio abre nuevas vías de investigación, entre las que cabe reseñar:

1. Estudio experimental pormenorizado de la adherencia FRCM-soportes (hormigón y fábrica), para la solución en la que se han obtenido mejores resultados a nivel de tracción del composite.
2. Incorporación de la interfaz FRCM-soporte en un modelo de cálculo con aproximación de micromodelo, capaces de reproducir los modos de fallo presentes en este tipo de refuerzos.
3. Evaluación de la influencia de múltiples capas en las distintas interfaces formadas, con objeto de identificar si existe un valor máximo de capas para el que el comportamiento sea asimilable al observado en tracción.
4. Incorporación a los modelos de estudio de durabilidad y análisis de Ciclo de Vida de morteros específicamente diseñados para soluciones de reparación y refuerzo, como los empleados como matrices en este estudio.

Capítulo 9. Conclusions

9.1 Introduction

This chapter presents the main conclusions drawn from experimental tests results and numerical model. The conclusions are grouped according to the experimental campaigns; first, the conclusions from mortar durability tests are presented. Then, the conclusions from uniaxial tensile tests on FRCM systems are reported. The bending test matrix is selected from these results, the conclusions obtained from flexural tests are the following presented. Finally, the conclusions from numerical modelling of FRCM reinforced concrete beams are listed.

The conclusions show the influence of the materials that form the FRCM systems in each of the experimental phases, allowing deeper understanding of the overall behaviour.

9.2 Conclusions from the study of the durability of the mortars

Mechanical properties and durability of the mortars employed as FRCM matrix are analysed, in order to assess the dual function of the composite, to protect the concrete and to be a structural reinforcement. The following conclusions can be drawn from the tests:

1. Repair mortars exhibit better performance against chloride penetration than conventional mortars, with a noticeable increase at depths greater than 5 mm. This is relevant for protecting

concrete supports, as the nominal depth for repair and reinforcement systems are usually greater than 4 mm. Similar general results were obtained for carbonation resistance.

2. Regarding life service prediction models, the one used with chloride penetration is much more accurate than the one for carbonation with enhanced mortars (with fibres, polymers, high cement content,...). The method for carbonation is not able to reproduce the behaviour of repair mortars, with disagreements between experimental results and predictions.
3. Electrical resistivity and gas permeability are non-destructive tests that allow obtain relevant information about connectivity and refinement of porous network. In this respect, experimental data reveal a strong correlation between these properties and the behaviour against chloride penetration.
4. Two mortars with better properties (mechanics and durable) are MB and MD. The main differences between the two mortars allow to conclude the high performance in particular settings. MD has higher compressive and flexural strength at early ages, which is especially suitable for repair applications; its results in terms of carbonation are the best (1/10 of carbonation depth of the reference concrete). On the other hand, MB performs better in terms of durability against chloride penetration, with good correlation to its low gas permeability; with respect to mechanical properties, the results at 28 days are very high.

9.3 Conclusions from uniaxial tensile tests of FRCM systems

Tensile tests of carbon FRCM system were carried out to study their mechanical properties and compare the influence of different combinations of textile and mortar. The focus was on the use of impregnated mesh, in order to evaluate the potential for improvement in terms of fibre-matrix bonding behaviour. Four enhanced mortars were compared with two masonry mortars. The data acquisition technique employed during mechanical

characterization tests was digital image correlation (DIC). Based on the results and discussion presented, the following conclusions can be drawn:

1. The FRCM behaviour depends on mortar, and specially, mesh properties. The use of an impregnated mesh improves the results in terms of smaller mean cracking space, higher ultimate strength, and modulus of elasticity.
2. The coated applied to the mesh during manufacturing improves the composite behaviour. Due to the ability to develop higher bond stress between matrix and textile and the possibility of better quality control during the execution as a result of the stiffness of the impregnated mesh.
3. The mean ultimate strength for the best performing mortar with the impregnated mesh had an increase of 285%. The best results were obtained for GII with MB, a mortar with high compressive strength (48 MPa) and short fibres. Similar results in terms of ultimate strength were achieved for GII with MC, a mortar with high compressive strength (45 MPa) and long fibres.
4. The composite stiffness changes with the stages. It decreases significantly during cracking process. It is possible to identify trilinear stress-strain curves with coated textiles and enhanced mortars as idealized behaviour of FRCM systems. That indicated that fibres slippage of the fibres in the matrix is avoided, allowing a total exploitation of textile mechanical properties. The lack of the third branch in GII specimens with conventional mortars is in line with previous results from the literature, where trilinear behaviour in composites with low-strength matrices is not commonly found.
5. The employment of digital image correlation (DIC) as data acquisition technique allows a detailed cracking process observation. It provides a better identification of the trilinear behaviour of the stress-strain curve, as well as an accurate measurement of cracking space.

6. Mean cracking space (cracking pattern) is similar between systems with the same textile. All the systems formed with impregnated mesh have a mean cracking space of less than 45 mm, while all the systems with the uncoated mesh have a mean crack space bigger than 60 mm. The shortest mean crack space was obtained for GII-MB system.
7. The efficiency factor is a factor commonly used to evaluate the performance of a FRCM system. It is defined as the ratio between ultimate strength of the composite and the content of fibres and the ultimate strength of the mesh. The best results in terms of exploitation ratio were obtained for GII-MB and GII-MC systems, being 768% and 760%, respectively.
8. Comparison with the results from the literature is difficult, as there is a high scatter. However, it can be observed that the use of clamping system is the only one that allows trilinear curves. In addition, it has been observed that ultimate strength obtained for the same systems is higher if it is tested with clamping than with clevis. On the other hand, it has been observed that there is no correlation between the cracking strength of the composite and the ultimate strength, nor between the mortar tensile strength and composite cracking and ultimate strength.

