**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN**

**MORTEROS CON PROPIEDADES MEJORADAS
DE DUCTILIDAD POR ADICIÓN DE FIBRAS DE
VIDRIO, CARBONO Y BASALTO**

TESIS DOCTORAL

ARTURO BUSTOS GARCÍA
Ingeniero de Edificación

Madrid, 2018

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN**

TESIS DOCTORAL

**MORTEROS CON PROPIEDADES MEJORADAS
DE DUCTILIDAD POR ADICIÓN DE FIBRAS DE
VIDRIO, CARBONO Y BASALTO**

ARTURO BUSTOS GARCÍA

Ingeniero de Edificación

Directores

FRANCISCO GONZALEZ YUNTA

Doctor Arquitecto Técnico

ALFONSO COBO ESCAMILLA

Doctor Ingeniero Industrial

Madrid, 2018

TESIS DOCTORAL

**MORTEROS CON PROPIEDADES MEJORADAS DE DUCTILIDAD POR ADICIÓN
DE FIBRAS DE VIDRIO, CARBONO Y BASALTO**

Autor

Arturo Bustos García

Directores

Francisco González Yunta

Alfonso Cobo Escamilla

Tribunal nombrado por el Magfco. Y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día de de 2018.

- Presidente
- Vocal
- Vocal
- Vocal
- Secretario

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día de de 2018 en la Escuela Técnica Superior de Edificación.

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis doctoral no hubiera sido posible sin la generosidad de muchas personas que han contribuido en el desarrollo de la misma aportando medios, conocimiento, experiencia y apoyo.

A mis directores de tesis, Dr. Francisco González Yunta y Dr. Alfonso Cobo Escamilla, por la dedicación y apoyo que han brindado a este trabajo, por el respeto a mis sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que han facilitado a las mismas. Gracias por la confianza ofrecida desde que llegué a esta escuela.

A Santiago Villa Ortega, por su ayuda en la realización de los ensayos, por el tiempo dedicado, por estar siempre para echar una mano y por supuesto, por los “buenos momentos” de laboratorio.

Al todo el personal de laboratorio de la Vilnius Gediminas Technical University por hacerme sentir como en casa.

A mis antiguos profesores de la Universidad Politécnica de Cuenca, Dr. Juan Remigio Coloma Santamaría y Dr. David Sanz Martínez, por inculcarme el espíritu científico e investigador.

A Yaiza por su inestimable ayuda durante la última etapa de esta tesis.

A mis padres y hermano por ser los pilares fundamentales en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida. Por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

A todos, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.

RESUMEN

El paulatino envejecimiento del parque edificado español, unido al gran patrimonio arquitectónico existente, origina la necesidad de estudios encaminados a su conservación y restauración. De forma más específica, resulta fundamental la búsqueda de materiales con propiedades mejoradas para su empleo en la rehabilitación de estas construcciones.

En intervenciones sobre edificios históricos, uno de los materiales de reparación más utilizado es el mortero de cemento Portland. El empleo de adiciones ha permitido, además, modificar y mejorar sus características físico-mecánicas, así como su durabilidad. No obstante, el uso de morteros de cemento ha originado, en ocasiones, la aparición de lesiones en los edificios debido a su incompatibilidad con los materiales existentes.

Las inconveniencias presentadas por el uso de morteros de cemento han derivado en un creciente interés en el empleo de morteros de cal aérea, al considerarse materiales más adecuados en intervenciones sobre fábricas históricas. Sin embargo, dichos morteros presentan limitaciones como, por ejemplo, su escasa resistencia mecánica a corto plazo y la dificultad de carbonatación del conglomerante en determinadas circunstancias. Por esta razón, se ha intensificado el uso de cal hidráulica en intervenciones de edificios pertenecientes al patrimonio histórico, por tratarse de un material “puente” entre la cal aérea y el cemento Portland.

El principal inconveniente de los morteros, tanto de los de cemento como de los de cal hidráulica, es su comportamiento relativamente frágil cuando están sometidos a sollicitaciones mecánicas. Su baja capacidad de absorción de energía supone un problema en determinadas situaciones. Por ejemplo, en caso de sismo, se puede producir con relativa facilidad la rotura y el desprendimiento del revestimiento. En este contexto, la adición de fibras a la matriz conglomerante contribuye a mejorar sus propiedades mecánicas y su comportamiento post-fisuración.

La investigación desarrollada en esta tesis doctoral tiene como objetivo contribuir al conocimiento del comportamiento de los morteros de cemento y de cal hidráulica con adición de fibras. Se ha evaluado la influencia de la incorporación de distintas cantidades de fibras de vidrio, carbono y basalto en las propiedades de los morteros, haciendo especial hincapié en el análisis de la capacidad de absorción de energía de estos materiales.

Se ha llevado a cabo una extensa campaña experimental dividida en tres fases. En primer lugar, se evaluó la influencia de diferentes cantidades de fibras sobre las propiedades de los morteros (en estado fresco y endurecido), estableciendo el porcentaje óptimo que proporcionaba los mejores resultados. En la segunda fase, se determinaron las resistencias mecánicas de los morteros con fibras seleccionados

teniendo en cuenta la influencia de la geometría de las probetas. Además, se realizaron ensayos adicionales sobre dichos morteros (resistencia a tracción indirecta, resistencia a impacto, etc.). En la tercera fase, se evaluó el comportamiento a largo plazo del material mediante ensayos de envejecimiento acelerado.

Los resultados muestran una notable mejora en el comportamiento mecánico de los morteros cuando se añaden fibras. En particular, es destacable el aumento de la capacidad de absorción de energía de estos materiales. Mediante los ensayos, se ha puesto de manifiesto la influencia de la naturaleza y la cantidad de fibra añadida y de la geometría de la probeta empleada en los resultados obtenidos. También se ha demostrado el buen comportamiento de los morteros con fibras a largo plazo.

Finalmente, y de forma complementaria, se ha estudiado el comportamiento a cortante de muros de fábrica reforzados mediante revestimiento de mortero con fibras. Para fabricar los muros se han utilizado ladrillos macizos y mortero de juntas de baja resistencia con el objeto de emular las construcciones de mampostería en edificios antiguos. Se diseñaron diferentes recubrimientos de morteros con fibras con el propósito de comprobar su eficacia para confinar el muro sometido a carga de compresión diagonal. Los resultados demuestran la viabilidad de estos morteros como refuerzo, mejorando la resistencia al corte, aumentando la capacidad de deformación, evitando la rotura frágil y por lo tanto evitando el desprendimiento de fragmentos.

ABSTRACT

The gradual ageing of building stock in Spain, together with its great existing architectural heritage, has resulted in the need for studies to be carried out with a view to its conservation and restoration. More specifically, the search for materials with enhanced properties for its use in the restoration of these constructions is fundamental.

In interventions on historical buildings, one of the repair materials most commonly used is Portland cement mortar. Furthermore, the use of additions has altered and enhanced its physical-mechanical properties, as well as its durability. However, the use of cement mortars has occasionally led to the appearance of damages on buildings due to their incompatibility with the existing materials.

The problems associated with the use of cement mortars have stimulated a growing interest in the use of aerial lime mortars, as they are considered more suitable for use on historical structures. However, these mortars have limitations, such as their limited mechanical resistance in the short-term and the difficulty in carbonating the conglomerant under certain conditions. For this reason, the use of hydraulic lime has increased in interventions in buildings that are part of Spain's historical heritage, as it is a "bridging" material between aerial lime and Portland cement.

The main disadvantage of mortars (whether made from cement or from hydraulic lime) is that they are relatively brittle when subject to mechanical loads. Under certain conditions, their limited energy absorption capacity can be a problem. In the event of an earthquake, for example, the rendering can break up and come loose with relative ease. In this context, the addition of fibres to the matrix binder helps improving its mechanical properties and post-fissure behaviour.

The aim of the research outlined in this doctoral dissertation is to contribute to the knowledge of the behaviour of cement and hydraulic lime mortars when reinforced with fibres. The influence of the addition of different amounts of glass, carbon and basalt fibres on the properties of mortars has been assessed, with special emphasis on the analysis of the energy absorption capacity of these materials.

An extensive experimental campaign has been conducted, divided into three phases. First of all, the influence of different amounts of fibres on the properties of mortars (when fresh and hardened) was assessed and the optimal percentage that provided the best results was determined. In the second phase of the campaign the mechanical resistance of the mortars with fibres selected was determined, taking the influence of the geometry of the cylinders into account. Additional tests were conducted on these mortars (resistance to indirect traction, impact resistance, etc.). In the third phase, the long-term behaviour of the material was assessed by way of accelerated ageing tests.

The results show a significant improvement in mortars' mechanical behaviour when fibres are added. In particular, there is a significant increase in the energy absorption capacity of these materials. Tests have revealed the influence of the nature and quantity of fibre added and of the geometry of the cylinder used on the results obtained. Fibre-reinforced mortars have also been shown to perform well in the long-term.