9.4 Conclusions from bending tests of concrete beams reinforced with FRCM

Concrete beams reinforced with carbon FRCM were three-points bending tested to analyse the influence of the number of textile layers and mortar employed as matrix in the ultimate load and exploitation ratio of the fibres. The beams have a 70 mm depth notch to avoid the influence of steel longitudinal reinforcement and to control crack pattern of the beams. The FRCM systems were selected from the previously tensile tests, to compare the behaviour of conventional mortar with two enhanced mortars when matrix-to-support interface is presented. The data acquisition technique

employed during tests where digital image correlation (DIC). The following conclusions were drawn from the results and discussion:

1. A higher ultimate load is achieved for all beams strengthened with FRCM, the increase in load carrying capacity is approximately between 200% and 450%.
2. The most common failure mode is debonding at textile-to-matrix interface. When the reinforcement is formed by two layers, the detachment occurs in the most inner one (nearest to the beam). The other failure mode observed is detachment at matrix-to-support interface in the beam reinforced with two layers of GII-MD.
3. Load-deflection curves are similar in beams from the same typology, especially in the first load stages.
4. DIC technique allows to properly observe the behaviour of the FRCM in terms of deformation and cracking pattern during the tests. Additionally, this technique permits to analyse the debonding process at FRCM-to-beam and textile-to-matrix interfaces.
5. Comparing the composite's behaviour applied to beams with the obtained from tensile tests, it can be concluded that the stiffness is similar, although ultimate strain is higher and, therefore, the ultimate strength is also higher.
6. Bond stress analyse in FRCM-to-beam interface reveals that the effective length is between 150 mm and 200 mm, comparable results with the effective length of FRP.
7. Exploitation ratio is greater for one layer of textile reinforcements, although all the systems have higher exploitation ratio than from tensile tests.
8. Comparison with a beam of larger width and twice mesh width of the reference beams shows adequate consistency in terms of ultimate load and failure mode obtained.

9.5 Conclusions from the numerical modelling of concrete beams reinforced with FRCM using a macro-modelling approach

A detailed numerical analysis was carried out to study the behaviour of reinforced concrete beams strengthened with FRCM systems. Four types of concrete beams with a notch were modelled to evaluate the influence of several parameters, plain and reinforced concrete beams simulation accuracy and, mainly, beams reinforced with FRCM behaviour. In all cases, Von Mises plasticity law has been applied for steel reinforcement and total strain-based crack model for concrete and FRCM. The adopted models are able to represent the concrete and FRCM cracking and the global behaviour of the beams. Debonding at the support-to-matrix interface is not explicitly considered in the model, as the most common failure mode occurs due to internal delamination of the fibres in the matrix. The main goal of the simulation is to assess whether the amplification of the interface behaviour affects the overall idealised behaviour of the beams. The numerical results of all models are compared with experimental results in terms of load-deflection curves. Also, compressive principal stress and tensile principal strain of three key points of the behaviour of the beams are studied.

The following conclusions have been drawn:

1. The main conclusion obtained is the possibility of estimating the behaviour of a reinforced concrete beams strengthened with FRCM by means of numerical simulation with a macro-modelling approach.
2. The model is accurate to represent the beams. The characterisation of the materials is carried out by tensile testing of FRCM coupons, which allows to study their mechanical properties in a simpler and cheaper way than a flexural testing of the beams strengthened with FRCM.
3. With respect to the control beam (VREF), the load drops when the concrete strength is reached and after that, it starts to increase

slightly. In beams strengthened with FRCM, there is not a decrease in the load, only in the stiffness. If the behaviour of the two types of FRCM reinforced-beams is compared, it can be observed that the behaviour is similar (load-deflection curves have the same shape), but as with tensile results, the load reached by beams reinforced with GII-MB system is higher.

4. The model achieves a high accuracy, sufficient for engineering purposes, based solely on constitutive models of concrete and FRCM and considering a perfect bond between composites and support.
5. The macro-modelling approach, the perfect bond between the beam and the FRCM, as well as the use of experimental results from tensile tests reduce computational cost and the need of flexural tests.

9.6 Future works

The research carried out has allowed to draw conclusions about the FRCM reinforcements depending on their components (matrices and textile). It has also been possible to observe the effectiveness of composite reinforcement in concrete beams, and a macro-model of calculation has been developed with good predictive capacity of the general behaviour. The study raises new possibilities for research, including:

1. Detailed experimental study of the FRCM adherence to support (concrete and masonry), for the solution in which the best results have been obtained in terms of composite traction.
2. Incorporation of the FRCM-support interface in a calculation model with a micro-model approach, able to reproduce the failure modes in this type of reinforcement.
3. Evaluation of the influence of multiple layers at the different interfaces formed, in order to identify whether there is a maximum value of layers for which the behaviour is similar to that observed in tension.

4. Inclusion of mortars specifically designed for repair and reinforcement solutions, such as those employed as matrices in this study, in durability study and Life Cycle Analysis models.