Finally, and as a complement to the above, research has been conducted into the shear behaviour of masonry walls reinforced with rendering made from fibre-reinforced mortars. To produce the walls, solid bricks and low-resistance mortar joints have been used to emulate the masonry constructions used in old buildings. Different fibre-reinforced mortar coatings were designed to test their effectiveness in confining the wall subject to diagonal compression load. The results show the viability of these mortars as reinforcement, improving the shear resistance, increasing the deformation capacity, preventing its fragile break and, as a result, preventing fragments from coming loose.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1	Introducción	3
1.2	Objetivos	8
1.2.1	Objetivo principal.....	8
1.2.2	Objetivos complementarios	8
1.3	Metodología y organización de la tesis doctoral	8
2	ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	11
2.1	Revisión histórica de los morteros.....	13
2.2	Morteros reforzados con fibras.....	15
2.2.1	Revisión histórica de los morteros reforzados con fibras.....	15
2.2.2	Influencia de las fibras en el comportamiento mecánico del mortero..	16
2.2.2.1	Influencia sobre los morteros de cemento	16
2.2.2.2	Influencia sobre los morteros de cal hidráulica	21
2.3	Tipos de fibras.....	23
2.4	Orientación y dispersión de las fibras	24
2.5	Interacción fibra-matriz.....	25
2.6	Muros de fábrica	26
2.6.1	Componentes y comportamiento de la fábrica	26
2.6.2	Obra de fábrica como material compuesto	28
2.6.3	Comportamiento bajo cargas estáticas	28
2.6.4	Comportamiento bajo cargas dinámicas	30
2.6.5	Refuerzos de muros.....	31
2.6.5.1	Inyección de mortero y epoxi.....	31
2.6.5.2	Refuerzo externo.....	32
2.6.5.3	Confinamiento de fábrica mediante pilares de hormigón armado .	32
2.6.5.4	Postesado	33
2.6.5.5	Técnica del núcleo central.....	33
2.6.5.6	Tratamiento de superficies	34
3	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....	37
3.1	Cemento	40
3.1.1	Elección del tipo de cemento	40

3.1.2	Características según el fabricante	41
3.1.3	Caracterización física.....	43
3.1.3.1	Densidad real del cemento.....	43
3.1.4	Caracterización química.....	43
3.2	Cal	44
3.2.1	Elección del tipo de cal	44
3.2.2	Características según el fabricante	46
3.2.3	Caracterización física.....	47
3.2.3.1	Densidad real de la cal.....	47
3.2.4	Caracterización química.....	47
3.3	Árido	47
3.3.1	Caracterización física.....	48
3.3.1.1	Granulometría y finos	48
3.3.1.2	Equivalente de arena	50
3.3.1.3	Densidad aparente de la arena	52
3.3.1.4	Densidad de partículas de la arena.....	52
3.3.1.5	Porosidad de la arena	53
3.3.1.6	Resumen de resultados de las propiedades físicas de la arena ...	54
3.3.2	Caracterización química.....	54
3.4	Agua	55
3.5	Fibra de vidrio	56
3.5.1	Composición de la fibra de vidrio	57
3.5.2	Propiedades de la fibra de vidrio	57
3.6	Fibra de carbono	58
3.6.1	Composición de la fibra de carbono	59
3.6.2	Propiedades de la fibra de carbono.....	59
3.7	Fibra de basalto	60
3.7.1	Composición de la fibra de basalto	61
3.7.2	Propiedades de la fibra de basalto	61
3.8	Aditivos	62
3.9	Ladrillo	64
3.9.1	Succión o tasa inicial de absorción de agua por capilaridad.....	65
3.9.2	Resistencia a compresión	66

3.9.3	Características según el fabricante	68
4	CARACTERIZACIÓN DE LOS MORTEROS.....	69
4.1	Diseño de morteros.....	72
4.1.1	Morteros de referencia	72
4.1.2	Morteros con adición de fibras.	74
4.1.3	Procedimiento de amasado.....	74
4.1.4	Fabricación de las probetas	76
4.1.5	Designación de los morteros en la investigación.....	77
4.1.6	Estados del mortero y propiedades a ensayar	77
4.2	Propiedades físicas del mortero en estado fresco	78
4.2.1	Consistencia	79
4.2.2	Densidad aparente.....	81
4.2.3	Contenido de aire ocluido en el mortero fresco	83
4.3	Propiedades físicas del mortero endurecido.....	87
4.3.1	Densidad aparente.....	87
4.3.2	Absorción de agua por capilaridad	91
4.4	Propiedades mecánicas del mortero en estado endurecido	95
4.4.1	Resistencia a flexión	96
4.4.2	Capacidad de absorción de energía a flexión.....	99
4.4.3	Resistencia a compresión	110
4.4.4	Capacidad de absorción de energía a compresión.....	116
4.4.5	Módulo de elasticidad	131
4.5	Recopilación de la discusión de resultados del capítulo	133
5	CARACTERIZACIÓN DE LOS MORTEROS CON MEJORES PROPIEDADES MECANICAS.....	135
5.1	Elección de la cantidad de fibras en los morteros.....	137
5.1.1	Dosificación.....	138
5.1.2	Protocolo de amasado	138
5.1.3	Fabricación de las probetas	139
5.2	Ensayos	142
5.2.1	Resistencia a flexión en función de la geometría de la probeta.....	142
5.2.2	Capacidad de absorción de energía a flexión en función de la geometría de la probeta	144

5.2.3	Resistencia a compresión en función de la geometría de la probeta	152
5.2.4	Capacidad de absorción de energía a compresión en función de la geometría de la probeta	155
5.2.5	Módulo de Young	170
5.2.6	Velocidad de impulsos ultrasónicos	172
5.2.7	Resistencia a tracción indirecta.....	175
5.2.8	Resistencia a impacto	179
5.2.9	Resistencia a la adhesión	182
5.2.10	Retracción.....	186
5.3	Microscopía electrónica de barrido (MEB).....	189
5.4	Recopilación de la discusión de resultados del capítulo	196
6	DURABILIDAD DE LOS MORTEROS.....	199
6.1	Heladicidad	201
6.2	Cristalización de sales.....	204
6.3	Choque térmico.....	206
6.4	Propiedades mecánicas después de los ensayos de envejecimiento acelerado	208
6.4.1	Resistencia a flexión	208
6.4.2	Capacidad de absorción de energía a flexión.....	212
6.4.3	Resistencia a compresión	220
6.4.4	Capacidad de absorción de energía a compresión.....	222
6.5	Recopilación de la discusión de resultados del capítulo	230
7	MORTEROS COMO REFUERZO DE MUROS DE FÁBRICA DE LADRILLO	233
7.1	Elaboración de los especímenes de ensayo	237
7.1.1	Amasado.....	237
7.1.2	Fabricación de los muros de fábrica.....	238
7.1.3	Aplicación del revestimiento.....	238
7.2	Ensayos preliminares sobre materiales.....	239
7.2.1	Ladrillos	239
7.2.2	Mortero	239
7.2.2.1	Resistencia a flexión y compresión	239
7.2.2.2	Energía de fractura	240
7.2.2.3	Resistencia a la adhesión	241

7.2.3	Fábrica de ladrillo	242
7.2.3.1	Resistencia a compresión uniaxial y módulo de Young	242
7.2.3.2	Resistencia al corte	244
7.2.4	Resumen de resultados de los ensayos previos	245
7.3	Condiciones del ensayo	246
7.4	Interpretación del ensayo de compresión diagonal.....	247
7.5	Resultados	248
7.6	Recopilación de la discusión de resultados del capítulo	254
8	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	257
8.1	Conclusiones	259
8.2	Futuras líneas de investigación	261
9	CONCLUSIONS AND FUTURE LINES OF RESEARCH	263
9.1	Conclusions	265
9.2	Future lines of research.....	267
10	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	269
ANEXOS		
	Índice de figuras	
	Índice de tablas	

1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La problemática existente en el sector de la construcción en lo relativo al envejecimiento del parque edificado origina la necesidad de estudios referentes a materiales con propiedades mejoradas que puedan utilizarse en la rehabilitación de estos edificios. A esto hay que unir el gran patrimonio arquitectónico español y la necesidad de la sociedad de conservarlo y restaurarlo.

La Directiva 2012/27 de Eficiencia Energética [1], dispone en su artículo 4, que los Estados miembros establecerán una estrategia a largo plazo para movilizar inversiones en la renovación del parque nacional de edificios residenciales y comerciales, tanto público como privado.

Dicho artículo considera imprescindible fijar y definir políticas gubernamentales mediante la implantación de un Plan Estratégico para la rehabilitación y la eficiencia energética que:

- Asegure un porcentaje de rehabilitación anual mínimo.
- Permita evaluar de manera crítica las experiencias consolidadas y proponer una nueva estrategia a medio y largo plazo, que active la intervención en todos los espacios de naturaleza urbana.
- Fije de manera clara los objetivos prestacionales de calidad a alcanzar (accesibilidad, conservación, etc.) y agilice económicamente la intervención en rehabilitación.
- Oriente las políticas de rehabilitación y regeneración urbana hacia un enfoque integral en el que se establezcan las prioridades de intervención y se incentive la actuación de los elementos comunes.
- Considere todas las tipologías de edificios, tanto públicos como privados.

En el caso concreto de España hay 9.814.785 edificios, de los cuales 9.730.999 se destinan principal o exclusivamente a vivienda y los 83.786 restantes a otros fines. Los 9.730.999 edificios destinados principal o exclusivamente a viviendas se traducen en aproximadamente 25.382.415 viviendas, de las cuales 18.083.690 son hogares o viviendas principales (según datos del INE y del Ministerio de Fomento de 2012).

Si se atiende a su estado de conservación, casi el 2% de los edificios españoles se encuentra en estado de conservación ruinoso y el 7,6% en estado deficiente. Lo que significa que existen 963.326 edificios (1.915.804 inmuebles) que deberían acometer obras de rehabilitación integral. En la tabla 1.1 se muestra el estado de conservación del parque edificado español.