Bibliografía

- [1] D'Antino T, Carloni C, Sneed LH, Pellegrino C. *Matrix-fiber bond behavior in PBO FRCM composites: A fracture mechanics approach*. Eng Fract Mech (2014);117:94–111. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.01.011>.
- [2] Carozzi FG, Milani G, Poggi C. *Mechanical properties and numerical modeling of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for strengthening of masonry structures*. Compos Struct (2014);107:711–25. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.08.026>.
- [3] Arboleda D, Carozzi FG, Nanni A, Poggi C. *Testing Procedures for the Uniaxial Tensile Characterization of Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composites*. J Compos Constr (2016);20:04015063. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000626](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000626).
- [4] Papanicolaou CG, Triantafillou TC, Papathanasiou M, Karlos K. *Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: Out-of-plane cyclic loading*. Mater Struct Constr (2008);41:143–57. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9226-0>.
- [5] Bertolesi E, Carozzi FG, Milani G, Poggi C. *Numerical modeling of Fabric Reinforce Cementitious Matrix composites (FRCM) in tension*. Constr Build Mater (2014);70:531–48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.006>.
- [6] Caggegi C, Carozzi FG, De Santis S, Fabbrocino F, Focacci F, Hojdys Ł, et al. *Experimental analysis on tensile and bond properties of PBO and aramid fabric reinforced cementitious matrix for strengthening masonry structures*. Compos Part B Eng (2017);127:175–95. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.048>.
- [7] Caggegi C, Lanoye E, Djama K, Bassil A, Gabor A. *Tensile behaviour of a basalt TRM strengthening system: Influence of mortar and reinforcing textile ratios*. Compos Part B Eng (2017);130:90–102. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.027>.
- [8] de Felice G, D'Antino T, De Santis S, Meriggi P, Roscini F. *Lessons Learned on the Tensile and Bond Behavior of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites*. Front Built Environ (2020);6. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00005>.

- [9] Donnini J, Chiappini G, Lancioni G, Corinaldesi V. *Tensile behaviour of glass FRCM systems with fabrics' overlap: Experimental results and numerical modeling*. *Compos Struct* (2019);212:398–411. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.053>.
- [10] Leone M, Aiello MA, Balsamo A, Carozzi FG, Ceroni F, Corradi M, et al. *Glass fabric reinforced cementitious matrix: Tensile properties and bond performance on masonry substrate*. *Compos Part B Eng* (2017);127:196–214. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.028>.
- [11] Carozzi FG, Bellini A, D'Antino T, de Felice G, Focacci F, Hojdys Ł, et al. *Experimental investigation of tensile and bond properties of Carbon-FRCM composites for strengthening masonry elements*. *Compos Part B Eng* (2017);128:100–19. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.018>.
- [12] Ombres L, Mancuso N, Mazzuca S, Verre S. *Bond between Carbon Fabric-Reinforced Cementitious Matrix and Masonry Substrate*. *J Mater Civ Eng* (2019);31:04018356. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002561](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002561).
- [13] Lignola GP, Caggegi C, Ceroni F, De Santis S, Krajewski P, Lourenço PB, et al. *Performance assessment of basalt FRCM for retrofit applications on masonry*. *Compos Part B Eng* (2017);128:1–18. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.003>.
- [14] D'Antino T, Papanicolaou C. *Mechanical characterization of textile reinforced inorganic-matrix composites*. *Compos Part B Eng* (2017);127:78–91. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.034>.
- [15] Peled A, Bentur A. *Geometrical characteristics and efficiency of textile fabrics for reinforcing cement composites*. *Cem Concr Res* (2000);30:781–90. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00239-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00239-8).
- [16] Hartig J, Jesse F, Schicktanz K, Häußler-Combe U. *Influence of experimental setups on the apparent uniaxial tensile load-bearing capacity of Textile Reinforced Concrete specimens*. *Mater Struct Constr* (2012);45:433–46. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9775-0>.
- [17] Ombres L. *Analysis of the bond between Fabric Reinforced Cementitious Mortar (FRCM) strengthening systems and concrete*. *Compos Part B Eng* (2015);69:418–26.

- <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.027>.
- [18] Awani O, Refai A El, El-Maaddawy T. *Bond characteristics of carbon fabric-reinforced cementitious matrix in double shear tests*. *Constr Build Mater* (2015);101:39–49. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.017>.
- [19] D’Antino T, Papanicolaou C (Corina). *Comparison between different tensile test set-ups for the mechanical characterization of inorganic-matrix composites*. *Constr Build Mater* (2018);171:140–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.041>.
- [20] De Santis S, De Felice G. *Tensile behaviour of mortar-based composites for externally bonded reinforcement systems*. *Compos Part B Eng* (2015);68:401–13. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.09.011>.
- [21] Donnini J, Corinaldesi V. *Mechanical characterization of different FRCM systems for structural reinforcement*. *Constr Build Mater* (2017);145:565–75. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.051>.
- [22] Papanicolaou CG, Papantoniou IC. Optimum design of textile-reinforced concrete as integrated formwork in slabs. *Text. Fibre Compos. Civ. Eng.*, (2016), p. 246–74.
- [23] Peled A, Mobasher B, Bentur A. *Textile reinforced concrete*. 1st editio. London: CRC Press; (2017). <https://doi.org/10.1201/9781315119151>.
- [24] CNR-DT 215/2018. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded Fibre Reinforced Inorganic Matrix Systems for Strengthening Existing Structures*. Italy: Italian National Research Council; (2018).
- [25] Peled A, Cohen Z, Pasder Y, Roye A, Gries T. *Influences of textile characteristics on the tensile properties of warp knitted cement based composites*. *Cem Concr Compos* (2008);30:174–83. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.09.001>.
- [26] Ascione L, De Felice G, De Santis S. *A qualification method for externally bonded Fibre Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) strengthening systems*. *Compos Part B Eng* (2015);78:497–506. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.079>.
- [27] Bellini A, Bovo M, Mazzotti C. *Experimental and numerical evaluation of fiber-matrix interface behaviour of different FRCM systems*. *Compos*