Estado de conservación	Edificios	Inmuebles
Ruinoso	55.187	95.845
Malo	171.588	303.963
Deficiente	736.551	1.515.996
Bueno	8.767.673	23.933.534
Total	9.730.999	25.849.338

Tabla 1.1. Estado de conservación del parque edificado español. Fuente: INE [2].

Según datos del INE, el 4,59% de los edificios existentes se construyó conforme al Código Técnico de la Edificación de 2007, el 39,1% se construyó conforme a la normativa básica de 1979 y el 56,31% restante se construyó sin seguir ninguna normativa mínima de ahorro de energía. Esto hace un total de 9.287.505 edificios que, de no haber acometido obras de rehabilitación, no cumplen las exigencias básicas de ahorro de energía. En la tabla 1.2 aparecen reflejados los datos de la antigüedad del parque edificado español.

Antigüedad de los edificios	Número de edificios
Más de 50 años	2.935.932
Entre 30 y 49 años	2.547.141
Entre 6 y 29 años	3.804.432
Menos de 6 años	443.494
Total	9.730.999

Tabla 1.2. Antigüedad del parque edificado español. Fuente: INE [2].

Por último, como muestra la tabla 1.3, existen 5.412.000 edificios de viviendas de dos o más plantas sobre rasante (más del 55%) que tienen problemas de accesibilidad.

Plantas	Edificios	Accesible (%)
1	2.798.479	25,73
2	4.968.850	21,53
3	1.096.644	15,55
4	338.063	24,48
5	233.392	29,70
6	124.420	37,64
7	62.859	46,96
8	40.429	48,38
9	21.819	56,77
10 o mas	36.044	59,97
Total	9.730.999	23,09

Tabla 1.3. Accesibilidad del parque edificado español. Fuente: INE [2].

Queda por tanto explicitado la necesidad de intervenir en nuestro parque edificado por razones funcionales o estructurales, mejorando de este modo las condiciones de confort, accesibilidad y eficiencia energética, entre otras.

En estas intervenciones, uno de los materiales más utilizados actualmente es el mortero de cemento Portland debido a sus buenas características intrínsecas y a la posibilidad de optimizarlo. Las adiciones realizadas al mortero permiten modificar y mejorar sus características físico-mecánicas, así como su durabilidad, permitiendo su adaptación a las necesidades requeridas en cada intervención.

Siguiendo con lo expuesto anteriormente, España cuenta con un amplio patrimonio cultural arquitectónico, siendo la protección y el enriquecimiento de los bienes que lo integran, obligaciones fundamentales que vinculan a todos los poderes públicos, tal y como señala la Ley de Patrimonio Histórico Español [3]. No obstante, parte del patrimonio se encuentra en un estado de conservación deficiente, malo o ruinoso.

En lo que respecta a los criterios de actuación a la hora de intervenir en edificios de patrimonio, además de la filosofía subyacente marcada por una diferenciación de escuelas y estilos de actuación, hay una compleja legislación a nivel nacional e internacional que regula y enmarca las actuaciones. La Carta Internacional de Venecia [4] en su artículo IX expresa que: *“La restauración de un monumento [...] es una operación que debe guardar un carácter excepcional. Tiene como finalidad asegurar su conservación y revelar o restituir su valor y cualidades estéticas o históricas. Se fundamenta en el conocimiento profundo del monumento [...] así como de la cultura y técnicas que le son relevantes. La restauración se funda en el respeto hacia la substancia original o antigua del monumento [...] y sobre los documentos auténticos que le conciernen”*. De acuerdo con este documento, las intervenciones se deben regir por los siguientes criterios:

- Singularidad de cada restauración y necesidad de un estudio previo.
- Prevalencia de la conservación preventiva sobre la restauración.
- Evitar la “creación” en la restauración: no se debe dejar la huella del arquitecto o ingeniero como artista.
- Respeto a todas las épocas del monumento.
- La sustitución de elementos debe realizarse solamente cuando sea imprescindible y lo retirado debe conservarse e incluso exponerse en el mismo edificio.
- Toda intervención debe quedar reflejada en un documento o informe exhaustivo.
- Los cambios de uso deben ser estudiados y acordes con los espacios para evitar transformaciones agresivas.
- Mantenimiento de la pátina evitando técnicas agresivas.

- Las restauraciones e intervenciones deben ser mínimas.
- Las actuaciones y materiales deben ser reversibles.
- Las anastilosis son aceptadas exclusivamente para recolocar materiales desprendidos y/o favorecer la conservación.
- Los materiales empleados deben ser similares a los originales.

Atendiendo a estos criterios, la elección del mortero a utilizar en una intervención se debe asentar en los principios básicos de la conservación: reversibilidad, mínima intervención, durabilidad y compatibilidad química, física y mecánica con los materiales originales [5,6].

En este sentido, el uso de morteros de cemento Portland en intervenciones históricas ha demostrado ser contraproducente debido a los procesos patológicos que se desarrollan. Esta incompatibilidad tiene su origen principalmente en su elevada resistencia mecánica en comparación con la del material base, en la formación de gran cantidad de sales solubles por la migración de iones alcalinos, cuya cristalización y aumento de volumen, provoca tensiones y eflorescencias, y en la retención excesiva de agua debido a la baja permeabilidad de estos morteros [7].

El sector de la construcción fue tomando conciencia de los problemas expuestos anteriormente y, por ello, pasó a considerar, a los morteros de cal aérea como los materiales más adecuados para la intervención en fábricas históricas. Sin embargo, dichos morteros presentan grandes limitaciones como, por ejemplo, las escasas resistencias a corto plazo y la dificultad de carbonatación de la argamasa en ciertas circunstancias [8]. Por esta razón, se ha intensificado el uso de cal hidráulica en intervenciones de edificios pertenecientes a patrimonio. Estos morteros se situarían en un plano intermedio entre los morteros de cemento Portland y los morteros anteriores al siglo XIX, al mostrar una mayor compatibilidad física, química y mecánica con los materiales utilizados de forma habitual en estas construcciones [9].

El principal inconveniente de los morteros, tanto los de cemento como los de cal hidráulica, es su comportamiento poco dúctil cuando están sometidos a sollicitaciones mecánicas. La escasa capacidad de deformación y de absorción de energía supone un problema en determinadas situaciones. A modo de ejemplo, en caso de sismo, se pueden producir desprendimientos del mortero de recubrimiento en fragmentos, poniendo en riesgo la seguridad de las personas. Los recientes terremotos registrados en el Sur de Europa (Lorca, 2011; Ban, 2011; Emilia, 2012; Amatrice, 2016) han puesto de manifiesto la alta vulnerabilidad de las edificaciones existentes, al estar diseñadas y construidas con materiales cuasi-frágiles.

Por este motivo, en los últimos años, la importancia de la capacidad de absorción de energía de los materiales se ha incrementado, dando lugar al aumento de trabajos de investigación en esta área y a su posterior aplicación en el campo de la construcción. El aumento de la ductilidad proporciona mayor seguridad al permitir

mayores deformaciones y aumentar la resistencia de la estructura frente al colapso. La ductilidad de los morteros puede mejorarse con la incorporación, en su matriz, de fibras de pequeña longitud y sección. Éstas aumentan la resistencia ante la propagación de fisuras, mejoran la capacidad de absorción de energía y de deformación, mostrando, por lo tanto, una mejor ductilidad y un mejor comportamiento post-fisuración.

Con estos antecedentes, se ha considerado de gran utilidad la realización de un estudio exhaustivo sobre las características de morteros de cemento y de cal hidráulica con adición de fibras, poniendo especial interés en la ductilidad que aportan a estos materiales. Para este fin, se ha analizado su capacidad de absorción de energía, aplicando los conceptos de: energía absorbida e índices de tenacidad. Adicionalmente, para definir completamente el material se han realizado todos los ensayos que marca la normativa, tanto en estado fresco como en endurecido.

Se han utilizado como variables, el tipo y cantidad de fibra adicionada y la tipología de la probeta. La elección de las fibras está motivada por sus características intrínsecas. Las fibras de vidrio presentan una baja resistencia y un bajo módulo de elasticidad, las de carbono tienen una alta resistencia y un alto módulo de elasticidad y las de basalto muestran una baja resistencia y un alto módulo de elasticidad. Los porcentajes de fibra empleados tienen como finalidad encontrar la cantidad que produce una mayor mejora en la capacidad de absorción de energía. Mientras que las distintas probetas planteadas tienen como objeto determinar la influencia de variables geométricas de la probeta tales como la relación ancho/canto, tamaño o esbeltez en el comportamiento post-fisuración del material.

De forma complementaria, se ha estudiado el comportamiento a cortante de muros de fábrica reforzados mediante revestimiento de mortero con fibras. Para fabricar los muros se han utilizado ladrillos macizos y mortero de juntas de baja resistencia con el objeto de emular las construcciones de mampostería en edificios antiguos. Se diseñaron diferentes recubrimientos de morteros con fibras con el fin de comprobar su eficacia para confinar el muro sometido a carga de compresión diagonal. Se evaluó el rendimiento de la fábrica en términos de resistencia al corte y capacidad de deformación.