- Part B Eng (2019);161:411–26.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.115>.
- [28] Choi D, Vachirapanyakun S, Ochirbud M, Naidangjav U, Ha S, Kim Y. *Tensile Performance, Lap-Splice Length and Behavior of Concretes Confined by Prefabricated C-FRCM System*. *Int J Concr Struct Mater* (2021);15:45. <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00481-w>.
- [29] ACI Committee 549. *ACI 549.4R-20 Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix and Steel-Reinforced Grout Systems for Repair and Strengthening of Concrete Structures*. United State of America: (2020).
- [30] ACI committee 549. *ACI 549.6R-20 Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) and Steel-Reinforced Grout (SRG) Systems for Repair and Strengthening Masonry Structures*. (2012).
- [31] AC434. *Acceptance criteria for concrete and masonry strengthening using fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM)*. ICC Eval Serv Whittier, CA (2018).
- [32] ACI committee 549. *ACI 549.4R-13 - Guide to design and construction of externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) systems for repair and strengthening concrete and masonry structures*. United State of America: (2013).
- [33] Nunes VA, Borges PHR, Zanotti C. *Mechanical compatibility and adhesion between alkali-activated repair mortars and Portland cement concrete substrate*. *Constr Build Mater* (2019);215:569–81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.189>.
- [34] Tilly G, Jacobs J. *Concrete repairs-performance in service and current practice*. IHS Bre Press; (2007).
- [35] Hassan KE, Brooks JJ, Al-Alawi L. *Compatibility of repair mortars with concrete in a hot-dry environment*. *Cem Concr Compos* (2001);23:93–101. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00073-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00073-1).
- [36] Mirza J, Mirza MS, Lapointe R. *Laboratory and field performance of polymer-modified cement-based repair mortars in cold climates*. *Constr Build Mater* (2002);16:365–74. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00027-2](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00027-2).

- [37] Luo J, Li Q, Zhao T, Gao S, Sun S. *Bonding and toughness properties of PVA fibre reinforced aqueous epoxy resin cement repair mortar*. *Constr Build Mater* (2013);49:766–71. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.052>.
- [38] Rahman MM, Islam MA. *Effect of epoxy resin on the intrinsic properties of masonry mortars*. *Iran Polym J (English Ed)* (2012);21:621–9. <https://doi.org/10.1007/s13726-012-0065-7>.
- [39] Shi J, Liu B, Qin J, Jiang J, Wu X, Tan J. *Experimental study of performance of repair mortar: Evaluation of in-situ tests and correlation analysis*. *J Build Eng* (2020);31:101325. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101325>.
- [40] AENOR. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. UNE-EN 197-1:2011. (2011).
- [41] AENOR. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1 : Determinación de resistencias. UNE-EN 196-1:2018. (2018).
- [42] AENOR. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Definiciones, requisitos, control de calidad y evaluación de la conformidad. Parte 3: Reparación estructural y no estructural. UNE-EN 1504-3:2006. (2006).
- [43] AENOR. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia. UNE-EN 12390-2: 2020. (2020).
- [44] AENOR. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia a la carbonatación. UNE-EN:13295:2005. (2005).
- [45] AENOR. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación del contenido en cloruros en el hormigón endurecido. UNE-EN 14629:2007. (2007).
- [46] García R, Reyes E, Villanueva P, de la Rubia M, Fernández J, Moragues A. *Service Life and Early Age Durability Enhancement due to Combined Metakaolin and Nanosilica in Mortars for Marine Applications*. *Materials (Basel)* (2020);13:1169. <https://doi.org/10.3390/ma13051169>.

- [47] AENOR. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 1: Método directo (método de referencia)-UNE 83988-1:2008. (2008).
- [48] García R, Reyes E, Villanueva P, de la Rubia MÁ, Fernández J, Moragues A. *Correction: García et al. Service Life and Early Age Durability Enhancement due to Combined Metakaolin and Nanosilica in Mortars for Marine Applications. Materials 2020, 13, 1169. Materials (Basel) (2022);15:5144. <https://doi.org/10.3390/ma15155144>.*
- [49] Sengul O. *Use of electrical resistivity as an indicator for durability. Constr Build Mater (2014);73:434–41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.077>.*
- [50] Bakhshi M, Mahoutian M, Shekarchi M. The Gas Permeability of Concrete and Its Relationship with Strength. Second Int. fib Congr., Naples: CEB-FIB; (2006).
- [51] D'Andrea R. *Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica (2010)* Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica. Universidad Politécnica de Madrid, (2010). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.3704>.
- [52] Shi J, Qian R, Wang D, Liu Z, Chun Q, Zhang Y. *Experimental study on gas permeability of cement-based materials. Cem Concr Compos (2022);129:104491. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104491>.*
- [53] AENOR. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Acondicionamiento de probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad - UNE 83966:2008. (2008).
- [54] AENOR. *Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo: Determinación de la permeabilidad al oxígeno del hormigón endurecido - UNE 83981:2008 (2008):8.*
- [55] ASTM. Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion-ASTM C 1556:2011. (11AD).
- [56] Fabien A, Choinska M, Bonnet S, Pertue A, Khelidj A. *Aggregate size*

- effects on the mechanical behaviour and on the gas permeability at damaged state of cement-based materials with and without slag.* Eur J Environ Civ Eng (2022);26:5674–95.
<https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1915881>.
- [57] Loosveldt H, Lafhaj Z, Skoczylas F. *Experimental study of gas and liquid permeability of a mortar.* Cem Concr Res (2002);32:1357–63.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00793-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00793-7).
- [58] Care S, Derkx F. *Determination of relevant parameters influencing gas permeability of mortars.* Constr Build Mater (2011);25:1248–56.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.028>.
- [59] Zhang Y, Zuo L, Yang J, Cai X, Zhao Y, Zeng X. *Effect of cementitious capillary crystalline waterproofing coating on the gas permeability of mortar.* Struct Concr (2019);20:1763–70.
<https://doi.org/10.1002/suco.201900016>.
- [60] Cheng Z, Ye B, Feng X. *Investigation of the Gas Breakthrough Properties of Mortar with Different Mixing Proportions of Silica Fume.* J Mater Civ Eng (2021);33:1–10.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003948](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003948).
- [61] Cheng Z, Wang Y, Zhao J, Huang C. *Gas Permeability Prediction of Mortar Samples Based on Different Methods.* Crystals (2022);12:1–15.
<https://doi.org/10.3390/cryst12050581>.
- [62] Chen W, Xu A, Zhang H, Sheng M, Liang Y, Skoczylas F. *The Effect of Different Freeze-Thaw Cycles on Mortar Gas Permeability and Pore Structure.* Fluid Dyn Mater Process (2023);19:1623–36.
<https://doi.org/10.32604/fdmp.2023.025083>.
- [63] Chen W, Liu Y, Sheng M, Zhang H, Liang Y, Skoczylas F. *Heating Rate Effect on Gas Permeability and Pore Structure of Mortar under High Temperature.* Materials (Basel) (2022);15.
<https://doi.org/10.3390/ma15196505>.
- [64] Ren F, Zhou C, Zeng Q, Ding Z, Xing F, Wang W. *The dependence of capillary sorptivity and gas permeability on initial water content for unsaturated cement mortars.* Cem Concr Compos (2019);104:103356.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103356>.
- [65] AENOR. Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General

- rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. UNE-EN 1992-1-1:2020. (2023).
- [66] Tuutti K. *Corrosion of steel in concrete* (1982) Corrosion of steel in concrete. Lund University, (1982).
- [67] Häkkinen T. *The influence of slag content on the microstructure, permeability and mechanical properties of concrete*. Cem Concr Res (1993);23:518–30. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90002-Q](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90002-Q).
- [68] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Código Estructural. Capítulo 9. Durabilidad de las estructuras de hormigón. vol. 58. (2021).
- [69] Schießl P, Bamforth P, Baroghel-Bouny V, Corley G, Faber M, Gehlen C, et al. fib bulletin 34: Model Code for Service Life Design. (2006).
- [70] de Felice G, Aiello MA, Caggegi C, Ceroni F, De Santis S, Garbin E, et al. *Recommendation of RILEM Technical Committee 250-CSM: Test method for Textile Reinforced Mortar to substrate bond characterization*. Mater Struct Constr (2018);51:1–9. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1216-x>.
- [71] De Santis S, Hadad HA, De Caso y Basalo F, de Felice G, Nanni A. *Acceptance Criteria for Tensile Characterization of Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Systems for Concrete and Masonry Repair*. J Compos Constr (2018);22:04018048. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000886](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000886).
- [72] Contamine R, Si Larbi A, Hamelin P. *Contribution to direct tensile testing of textile reinforced concrete (TRC) composites*. Mater Sci Eng A (2011);528:8589–98. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.08.009>.
- [73] Carozzi FG, Poggi C. *Mechanical properties and debonding strength of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for masonry strengthening*. Compos Part B Eng (2015);70:215–30. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.056>.
- [74] Mobasher B, Peled A, Pahilajani J. *Distributed cracking and stiffness degradation in fabric-cement composites*. Mater Struct Constr (2006);39:317–31. <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9005-8>.
- [75] Raupach M, Orlowsky J, Büttner T, Dilthey U, Scheleser M. Epoxy-impregnated textiles in concrete – Load bearing capacity and

- durability. *Int. Conf. Text. Reinf. Concr.*, (2006), p. 77–88. <https://doi.org/10.1617/2351580087.008>.
- [76] Singla N. *Experimental and theoretical study of fabric cement composites for retrofitting masonry structures* (2004) Experimental and theoretical study of fabric cement composites for retrofitting masonry structures. Arizona State University, (2004).
- [77] Truong VD, Kim DJ. *A review paper on direct tensile behavior and test methods of textile reinforced cementitious composites*. *Compos Struct* (2021);263. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113661>.
- [78] Zhu D, Peled A, Mobasher B. *Dynamic tensile testing of fabric-cement composites*. *Constr Build Mater* (2011);25:385–95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.014>.
- [79] De Santis S, Carozzi FG, de Felice G, Poggi C. *Test methods for Textile Reinforced Mortar systems*. *Compos Part B Eng* (2017);127:121–32. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.016>.
- [80] Schreier H, Orteu J-J, Sutton MA. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. 1st ed. Boston, MA: Springer US; (2009). <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78747-3>.
- [81] De Santis S, de Felice G. *Steel reinforced grout systems for the strengthening of masonry structures*. *Compos Struct* (2015);134:533–48. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.094>.
- [82] Dong YL, Pan B. *A Review of Speckle Pattern Fabrication and Assessment for Digital Image Correlation*. *Exp Mech* (2017);57:1161–81. <https://doi.org/10.1007/s11340-017-0283-1>.
- [83] Pan B, Lu Z, Xie H. *Mean intensity gradient: An effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation*. *Opt Lasers Eng* (2010);48:469–77. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.08.010>.
- [84] Lecompte D, Sol H, Vantomme J, Habraken A. Analysis of speckle patterns for deformation measurements by digital image correlation. In: Slangen P, Cerruti C, editors. *Speckle06 Speckles, From Grains to Flowers*, vol. 6341, SPIE; (2006), p. 63410E. <https://doi.org/10.1117/12.695276>.
- [85] García-Martin R, López-Rebollo J, Sánchez-Aparicio LJ, Fueyo JG,