Por último, mediante esta investigación, se ha pretendido profundizar en el estudio de morteros con fibras, no solo aportando datos experimentales, sino que también se ha considerado imprescindible ahondar en las investigaciones existentes. De esta forma, la investigación bibliográfica facilita la comprensión y justificación de los datos obtenidos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo principal

El objetivo principal de este estudio es evaluar la influencia que produce la incorporación de distintos tipos de fibras (vidrio, carbono y basalto) en las propiedades físicas y mecánicas de morteros de cemento y de cal hidráulica, poniendo especial interés en el análisis de la capacidad de absorción de energía de estos materiales.

1.2.2 Objetivos complementarios

Para la consecución del objetivo principal, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar el efecto del tipo y de la cantidad de fibra añadida en las propiedades físicas y mecánicas de los morteros, tanto en estado fresco como endurecido.
- Determinar la ductilidad de los morteros con fibras analizando exhaustivamente la capacidad de absorción de energía, cuantificada mediante parámetros de absorción de energía e índices de tenacidad.
- Comprobar la influencia de la geometría de la probeta en las resistencias mecánicas y el comportamiento post-fisuración de los morteros.
- Explicar el comportamiento macroestructural de los morteros con fibras analizando las superficies de fractura mediante microscopía electrónica de barrido (BSE).
- Examinar la durabilidad de los morteros con fibras mediante ensayos de envejecimiento acelerado, con el fin de precisar si preservarán sus características a lo largo de su vida útil.
- Estudiar el comportamiento de muros de fábrica de ladrillo reforzados mediante recubrimientos de mortero de bajo espesor sometidos a esfuerzos de compresión diagonal.

1.3 Metodología y organización de la tesis doctoral

Para poder desarrollar los objetivos planteados, la tesis se articula en torno a ocho capítulos estructurados de la siguiente manera:

En el **primer capítulo** se realiza una breve introducción describiendo las motivaciones que han derivado en la realización de este estudio. También se plantean los objetivos a desarrollar.

El **segundo capítulo** aborda los distintos aspectos relacionados con el uso de morteros con fibras. Se ha establecido un estado del conocimiento a partir de la investigación bibliográfica, destacando contenidos referentes a:

- Antecedentes y evolución de los morteros de cemento y cal hidráulica con adición de fibras de vidrio, carbono y basalto.
- Influencia de la orientación, dispersión e interacción con la matriz de las fibras sobre el comportamiento mecánico de los morteros.
- Técnicas de refuerzo de fábricas de ladrillo y criterios de rotura.

En el **tercer capítulo** se describen y caracterizan las materias primas empleadas en el estudio, mediante la realización de ensayos o el análisis de la información suministrada por el fabricante.

Los capítulos cuarto, quinto, sexto y séptimo muestran los resultados de cada una de las fases del estudio experimental, así como la discusión de estos. Para determinar las propiedades de los morteros se han seguido las normas UNE-EN aplicables a los morteros para albañilería, y a falta de normativa concreta, se han utilizado aquéllas que se refieren a materiales similares como el hormigón o la piedra natural.

- En el **cuarto capítulo** se estudia la influencia de la cantidad de fibras sobre las propiedades de los morteros, tanto en estado fresco como en endurecido. Se busca discernir el porcentaje de fibras que mejora en mayor medida las características mecánicas de los morteros.
- En el **capítulo quinto**, determinada la proporción de fibras óptima, se aborda la caracterización del material desde otras perspectivas. Se analizan las características mecánicas utilizando distintas tipologías de probetas y se ultima el estudio caracterizando completamente el material.
- En el **capítulo sexto** se estudia el comportamiento a largo plazo del material realizando ensayos de envejecimiento acelerado sobre los morteros con mejores propiedades.
- En el **séptimo capítulo** se presentan y discuten los resultados de los ensayos de compresión diagonal sobre muros de fábrica reforzados mediante recubrimientos de morteros con fibras. Este capítulo fue elaborado tras una estancia doctoral realizada en la Vilnius Gediminas Technical University (Lituania).

Finalmente, en el **octavo capítulo** se exponen las conclusiones más relevantes que se derivan de la investigación realizada y se proponen futuras líneas de investigación con el fin de profundizar y completar el estudio iniciado en la presente tesis doctoral.

2

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Se ha realizado una breve descripción de las diferentes campañas experimentales realizadas sobre la influencia de las fibras en morteros de cemento y cal hidráulica. Igualmente, se abordan los tipos de fibras disponibles y la influencia de la orientación y dispersión de éstas en la matriz. También se analizan los muros de fábrica, detallando las propiedades de sus elementos constituyentes, así como los diferentes mecanismos de rotura publicados. Finalmente se hace una breve descripción de los métodos de refuerzo de estructuras de fábricas disponibles en la literatura. Estos estudios han servido para la calibración y validación del desarrollo de la investigación.

2.1 Revisión histórica de los morteros

Los primeros vestigios de morteros se encuentran en la prehistoria. Malinowski [10] encontró, en la ciudad de Jericó, casas de ladrillo con suelos hechos con mortero de cal que se remontaban al año 7000 a.C. Un estudio posterior [11] halló en Nepalí Çori (Turquía) restos de utilización de mortero de cal en pavimentos, que datan del 10.000 al 8.000 a. C. Frierman y Gourdin et al. [12,13] afirman que la calcinación de la caliza durante el período neolítico fue la primera aplicación del fuego para la consecución de objetivos concretos.

Los egipcios usaron por primera vez morteros de yeso en el año 2600 a. C. para el recibido de los bloques de la pirámide de Keops [14]. Este tipo de morteros fue empleado casi exclusivamente por los egipcios [15-17], aunque otros investigadores han hallado pruebas de su uso en las paredes del Palacio de Mycenae (Grecia) y en el fondeadero de Kition (Chipre) [18].

Los griegos conocían los morteros de cal desde épocas remotas, heredando los conocimientos de los fenicios. No obstante, la utilización del mortero de cal en Grecia para la construcción de muros data de finales del siglo II o principio del siglo I a. C (casas de Délos y de Thèra) [19]. Anteriormente utilizaban, como ligante, mortero de tierra y de arcilla.

Los helenos fueron los primeros en añadir aditivos para conseguir morteros más estables y resistentes. En Thèra, se introducía en la mezcla cal-arena polvo volcánico o "Tierra de Santorin", obtenida en la isla. Así se conseguían morteros estables al agua y puede considerarse que éste es el origen de los morteros hidráulicos modernos [20].

Los romanos mejoraron el procedimiento de fabricación de la cal y la aplicación del mortero. Denominaron al mortero de cal "*opuscaementitium*" que aparece en construcciones como el Panteón, el Coliseo y acueductos como el de Segovia o Cesárea [21].

Los romanos también heredaron y mejoraron de los griegos el uso de adiciones en las mezclas para mejorar las características del mortero. Estas adiciones podían ser;

cenizas volcánicas, la teja triturada, tierra cocida, etc. De especial mención, es la puzolana (roca volcánica proveniente de los yacimientos descubiertos en Pozzuoli cerca de Nápoles), que confiere al mortero, propiedades hidráulicas. En otros lugares se emplearon otro tipo de sustancias, "puzolanas artificiales", con similares resultados [22,23].

Existen pruebas de la gran calidad alcanzada por los morteros romanos. Estudios comparativos con morteros actuales muestran un deterioro mucho menor de los morteros romanos. La gran consistencia y durabilidad de los morteros romanos es citada por un gran número de autores [24,25]. La calidad de estos morteros se debe a la cuidadosa elección de los materiales, a la adecuada proporción de las mezclas, a la correcta cocción y apagado de la cal, al uso de aditivos como caseína, albúmina y aceites y especialmente a una cuidadosa aplicación [26].

Desde la caída del Imperio Romano no se aprecia ningún progreso técnico de los morteros de cal. Los morteros de este periodo varían de un lugar geográfico a otro. Las construcciones de esta época son transitorias, por ello, los materiales empleados son de baja calidad, frágiles, poco homogéneos y mal aplicados. El descenso de la calidad se debe a la pérdida de los procedimientos romanos en la fabricación de la cal, en su selección, cocción y extinción. También a la inadecuada proporción de mezclas del ligante/árido y a la falta de homogeneidad. Es a partir del siglo XII cuando las mezclas adquieren mayor calidad, son más homogéneas, las cales mejores seleccionadas y se incorporan aditivos orgánicos tales como albumina de huevo, goma arábica, azúcar, cerveza, para mejorar la calidad del mortero [27].

En 1756 Smeaton, encargado de la construcción del faro de Eddyston (Plymouth), empleó calizas con cierto contenido en arcillas obteniendo el primer ligante hidráulico moderno. Vicat, en 1812, estudia las mezclas de calizas puras y de arcillas, y demuestra que las propiedades hidráulicas dependen de los compuestos que se forman durante la cocción entre la cal y los constituyentes de la arcilla. Por la acción del calor, hay primero una deshidratación de la arcilla, luego una descomposición de la caliza y por fin la combinación entre la cal, la sílice y los óxidos de hierro y aluminio, originando algunos silicatos de calcio hidratados. Según el contenido en arcilla, la temperatura y el tiempo de cocción, la reacción es más o menos completa y los productos obtenidos más o menos hidráulicos [14].

En 1811, James Frost patenta un cemento artificial obtenido por calcinación lenta de caliza molida y arcilla. Joseph Apsdin, patenta en 1824 un cemento "tan duro como la piedra Portland", dando origen al primer tipo de cemento Portland. Como se empleaban temperaturas bajas, la calidad del cemento era baja [28]. En la Exposición Universal de 1851, se presentaron los nuevos métodos de preparación del cemento. El molido de la cal y la arcilla en un molino húmedo y la calcinación de la mezcla a temperaturas entre 1300° y 1500° C.