- Pisonero J, González-Aguilera D. *Digital image correlation and reliability-based methods for the design and repair of pressure pipes through composite solutions*. *Constr Build Mater* (2020);248:16–8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118625>.
- [86] Teijón-López-zuazo E, López-Rebollo J, Sánchez-Aparicio LJ, Garcia-Martín R, Gonzalez-Aguilera D. *Compression and strain predictive models in non-structural recycled concretes made from construction and demolition wastes*. *Materials (Basel)* (2021);14. <https://doi.org/10.3390/ma14123177>.
- [87] Pan B, Qian K, Xie H, Asundi A. *Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review*. *Meas Sci Technol* (2009);20:62001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/6/062001>.
- [88] Blaber J, Adair B, Antoniou A. *Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software*. *Exp Mech* (2015);55:1105–22. <https://doi.org/10.1007/s11340-015-0009-1>.
- [89] Hegger J, Will N, Bruckermann O, Voss S. *Load-bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete*. *Mater Struct Constr* (2006);39:765–76. <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9039-y>.
- [90] Arboleda D. *Fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites for infrastructure strengthening and rehabilitation: Characterization methods*. (2014).
- [91] De Domenico D, Maugeri N, Longo P, Ricciardi G, Gulli G, Calabrese L. *Clevis-Grip Tensile Tests on Basalt, Carbon and Steel FRCM Systems Realized with Customized Cement-Based Matrices*. *J Compos Sci* (2022);6:275. <https://doi.org/10.3390/jcs6090275>.
- [92] Donnini J, Corinaldesi V, Nanni A. *Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments*. *Compos Part B Eng* (2016);88:220–8. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.012>.
- [93] Ebead U, Shrestha KC, Afzal MS, El Refai A, Nanni A. *Effectiveness of Fabric-Reinforced Cementitious Matrix in Strengthening Reinforced Concrete Beams*. *J Compos Constr* (2017);21:1–14. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000741](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000741).

- [94] Estevan L, Varona FB, Baeza FJ, Torres B, Bru D. *Textile Reinforced Mortars (TRM) tensile behavior after high temperature exposure*. *Constr Build Mater* (2022);328:127116. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127116>.
- [95] Kim H-S, Truong GT, Park S-H, Choi K-K. *Tensile Properties of Carbon Fiber-Textile Reinforced Mortar (TRM) Characterized by Different Anchorage Methods*. *Int J Concr Struct Mater* (2018);12:73. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0296-x>.
- [96] Rodríguez-Marcos M, Villanueva-Llaurado P, Fernández-Gómez J, López-Rebollo J. *Improvement of tensile properties of carbon fibre-reinforced cementitious matrix composites with coated textile and enhanced mortars*. *Constr Build Mater* (2023);369:130552. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130552>.
- [97] Su M ni, Wang Z, Ueda T. *Optimization and design of carbon fabric-reinforced cementitious matrix composites*. *Struct Concr* (2022);23:1845–60. <https://doi.org/10.1002/suco.202000801>.
- [98] Tran H Van, Truong GT, Choi K-K. *Effect of Harsh Conditions on the Tensile Behaviour of Lap-Spliced Carbon Fiber Textile-Reinforced Mortar (TRM) with Different Surface Treatment Methods*. *Appl Sci* (2019);9:3087. <https://doi.org/10.3390/app9153087>.
- [99] Truong VD, Lee DH, Kim DJ. *Effects of different grips and surface treatments of textile on measured direct tensile response of textile reinforced cementitious composites*. *Compos Struct* (2021);278:114689. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114689>.
- [100] Wei LL, Zhu JH, Ueda T, Su MN, Liu J, Liu W, et al. *Tensile behaviour of carbon fabric reinforced cementitious matrix composites as both strengthening and anode materials*. *Compos Struct* (2020);234. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111675>.
- [101] Younis A, Ebead U, Shrestha K. *Tensile characterization of multi-ply fabric-reinforced cementitious matrix strengthening systems*. *Struct Concr* (2020);21:713–23. <https://doi.org/10.1002/suco.201900076>.
- [102] Akbari Hadad H, Nanni A, Ebead UA, El Refai A. *Static and Fatigue Performance of FRCM-Strengthened Concrete Beams*. *J Compos Constr* (2018);22. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000868](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000868).

- [103] Bressan J, Ghrib F, El Ragaby A. *FRCM Strengthening of Corrosion-Damaged RC Beams Subjected to Monotonic and Cyclic Loading*. J Compos Constr (2022);26. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001180](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001180).
- [104] D’Ambrisi A, Feo L, Focacci F. *Experimental and analytical investigation on bond between Carbon-FRCM materials and masonry*. Compos Part B Eng (2013);46:15–20. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.10.018>.
- [105] Ebead U, El-Sherif H. *Near surface embedded-FRCM for flexural strengthening of reinforced concrete beams*. Constr Build Mater (2019);204:166–76. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.145>.
- [106] El-Sherif H, Wakjira TG, Ebead U. *Flexural strengthening of reinforced concrete beams using hybrid near-surface embedded/externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix*. Constr Build Mater (2020);238:117748. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117748>.
- [107] Elghazy M, El Refai A, Ebead U, Nanni A. *Effect of corrosion damage on the flexural performance of RC beams strengthened with FRCM composites*. Compos Struct (2017);180:994–1006. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.069>.
- [108] Elghazy M, El Refai A, Ebead U, Nanni A. *Corrosion-Damaged RC Beams Repaired with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix*. J Compos Constr (2018);22. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000873](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000873).
- [109] Feng R, Liu Y, Zhu J-H, Xing F. *Flexural behaviour of C-FRCM strengthened corroded RC continuous beams*. Compos Struct (2020);245:112200. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112200>.
- [110] Jabr A, El-Ragaby A, Ghrib F. *Effect of the Fiber Type and Axial Stiffness of FRCM on the Flexural Strengthening of RC Beams*. Fibers (2017);5:2. <https://doi.org/10.3390/fib5010002>.
- [111] Khattak N, Mansour M, El-Maaddawy T, Ismail N. *Continuous Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix: Experimental Investigation and Numerical Simulation*. Buildings (2021);12:27. <https://doi.org/10.3390/buildings12010027>.