Desde el final del siglo XIX, los principios generales de la fabricación del cemento Portland no han cambiado apenas. No obstante, se ha producido una evolución técnica y científica en la preparación de conglomerantes aplicables a situaciones muy específicas. Esto ha abierto un enorme campo de investigación de estos materiales.

2.2 Morteros reforzados con fibras

El progreso de la industria de la construcción se centra tanto en las técnicas de diseño y cálculo como en el desarrollo de los materiales. La aparición o evolución de nuevos materiales responde a las exigencias que la sociedad plantea a la técnica. Estos materiales pueden ser de nueva concepción o resultado de un perfeccionamiento de las propiedades de materiales ya existentes.

Durante las últimas décadas, los hormigones y morteros han sido ampliamente estudiados y desarrollados por la industria. El uso de distintos tipos de adiciones ha permitido mejorar ampliamente una o varias características del material. Por citar algún ejemplo; los superplastificantes permiten obtener mezclas trabajables reduciendo la relación agua-cemento; el uso de humo de sílice mejora las resistencias y durabilidad; o que el empleo de fibras dispersas aleatoriamente consigue mejorar las resistencias, capacidad de absorción de energía y disminuir la retracción [29].

La adición de fibras al hormigón está siendo exhaustivamente estudiada. El ACI, el ASTM, el US Army Corps of Engineering, la British Standards Institution entre otros, han publicado ya numerosas normas y métodos de experimentación a este respecto, mientras que la adición de fibras a los morteros ha sido y sigue siendo objeto de múltiples investigaciones de numerosos autores en todo el mundo.

2.2.1 Revisión histórica de los morteros reforzados con fibras

El empleo de fibras como un refuerzo de materiales frágiles o quebradizos no es, por tanto, algo reciente, sino que constituye una técnica utilizada desde hace miles de años. Hasta hace unas décadas se utilizaban los pelos de caballo o de cabra para armar el yeso, mientras que el uso de paja para fabricar ladrillos es una técnica ampliamente empleada desde la antigüedad.

Graham, en 1911, utilizó por primera vez fibras de acero para incrementar la resistencia del hormigón, aunque no fue hasta 1920 cuando Griffith publicó el primer estudio científico de estas características. En los años 50 aparecen los primeros morteros de cemento reforzados con fibras de vidrio para sustituir a las armaduras de acero. Romualdi y Batson [30] y Romualdi y Mandel [31], en 1963, aplican por primera vez conocimientos de mecánica de fractura sobre morteros con fibras.

En 1967 el Dr Majumdar del Building Research Establishment, comenzó a investigar vidrios con alto contenido en circonio, después de que se comprobara que la

mejora mecánica de estos materiales se reducía con el tiempo debido al ataque alcalino del cemento Portland [32].

Actualmente, la utilización de fibras de acero, en hormigones; y de vidrio, principalmente en morteros, está ampliamente extendida, usándose también otras fibras sintéticas como las fibras de polipropileno debido a su bajo coste. Otras fibras, como las de carbono, no se utilizan debido principalmente a su alto coste, y las de basalto, aun son unas grandes desconocidas.

2.2.2 Influencia de las fibras en el comportamiento mecánico del mortero

Las propiedades mecánicas, especialmente la ductilidad, son una prioridad que debe de considerarse antes de que los morteros puedan ser utilizados en diferentes aplicaciones. La adición de fibras como refuerzo de morteros ha sido ampliamente estudiada en la última década, siendo aceptada como una forma de mejorar las propiedades mecánicas de dichos materiales, en caso de utilizarse una cantidad de fibras óptima.

2.2.2.1 Influencia sobre los morteros de cemento

Existe en la literatura multitud de publicaciones científicas sobre materiales de base cementicia reforzados mediante la adición de fibras. Como ya se expuso en el apartado anterior, el uso industrial de los morteros con fibras de vidrio se remonta a la década de 1970, después del desarrollo por parte de Pilkington Corporation en 1967 de una formulación adecuada para producir fibras de vidrio con contenido en circonio resistente a los álcalis.

El hormigón o mortero reforzado con fibras de vidrio es comúnmente denominado “GFRC” por sus siglas en inglés (glass fibers reinforced concrete). Mientras que numerosos artículos analizan las resistencias mecánicas [33-38] la capacidad de absorción de energía en rango estático y dinámico ha sido mucho menos estudiada.

Un estudio de referencia en ensayos de ductilidad y de impacto se llevó a cabo por Mobasher y Shah [39]. Utilizaron tres configuraciones de carga: tracción uniaxial, flexión del tercer punto y el impacto instrumentado. Se observó que la energía de fractura es variable según la geometría de la muestra, la geometría de la carga, la longitud de banda utilizada, la velocidad de deformación y el grado de envejecimiento acelerado.

Glinicki et al. [40] estudiaron el impacto en placas de GFRC a través de un dispositivo de caída de peso instrumentado que permitió detectar la carga máxima de impacto, la energía absorbida hasta la carga máxima y la energía absorbida hasta rotura. Obtuvieron un ratio de absorción de energía 1,7-1,8 veces superior a las placas de referencia.

Enfedaque et al. [41] analizaron el comportamiento a impacto disparando esferas de acero a alta velocidad sobre diferentes tipos de paneles y calculando la energía absorbida mediante la diferencia de energía cinética del proyectil antes y después del impacto. Sangeetha [42] estudió el efecto favorable de la adición de superplastificantes sobre la resistencia a impacto.

Yldirim et al. [43] estudiaron el comportamiento a impacto de diferentes hormigones reforzados con fibras incluyendo las fibras de vidrio. El ensayo consistía en el método de caída de peso descrito en la norma ACI 544 2R-89 [44], realizando el ensayo una y otra vez sobre probetas cúbicas con lado 100mm hasta que se producía la rotura. Las fibras de vidrio mostraron ser tan eficaces como las fibras de acero y más eficaces que las fibras de polipropileno para evitar el primer agrietamiento. No obstante, se observó que las muestras reforzadas con fibras de acero necesitaban un número mucho mayor de impactos hasta que se producía la rotura con respecto a las muestras reforzadas con fibras de vidrio y polipropileno, que necesitaban un número similar de impactos para llegar al fallo.

El principal inconveniente de estos materiales es la fragilización observada con el paso del tiempo, que repercute negativamente en la resistencia a tracción y en la capacidad de absorción de energía, convirtiéndose en un material quebradizo. Este fenómeno de “envejecimiento” se ha observado previamente en diferentes estudios [45-47]. Algunos investigadores han señalado la corrosión en las fibras de vidrio, debido al entorno altamente alcalino de la matriz de mortero de cemento, como la principal causa del cambio en las propiedades mecánicas [48]. Se desarrollaron fibras de vidrio resistentes a los álcalis (llamadas fibras de vidrio AR) en un intento de resolver este problema, aunque el envejecimiento todavía se producía. Purnell et al. [49] denominaron a la fragilización como un proceso de fatiga estática.

En los últimos años, la fragilización de los morteros con fibras de vidrio ha sido la línea de investigación más desarrollada. Se han analizado morteros con diferentes adiciones químicas, utilizándose para su fabricación puzolanas artificiales, metacaolín y ciertas resinas acrílicas [50,51]. Se han obtenido resultados prometedores permitiendo el uso estructural del GFRC [52].

Paralelamente, algunos autores han seguido publicando sobre el efecto de las fibras de vidrio en materiales de base cementicia. Chandramouli et al. [53] reportaron un aumento del 20-25% en la resistencia a la compresión y un aumento del 15-20% en la resistencia a la tracción, así como un aumento de la ductilidad. Tendencia similar fue observada por Tassew y Lubell [54], donde la resistencia a flexión, compresión, resistencia a la fractura y ductilidad se incrementó con el aumento de la fracción de fibra independientemente de la composición de la mezcla o la longitud de la fibra.

La comparación de características entre las fibras de vidrio, carbono y basalto nunca se ha llevado a cabo en un artículo científico. Si bien es cierto que Wei et al.

[55] estudiaron las diferencias entre las fibras de vidrio y las de basalto en términos de resistencia al medio ambiente y de rendimiento mecánico. Constataron que las fibras de basalto son, en general, adecuadas para ser utilizadas tanto en medios ácidos y entornos alcalinos, teniendo las fibras de vidrio una resistencia al ácido mucho menor que la mostrada por la fibra de basalto.

Felicetti et al. [56] y Sim et al. [57] investigaron la fibra de basalto como material de refuerzo en estructuras de hormigón y observaron que, además de aumentar la resistencia a tracción y la ductilidad, tiene buena resistencia al ataque químico. No obstante, Sim et al. [57] observaron que también las fibras de basalto son sensibles al ataque alcalino, aunque en un grado menor a las fibras de vidrio.

Zhao et al. [58] estudiaron el comportamiento a impacto de morteros con proporciones de fibras que van desde el 0% al 0,6% mediante equipos de tres puntos. Obtuvieron una mejora de la tracción en todas las proporciones, siendo la de 0,36%, con un resultado 2,2 veces mayor al mortero de referencia, la que mejor resultados obtuvo. A la par, obtuvieron resultados de absorción de energía entre 40% y el 83% superiores a los morteros convencionales.