- [112] Kim H-Y, You Y-J, Ryu G-S. *Flexural Strengthening of RC Slabs with Lap-Spliced Carbon Textile Grids and Cementitious Grout*. *Materials* (Basel) (2022);15:2849. <https://doi.org/10.3390/ma15082849>.
- [113] Kim H-Y, You Y-J, Ryu G-S. *Reinforced Concrete Slabs Strengthened with Carbon Textile Grid and Cementitious Grout*. *Materials* (Basel) (2021);14:5046. <https://doi.org/10.3390/ma14175046>.
- [114] Kim H-Y, You Y-J, Ryu G-S, Koh K-T, Ahn G-H, Kang S-H. *Flexural Strengthening of Concrete Slab-Type Elements with Textile Reinforced Concrete*. *Materials* (Basel) (2020);13:2246. <https://doi.org/10.3390/ma13102246>.
- [115] Mandor A, El Refai A. *Strengthening the hogging and sagging regions in continuous beams with fiber-reinforced cementitious matrix (FRCM): Experimental and analytical investigations*. *Constr Build Mater* (2022);321:126341. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126341>.
- [116] Raouf SM, Bournas DA. *TRM versus FRP in flexural strengthening of RC beams: Behaviour at high temperatures*. *Constr Build Mater* (2017);154:424–37. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.195>.
- [117] Raouf SM, Koutas LN, Bournas DA. *Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams*. *Constr Build Mater* (2017);151:279–91. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.023>.
- [118] Su M, Wei L, Zhu J-H, Ueda T, Guo G, Xing F. *Combined Impressed Current Cathodic Protection and FRCM Strengthening for Corrosion-Prone Concrete Structures*. *J Compos Constr* (2019);23. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000949](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000949).
- [119] Su M, Zeng C, Li W, Zhu J-H, Lin W, Ueda T, et al. *Flexural performance of corroded continuous RC beams rehabilitated by ICCP-SS*. *Compos Struct* (2020);232:111556. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111556>.
- [120] Su M, Wei L, Zeng Z, Ueda T, Xing F, Zhu J-H. *A solution for sea-sand reinforced concrete beams*. *Constr Build Mater* (2019);204:586–96. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.146>.
- [121] Wei L, Ueda T, Matsumoto K, Zhu J-H. *Experimental and analytical*

- study on the behavior of RC beams with externally bonded carbon-FRCM composites.* Compos Struct (2021);273:114291. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114291>.
- [122] Akbari Hadad H, Erickson B, Nanni A. *Flexural analysis and design of FRCM-strengthened RC beams.* Constr Build Mater (2020);244:118371. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118371>.
- [123] Azam R, Soudki K, West JS, Noël M. *Strengthening of shear-critical RC beams: Alternatives to externally bonded CFRP sheets.* Constr Build Mater (2017);151:494–503. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.106>.
- [124] Azam R, Soudki K, West JS, Noël M. *Behavior of Shear-Critical RC Beams Strengthened with CFRCM.* J Compos Constr (2018);22. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000829](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000829).
- [125] Wakjira TG, Ebead U. *FRCM/internal transverse shear reinforcement interaction in shear strengthened RC beams.* Compos Struct (2018);201:326–39. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.034>.
- [126] Younis A, Ebead U, Shrestha KC. *Different FRCM systems for shear-strengthening of reinforced concrete beams.* Constr Build Mater (2017);153:514–26. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.132>.
- [127] Tetta ZC, Koutas LN, Bournas DA. *Textile-reinforced mortar (TRM) versus fiber-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams.* Compos Part B Eng (2015);77:338–48. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.055>.
- [128] Tetta ZC, Bournas DA. *TRM vs FRP jacketing in shear strengthening of concrete members subjected to high temperatures.* Compos Part B Eng (2016);106:190–205. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.026>.
- [129] De Domenico D, Quattrocchi A, Alizzio D, Montanini R, Urso S, Ricciardi G, et al. *Experimental characterization of the frcm-concrete interface bond behavior assisted by digital image correlation.* Sensors (Switzerland) (2021);21:1–20. <https://doi.org/10.3390/s21041154>.
- [130] Calabrese AS, D’Antino T, Colombi P. *Experimental and analytical investigation of PBO FRCM-concrete bond behavior using direct and*

- indirect shear test set-ups*. *Compos Struct* (2021);267:113672.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113672>.
- [131] López-Rebollo J, Cárdenas-Haro X, Parra-Vargas JP, Narváez-Berrezueta K, Pino J. *Improvement of Mechanical Properties of Compressed Earth Blocks with Stabilising Additives for Self-Build of Sustainable Housing*. *Buildings* (2024);14:664.
<https://doi.org/10.3390/buildings14030664>.
- [132] Fantilli AP, Ferretti D, Iori I, Vallini P. *Flexural Deformability of Reinforced Concrete Beams*. *J Struct Eng* (1998);124:1041–9.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1998\)124:9\(1041\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:9(1041)).
- [133] Bertolli V, D’Antino T. *Modeling the behavior of externally bonded reinforcement using a rigid-trilinear cohesive material law*. *Int J Solids Struct* (2022);248:111641.
<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2022.111641>.
- [134] Focacci F, D’Antino T, Carloni C. *Simplified Procedure to Determine the Cohesive Material Law of Fiber-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM)–Substrate Joints*. *Materials (Basel)* (2024);17.
<https://doi.org/10.3390/ma17071627>.
- [135] Rovero L, Galassi S, Misseri G. *Experimental and analytical investigation of bond behavior in glass fiber-reinforced composites based on gypsum and cement matrices*. *Compos Part B Eng* (2020);194:108051.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108051>.
- [136] Cook RA, Konz RC. *Factors Influencing Bond Strength of Adhesive Anchors*. *Struct J* (2001);98:76–86.
- [137] Okelo R, Asce AM, Yuan RL, Asce M. *Bond Strength of Fiber Reinforced Polymer Rebars in Normal Strength Concrete* (2005);9:203–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2005\)9](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9).
- [138] Kim SJ, Smith ST, Asce M. *Pullout Strength Models for FRP Anchors in Uncracked Concrete* (2010);14:406–14.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000097](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000097).
- [139] Mostofinejad D, Arefian B. *Generic assessment of effective bond length of FRP-concrete joint based on the initiation of debonding: Experimental and analytical investigation*. *Compos Struct*