Zych y Wojciech [59] presentaron los resultados su investigación sobre la resistencia a la flexión y a la compresión de morteros de cemento reforzados con fibra de basalto. Utilizaron fibras de basalto de 5 mm y 12 mm de largo, con una cantidad de 0,4 kg/m³, 1 kg/m³, 2 kg/m³ y ensayaron a 3, 7 y 28 días. Publicaron aumentos de la resistencia a la flexión hasta un 20% y reducciones de la resistencia a la compresión hasta 15%. Las fibras de 12mm arrojaron los mejores resultados, mientras que la influencia del contenido de fibra fue insignificante.

Jiang et al. [60] realizaron un estudio completo para comprobar las propiedades mecánicas del mortero reforzado con fibras de basalto en comparación con los reforzados con fibras de polipropileno. Utilizaron fibras de 2 longitudes, 12mm y 22 mm, y adiciones del 0,1%, 0,3% y 0,5% en volumen. En comparación con el mortero de referencia, los morteros reforzados con fibras de 22mm obtuvieron un aumento de la resistencia a compresión, tracción y flexión de 0,18 a 4,68%, 14,08 a 24,34% y 6,30 a 9,58%. Cuando la longitud de la fibra era de 12 mm, se obtuvo un aumento de las resistencias de 0,55-5,72%, 14,96- 25,51% y el 7,35 a 10,37%, respectivamente. Su conclusión fue que las características mecánicas de los morteros reforzados con fibras de basalto eran superiores a los reforzados con fibra de polipropileno, siendo el porcentaje más adecuado el de 0,3% y la longitud de 22mm.

Kabay [61] estudió el uso de fibras de basalto para la mejora de la resistencia a la fractura del hormigón, junto con la resistencia a la abrasión. Usó adiciones de 2 kg/m³ y 4 kg/m³, lo que correspondería a un 0,07% y 0,14% en volumen. Concluyó, que la energía de fractura aumentaba un 126% y un 140% con el uso de fibras de basalto,

respectivamente. También constató que se producía un aumento en la resistencia a la abrasión de entre un 2% y el 18%.

Ayub et al. [62] investigaron la influencia de la adición de 1, 2 y 3% de fracción de volumen de fibras de basalto en hormigones de alta resistencia. Los resultados experimentales mostraron que la adición de fibras hasta un 2% de volumen junto con adiciones minerales mejoraban la resistencia a la compresión. Obtuvieron una mejora en las deformaciones correspondientes a la resistencia a la compresión máximas, mientras que no hallaron efecto alguno sobre el módulo de elasticidad.

Ipbüker et al. [63] estudiaron mezclas de cemento con fibras de basalto en proporciones del 2% en volumen. Informaron de la mejora de sus propiedades mecánicas en términos de resistencia y ductilidad. Concluyeron que tenía potencial como adición al hormigón pesado, aunque no reducía el blindaje contra los rayos gamma y la radiación de neutrones.

Lipatov et al. [64] utilizaron fibras de basalto con contenidos de circonio más apropiados (usando ZrSiO_4 como fuente de circonio) para mejorar su resistencia al ataque alcalino y, por tanto, mejorar las propiedades mecánicas a largo plazo de los conglomerantes de base cementicia, a través de la reducción de la corrosión de la fibra en la matriz de cemento.

En la última década se han publicado varios artículos donde se compara la influencia de las fibras de vidrio y basalto en morteros y hormigones. Kruszka et al. [65] determinaron las propiedades mecánicas estáticas y dinámicas de morteros de cemento con adición de fibras de vidrio y basalto en porcentajes del 3% y 5%. Reportaron que el contenido de las fibras de vidrio en el mortero no influye en la resistencia a la fractura en condiciones de carga estática. Además, en el rango dinámico, el 5% de contenido de fibra supone una caída significativa de la resistencia. El análisis de la influencia de las fibras de basalto sobre la resistencia a la fractura muestra que el contenido óptimo de este refuerzo es igual al 3% para condiciones de carga estáticas y dinámicas. Un aumento adicional de la proporción de fibra da el efecto opuesto.

Kizilkanat et al. [66] analizaron comparativamente la aplicación de fibras de basalto y de vidrio como refuerzo de fibra en hormigón de alta resistencia. Observaron que no había un efecto significativo sobre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad. La resistencia a fractura del hormigón reforzado con fibra de basalto aumentó con el incremento de la dosificación de fibras, mientras que no se observó un aumento de la resistencia para el reforzado con fibra de vidrio. En una tendencia similar, la resistencia a la flexión se incrementó con el aumento del contenido de fibra de basalto de una manera gradual, pero no se observó tal cambio para las de vidrio después de un contenido de fibra de 0,50%. La ductilidad se elevó significativamente con dosificaciones superiores al 0,25% para las fibras de basalto y de vidrio.

Recientemente, Fenu et al. [67] publicaron un artículo donde se comparaban la resistencia a compresión, flexión y tracción de morteros reforzados con fibras de vidrio y basalto en cantidades del 3% y 5% en peso total de mortero, así como la energía total que podían absorber dichos morteros. Concluyeron que la resistencia a compresión empeoraba con la adición de fibras, obteniendo valores inferiores del orden del 18% y del 28% con la adición de fibras de vidrio del 3% y del 5% y un 18% y 25% con la adición de fibras de basalto. Por el contrario, la resistencia a flexión y a tracción aumentaba cuando se acrecentaba el porcentaje de fibras, mejorando los resultados a flexión del mortero de referencia en un 18%, 27%, 33% y 30% y a tracción en un 3%, 13%, 19% y 9%, respectivamente, en función del tipo y el contenido de fibras citado anteriormente. En cuanto a la energía total absorbida, las fibras de vidrio ofrecían mejores resultados, mejorándola en un 533% y un 646% con un contenido de fibras del 3% y el 5% respectivamente, no mostrando cambios significativos con adición del 3% de fibra de basalto y mejorando en un 50% el mortero de referencia con la adición del 5% de fibras.

Las fibras de carbono tienen unas propiedades intrínsecas excelentes, entre las que destacan su baja densidad, su elevada resistencia a tracción, su alto módulo de elasticidad, una alta conductividad térmica y eléctrica, así como una notable resistencia a la corrosión y a los álcalis. Debido a esto, tiene usos muy diversos entre los que se encuentran la industria aeronáutica, la aeroespacial, automovilismo, energía, electrónica, textiles... [68].

Una de las primeras investigaciones en el campo de los materiales de base cementicia reforzados con fibras de carbono fue realizado por Chung [69]. En dicho estudio se realiza una revisión de la literatura existente hasta ese momento, llegando a la conclusión de que los materiales con matriz de cemento reforzado con este tipo de fibras poseen una mejor resistencia a flexión y tracción, una baja contracción por secado y mejores prestaciones frente al fuego (alta resistencia y baja conductividad térmica). A esto hay que sumarle que los compuestos de base cementicia con adición de fibras de carbono poseen una alta conductividad eléctrica, objeto de estudio en los últimos años [70-73], debido a la posibilidad de fabricar hormigones o morteros “inteligentes” capaces de conducir la electricidad.

En lo referido a las propiedades mecánicas, existe una serie de publicaciones que han demostrado que la fibra de carbono puede proporcionar un refuerzo significativo. Las longitudes de la fibra de carbono adicionada en los diferentes estudios oscilan entre milímetros y centímetros, mejorando la resistencia a compresión, la resistencia a flexión, la resistencia a tracción y la ductilidad de los materiales cementantes.

Park et al. [74] comunicaron que los materiales compuestos de cemento reforzados con una fracción en volumen del 5% de fibra de carbono de 2mm mejora la resistencia a flexión en poco menos de tres veces, mientras que la resistencia a tracción aumenta en algo más de 3 veces.

Chen y Chung [75] publicaron mejoras en la resistencia a flexión de morteros de cemento en un 10%, 39% y 39%, cuando fueron reforzados con fibras de carbono de longitud 3 mm, 5,1 mm y 12,7 mm y un porcentaje de fibras un 0,5% del peso de cemento. Los mejores resultados se encontraron para longitudes de 12,7mm, aumentando la resistencia a compresión hasta el 22% y la ductilidad hasta el 205%. También observaron que la contracción por secado se reducía un 90% y se aumentaba el contenido de aire por encima del 6%.

Toutanji et al. [76] encontraron que fracciones de 1%, 2% y 3% de fibra de carbono aumentaba la resistencia a tracción del cemento en un 32%, 48% y 56%, y su resistencia a la flexión en un 72%, 95% y 138%.

Yunsheng y Chung [77] publicaron que la inclusión de un 0,5% en peso de fibras de carbono tratadas con silano aumentaba la resistencia a la tracción de la pasta de cemento en un 56%, mientras que la ductilidad se incrementó en un 39%.

Wang et al. [78] midieron la resistencia a la flexión, la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión de morteros de cemento con adición de un 0,6%, en peso, de fibras de carbono. Los resultados mostraron que la distribución de los elementos principales cambiaba con la variación del estado de dispersión de la fibra. La resistencia a compresión aumentó un 20%, la resistencia a tracción fue 2,4 veces la del material de referencia, el módulo de elasticidad aumentó un 26,8%, mientras que la resistencia a flexión disminuyó en un 12,9%.

Graham et al. [79] compararon el rendimiento mecánico de morteros con fibras de vidrio de dos longitudes mediante ensayos IDT. Las fibras de 6,31mm mostraron mejores resultados. La resistencia a la fractura mejoró en un 59%, 94% y 125% para las fracciones de 0,5%, 1%, 2% y 3%, mientras que cuando se adicionaban microfibras, la resistencia a la fractura aumentaba en un 44%, 31%, 62% y 65% respectivamente.

Shu et al. [80] completaron el trabajo iniciado por Graham et al. [79] ensayando morteros con microfibras, macrofibras y una mezcla de ambas a las que denominaron fibras híbridas. Concluyeron que la adición de fibras híbridas mejoraban en mayor medida la resistencia a fractura del mortero. A la par, indicaron que las mezclas con estas fibras tenían un rendimiento a flexión más predecible, con respecto a la absorción de energía de deformación, que los morteros con un solo tipo de fibra.

2.2.2.2 Influencia sobre los morteros de cal hidráulica

En contraposición a lo que ocurre con los materiales de matriz cementicia, no existe en la literatura gran variedad de artículos científicos relacionados con la adición de fibras a morteros de cal hidráulica, siendo en los últimos años cuando varios autores han publicado sobre esta temática.

A principios de la presente década, Chan y Bindiganavile [81] añaden fibras de polipropileno en un 0,5% en volumen a un mortero de cal hidráulica natural (NHL 2) e informan que la adición de fibra mejora la capacidad de compresión, flexión y cizallamiento. También encuentran que, para un contenido de agua dado, existe un contenido de fibras óptimo más allá del cual la eficacia de la fibra no aumenta. Los mismos autores, en un segundo estudio [82], investigaron la respuesta dinámica de dichos materiales compuestos a base de cal y destacaron que las fibras son capaces de disipar mejor la energía, pero informaron de una disminución de la resistencia a flexión.

También han sido probadas como un refuerzo efectivo las fibras de polipropileno en morteros de cal aérea [83]. Un bajo contenido de fibras (0,06% en peso) mejora la resistencia mecánica y la durabilidad en ciclos de congelación-descongelación. Para un 0,5%, la presencia de fibras resultó perjudicial en lo relativo a resistencias mecánicas y permeabilidad al vapor de agua, pero se produjo una reducción del agrietamiento por contracción.

Lucolano et al. [84] investigaron el efecto de fibras de vidrio y basalto sobre las propiedades físicas y mecánicas de los morteros de cal hidráulica natural (NHL 3,5) con diferentes porcentajes en peso, el 1 y 2%. Publicaron que ambas fibras empeoran la resistencia a compresión del mortero en un rango de 35% - 60%, mientras que la suponen un aumento de la resistencia a flexión, llegando a un incremento del 12% en el caso de la adición en un 2% de fibra de vidrio. La ductilidad de los morteros reforzados fue considerablemente superior respecto a la de referencia, aumentando, para un contenido del 1% en peso, un 400% para la fibra de basalto y un 500% para la de vidrio, llegando a valores del 500% y 800% para un contenido del 2%.

Continuando esta investigación, Asprone et al. [85] caracterizaron dinámicamente un mortero de cal hidráulica natural (NHL 3,5) con adición de fibra de basalto con el fin de verificar su capacidad para soportar condiciones de alta carga dinámica. Para ello, realizaron ensayos de tracción cuasi-estática y pruebas de tracción dinámica a velocidades media y alta utilizando una maquina hidroneumática y una modificación del aparato de barra de Hopkinson. Concluyeron que los morteros de cal hidráulica con fibras de basalto presentan mejores propiedades mecánicas dinámicas que los de referencia y que este tipo de morteros son viables para la recuperación del patrimonio cultural.

Ese mismo año, Santarelli et al. [86] estudiaron morteros de cal hidráulica (NHL 3,5) con adición de fibras de basalto de dos tipologías; “picadas” de longitud 6,5 mm y “molidas” de longitud 10–17 micras. Para adiciones de fibra picada del 3% en peso, la resistencia a compresión aumentaba un 30%, disminuyendo un 60% para adiciones del 10%. Un efecto similar, aunque más atenuado, se producía con la adición de fibras molidas. En cuanto a la resistencia a flexión, tanto las adiciones del 3% y del 10% empeoraban las resistencias, hasta el 42% en el segundo de los casos. Mientras que

el módulo de Young se incrementaba hasta en un 18% con la adición del 3% de fibras de basalto picadas.

Para concluir este apartado, cabe apuntar, que no se ha encontrado en la literatura ningún artículo ni estudio en lo referente a morteros de cal aérea o cal hidráulica con adición de fibra de carbono.

2.3 Tipos de fibras

El anejo 14 de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 [87] describe las propiedades de las fibras, definiéndolas como “*elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan a la masa del hormigón a fin de conferirle ciertas propiedades específicas*”.

Las fibras se pueden clasificar de diferentes maneras:

- Según el material de fibra: orgánico natural (celulosa, sisal, yute, bambú, etc.); mineral natural (amianto, lana de roca, etc.); fabricadas por el hombre (acero, titanio, vidrio, carbono, polímeros o sintéticos, etc.).
- Según sus propiedades físicas/químicas: densidad, rugosidad superficial, estabilidad química, resistencia a los álcalis, resistencia al fuego, etc.
- Según con sus propiedades mecánicas: resistencia a la tracción, módulo elástico, rigidez, ductilidad, elongación a la falla, propiedad de adhesión superficial, etc.

Además de estas características, se pueden seleccionar las propiedades geométricas relacionadas con su forma de sección transversal, longitud y diámetro equivalente. La sección transversal de la fibra puede ser circular, rectangular, romboidal, cuadrada, triangular, plana o cualquier forma poligonal. Para mejorar la unión entre la fibra y la matriz, la fibra se puede modificar a lo largo de su longitud mediante la rugosidad de su superficie. Por lo tanto, las fibras pueden ser lisas, con textura, deformadas, onduladas, arrolladas, retorcidas, con ganchos de extremo, etc. Las fibras de acero son, con diferencia, las más estudiadas en este sentido. Algunos ejemplos de fibras de acero se muestran en la Figura 2.1.

Figura 2.1. Propiedades mecánicas de las fibras. Fuente: ACI [88].

En la Tabla 2.1 se resumen las principales características de algunas fibras existentes en el mercado:

Tipo de fibra	Densidad (kg/m ³)	Tensión de rotura (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Acrílica	1100	200 a 400	2
Asbestos	3200	600 a 1000	83 a 138
Vidrio	2500	1000 a 2600	70 a 80
Grafito	1900	1000 a 2600	230 a 415
Aramida	1450	3500 a 3600	65 a 133
Nylon	1100	760 a 820	4,1
Polipropileno	900	200 a 760	3.5 a 15
Carbono	1400	2300 a 4500	230 a 240
Basalto	2593	1500 a 4000	176
Rayón	1500	400 a 600	6.9
Polietileno	960	200 a 300	5
Sisal	760	228 a 800	2,1 a 4,2
Jute	1030	250 a 350	1,5 a 1,9
Acero	7840	345 a 3000	200

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas de las fibras. Fuente: ACI [88].

2.4 Orientación y dispersión de las fibras

Una buena orientación y dispersión de las fibras en torno a la matriz cementicia, es uno de los aspectos más importantes para el buen comportamiento mecánico del mortero, pero a la misma vez, es una de las cuestiones más difíciles de conseguir. Influyen de forma significativa en el comportamiento post-fisuración del material. En función de la orientación y dispersión de las fibras con respecto al plano de fisuración, la acción de refuerzo será más o menos eficiente.

Diversas investigaciones han estudiado la distribución y alineación (orientación) de las fibras. Stroeven [89] evaluó el efecto de la longitud en la distribución de las fibras, planteando una serie de ecuaciones que serían utilizadas por otros autores. Soroushian y Lee [90] estudiaron la influencia de la longitud, aspecto y forma de las fibras, sobre la orientación y la distribución. Gettu et al. [91] aplicaron la formulación de Stroeven a sus resultados experimentales, estudiando diversas variables como la forma de compactación (vibración externa o interna) y la geometría del molde. Concluyeron que una compactación adecuada supone una distribución relativamente homogénea e isotrópica, pero que un exceso de compactación producía una segregación de las fibras y una mayor orientación horizontal.

Investigaciones recientes han estudiado la influencia de la cantidad de fibras adicionadas con la dispersión. Es ampliamente aceptado que el porcentaje de fibras

que pueden ser incorporadas a la mezcla es limitada debido a la formación de cúmulos de fibras (enredo de fibras) mediante las denominadas fuerzas de Van Der Waals, formando aglomerados difíciles de separar, lo que provoca que el nuevo material compuesto pierda una parte de sus propiedades características con la posibilidad incluso de empeorar las propiedades del material primario [92]. Este efecto puede minimizarse mediante el empleo de aditivos químicos como los reductores de agua de amplio rango [93], utilizando fibras con una longitud menor [93] o con una disminución de la esbeltez de la fibra [94].

Por tanto, la respuesta post-fisuración del hormigón reforzado con fibras está directamente relacionada con el tipo, la longitud y el contenido de fibras utilizadas, además de la orientación que las mismas adopten.

2.5 Interacción fibra-matriz

La interacción que se produce entre las fibras y la matriz es uno de los aspectos más estudiados en los morteros reforzados con fibras debido a las diversas complicaciones que conllevan. Lawrence [95] y Gopalaratnam et al. [96] estudiaron los distintos modos de extracción en los que la fibra podía ser separada de la matriz. Estos autores despreciaron la influencia del coeficiente de Poisson considerando un enlace perfectamente elástico. La extracción se producía por pérdida de adherencia, cuando se alcanzaba la resistencia máxima del enlace, produciéndose una disipación de energía por el efecto de la fricción debido al rozamiento.