- (2021);277:114625. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114625>.
- [140] Hosseini A, Mostofinejad D. *Effective bond length of FRP-to-concrete adhesively-bonded joints: Experimental evaluation of existing models*. Int J Adhes Adhes (2014);48:150–8. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.09.022>.
- [141] Jung K, Hong K, Han S, Park J, Kim J. *Prediction of Flexural Capacity of RC Beams Strengthened in Flexure with FRP Fabric and Cementitious Matrix*. Int J Polym Sci (2015);2015. <https://doi.org/10.1155/2015/868541>.
- [142] Urso S, Hadad HA, Borsellino C, Recupero A, Yang Q Da, Nanni A. *Numerical Modelling of FRCM Materials Using Augmented-FEM*. Key Eng Mater (2019);817:23–9. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.817.23>.
- [143] Monaco A, D’anna J, Oddo MC, Minafò G, La Mendola L. *Numerical modelling of the tensile behaviour of BFRCM strips*. Key Eng Mater (2019);817 KEM:15–22. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.817.15>.
- [144] Monaco A, Minafò G, D’Anna J, Oddo MC, La Mendola L. *Constitutive Numerical Model of FRCM Strips Under Traction*. Front Built Environ (2020);6:1–10. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00060>.
- [145] Oddo MC, Minafó G, Di Leto M, La Mendola L. *Numerical Modelling of the Constitutive Behaviour of FRCM Composites through the Use of Truss Elements*. Materials (Basel) (2023);16. <https://doi.org/10.3390/ma16031011>.
- [146] Minafò G, Oddo MC, Camarda G, Leto M Di, La Mendola L. *Effect of interface model parameters on the numerical response of a FE model for predicting the FRCM-to-masonry bond*. Acta Mech (2024);235:1669–83. <https://doi.org/10.1007/s00707-023-03678-0>.
- [147] Minafò G, Di Leto M, Camarda G, La Mendola L. *A GA-based model updating procedure for the numerical simulation of FRCM-to-masonry bond*. Eng Struct (2024);303:117512. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117512>.
- [148] Murgó FS, Ferretti F, Mazzotti C. *A discrete-cracking numerical model for the in-plane behavior of FRCM strengthened masonry panels*. vol.

19. Springer Netherlands; (2021). <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01129-6>.
- [149] Almeida JAPP, Pereira EB, Barros JAO. Numerical modelling of failure on brick masonry strengthened with FRCM overlays. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 596, (2019), p. 012026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/596/1/012026>.
- [150] Mininno G, Ghiassi B, Oliveira D V. *Modelling of the in-plane and out-of-plane performance of TRM-strengthened masonry walls*. Key Eng Mater (2017);747 KEM:60–8. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.747.60>.
- [151] Oliveira D V., Ghiassi B, Allahvirdizadeh R, Wang X, Mininno G, Silva RA. Macromodeling approach for pushover analysis of textile-reinforced mortar-strengthened masonry. Numer. Model. Mason. Hist. Struct. From Theory to Appl., (2019), p. 745–78. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102439-3.00021-X>.
- [152] Castellano A, Fraddosio A, Oliveira D V., Piccioni MD, Ricci E, Sacco E. *An effective numerical modelling strategy for FRCM strengthened curved masonry structures*. Eng Struct (2023);274:115116. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115116>.
- [153] Feng R, Zhang J, Li Y, Zhu J-H. *Interface behaviour of carbon-fabric-reinforced cementitious matrix composites with ICCP technique*. Mag Concr Res (2022);74:778–89. <https://doi.org/10.1680/jmacr.21.00143>.
- [154] Aljazaeri ZR, Al-Jaberi Z. *Numerical study on flexural behavior of concrete beams strengthened with fiber reinforced cementitious matrix considering different concrete compressive strength and steel reinforcement ratio*. Int J Eng Trans A Basics (2021);34:796–802. <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.04a.05>.
- [155] Elsanadedy HM, Almusallam TH, Alsayed SH, Al-Salloum YA. *Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar - Experimental and numerical study*. Compos Struct (2013);97:40–55. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.053>.
- [156] Mercedes L, Escrig C, Bernat-Masó E, Gil L. *Analytical approach and numerical simulation of reinforced concrete beams strengthened with different frcm systems*. Materials (Basel) (2021);14. <https://doi.org/10.3390/ma14081857>.

- [157] Feng R, Li Y, Zhu J-H. *Numerical study and seismic design of corroded circular RC columns strengthened by C-FRCM*. *Mag Concr Res* (2022);74:1065–80. <https://doi.org/10.1680/jmacr.20.00350>.
- [158] Johnson S. *Comparison of Nonlinear Finite Element Modeling Tools for Structural Concrete* (2006) Comparison of Nonlinear Finite Element Modeling Tools for Structural Concrete. University of Illinois at Urbana Champaign, (2006).
- [159] Dang CT, Pham M, Dinh NH. *Sensitivity analysis of parameters affecting the seismic performance of RC columns strengthened by fabric-reinforced cementitious mortar*. *Mater Res Express* (2024);11. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad484a>.
- [160] Chai S. *Finite Element Analysis for Civil Engineering with DIANA Software*. Singapore: Springer Singapore; (2020). <https://doi.org/10.1007/978-981-15-2945-0>.
- [161] fib. *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Wiley; (2013). <https://doi.org/10.1002/9783433604090>.