Wang et al. [97] expusieron que la tensión elástica tangencial baja de manera exponencial a medida que te alejas de la zona despegada, lo que implica, que la longitud de la fibra tiene una gran importancia en el proceso de extracción. A mayor longitud de la fibra, menor importancia del enlace elástico entre fibra y matriz y mayor importancia de enlace por fricción.

Li et al. [98] estudiaron diversos factores que influyen en el arrancamiento de las fibras. Afirmaron que el ángulo de las fibras, respecto de la superficie libre de matriz de una fisura, durante el proceso de arrancamiento, tiene mucha incidencia en el comportamiento macroscópico del material.

Naaman [99] sugiere que para que las fibras sean efectivas como refuerzo en materiales de base cementicia, deben tener las siguientes propiedades:

- Una resistencia a la tracción significativamente mayor que la de la matriz (dos o tres veces superior).
- Una resistencia de adherencia con la matriz del mismo orden o superior que la resistencia a la tracción de la matriz.
- Un módulo elástico en tensión significativamente mayor que el de la matriz de hormigón.

- El coeficiente de Poisson de la fibra y el coeficiente de dilatación térmica de la matriz y la fibra debe ser similar.

2.6 Muros de fábrica

Los muros de fábrica son elementos encargados de cumplir una función resistente. Su principal función es soportar las cargas verticales de parte de la estructura y las horizontales generadas por el viento o sismos. Para entender el comportamiento estructural de los muros de fábrica, es fundamental comprender su comportamiento bajo la acción de cargas biaxiales y a cortante.

El principal problema al que se enfrentan los investigadores al estudiar las obras de fábrica es a la alta dispersión en los resultados de los ensayos. La variación de la geometría tanto del aparejo como de las relaciones geométricas entre las unidades y el ancho de junta, definen el marcado comportamiento anisótropo y discontinuo de las fábricas [100].

Analizando el modelo fotoelástico de un muro de fábrica sometido a una carga puntual, Figura 2.2, puede observarse la formación de “corrientes de tensiones” junto a otras zonas o “isletas” escasamente tensionadas, lo que indica claramente el carácter anisótropo y discontinuo del muro ensayado.

Figura 2.2. Modelo fotoelástico de estructura de fábrica [101].

2.6.1 Componentes y comportamiento de la fábrica

La fábrica es un material heterogéneo compuesto por piezas unidas mediante un material ligante, normalmente un mortero, que poseen características resistentes y deformaciones diferentes entre sí. Las unidades son las que determinan en mayor medida, la capacidad resistente a compresión del muro, mientras que el mortero, debido a su menor rigidez, es responsable de la mayor parte de la deformación instantánea y prácticamente toda la deformación diferida.

Para poder estudiar completamente la obra de fábrica es necesario ensayar y caracterizar a nivel individual cada uno de los materiales, así como el material compuesto. A efectos del análisis estructural, las propiedades mecánicas más importantes de las piezas o unidades son el módulo de deformación longitudinal y la resistencia a compresión. Otras propiedades como la deformación máxima, la deformación última, el módulo de Poisson y la energía de fractura no son estudiadas en todas las campañas experimentales, debido a la dificultad del ensayo, haciendo necesario el recurrir a la literatura existente. Mientras que las propiedades mecánicas más importantes de los morteros son el módulo de deformación longitudinal, la resistencia a compresión y el coeficiente de Poisson.

Si bien es cierto que las características de los materiales van a influir de manera determinante en el comportamiento del muro, este dependerá de otros factores como son la correcta ejecución, el espesor de las juntas y la capacidad de absorción de los ladrillos.

Las fábricas están sometidas a un esfuerzo de compresión uniaxial, que consiguen asentar el mortero, confinado entre las piezas de ladrillo que une y generando a su vez esfuerzos horizontales de rozamiento por adherencia en la interfaz de ambos elementos. Este esfuerzo desarrolla tracciones internas en la pieza de ladrillo en ambas direcciones. Por lo tanto, el ladrillo se encuentra sometido a un esfuerzo triaxial de compresión vertical y tracciones horizontales y el mortero a un esfuerzo triaxial de compresiones (Figura 2.3).

Figura 2.3. Distribución de esfuerzos ideal en un elemento de mampostería solicitado a compresión excéntrica [102].

La componente horizontal de estos esfuerzos triaxiales origina sollicitaciones internas de cortante dentro del muro, soportadas por las reacciones de rozamiento que se generan entre los elementos que constituyen el muro. Puede suceder, sin embargo, que la transmisión de esfuerzos de cortadura por adherencia en la interfaz entre los distintos materiales sufra distintos modos de fallo, según se muestra en la Figura 2.4 [103].

Figura 2.4. Mecanismos de fallo a cortante en la interfaz ladrillo mortero [103].

El fallo de las estructuras de fábrica puede localizarse en los ladrillos, en el mortero o en su interfaz. Mientras que los fallos que suceden en ladrillo o mortero producen la aparición de grietas o el pulverizado del material, los que ocurren en la interfaz ladrillo-mortero están asociados a la falla a tracción y con el fallo a cortante. La primera conduce a la apertura de la junta y la segunda al deslizamiento de la misma. De los fallos antes enumerados, los más frecuentes se producen en las juntas, ya que constituyen un plano de debilidad del conjunto. La respuesta no lineal de las juntas representa una de las características más importantes del comportamiento de la obra de fábrica [104].

2.6.2 Obra de fábrica como material compuesto

Las estructuras de fábrica en general están sometidas a esfuerzos predominantemente de compresión. El efecto devastador sobre las estructuras de fábrica en los últimos treinta años debido a los terremotos ha llevado a los técnicos a reconocer sus debilidades y estudiar formas de superarlas para que dicho daño pueda reducirse significativamente en el futuro.

Debido la dificultad de estudiar una estructura a escala real y a la facilidad de utilización de programa de simulación, varios investigadores han tratado el comportamiento estructural de las fábricas en los últimos años utilizando el método de elementos finitos. Para ello han creado modelos matemáticos capaces de reproducir los efectos de la no linealidad del material.

2.6.3 Comportamiento bajo cargas estáticas

El análisis completo de una estructura de fábrica requiere conocer las propiedades elásticas de la fábrica, las relaciones inelásticas de tensión-deformación y el criterio de rotura. La mayoría de los estudios se han concentrado en encontrar un criterio de rotura más que en estudiar las características de deformación del material y solo recientemente se han intentado estudiar las propiedades materiales de la fábrica de ladrillo sujeta a estados de tensión biaxial.

No existe demasiada información sobre las relaciones tensión-deformación para fábricas de ladrillo y está limitada a datos sobre las propiedades elásticas. Dhanasekar et al. [105] después de una serie de ensayos sobre paneles, reportaron las

propiedades elásticas promedio de la fábrica de ladrillo, mientras que Hegemier et al. [106] hicieron lo propio para fábricas de bloques de hormigón.

El comportamiento bajo cargas de compresión uniaxial [102] y compresión biaxial [107-109] ha sido ampliamente estudiado. Aunque el desarrollo de un criterio de rotura general para muros de fábrica entraña una gran dificultad debido a la problemática para desarrollar una prueba representativa, tras aplicar una metodología empírica, algunos autores han propuesto una serie de ecuaciones que tratan de explicar el modo de rotura de los muros de fábrica.

Yokel y Fattal [110] realizaron un estudio sobre fábricas sometidas a estados tensionales de tracción-compresión, basándose en los resultados experimentales presentados por Grenley y Cattaneo [111]. Expusieron cuatro tipos de rotura: por tensión normal crítica, por combinación crítica de tensiones principales, por deformación a tracción en el plano y por separación de junta.

Page [112] propuso un criterio de rotura tensión-tensión, utilizando un modelo de elementos finitos no lineales que predecía la rotura por las juntas del mortero. También estableció criterios de rotura para fábricas de ladrillo de escala reducida sometida a estados de compresión-compresión y de tracción-compresión [113-115]. Dhanasekar et al. [116] ampliaron el trabajo desarrollado por Page a través de ensayos experimentales. Propusieron un método aproximado para establecer la superficie de rotura a partir de un número reducido de pruebas uniaxiales y biaxiales.

Samarasinghe y Hendry [117] ensayaron muros de ladrillo, con una escala 1:6, a ensayos biaxiales de compresión-tracción empleando diferentes orientaciones de junta. Encontraron que la superficie de rotura dependía de la orientación de las juntas de morteros y de la relación entre la resistencia al corte y la resistencia a tracción de las juntas. La influencia de la orientación de las juntas también ha sido investigada por Hamid et al. [118] en fábricas de bloques de hormigón con y sin mortero de junta.

Drysdale [119] estudió la resistencia a tracción de fábricas de bloques de hormigón desarrollando un criterio de rotura que explica la variación de resistencias debido a la naturaleza anisotrópica de la fábrica. Ganz y Thurlimann [120] desarrollaron un criterio de rotura para fábricas constituidas por ladrillos perforados en términos de tensiones directas, paralelas y perpendiculares a la junta y tensión de corte en la junta. Lourenco y Rots [121,122] publicaron un criterio de rotura anisotrópico para los muros de fábrica implementando el criterio de Rankine a tracción y el de Hill a compresión, mediante simulación matemática.

Asteris y Tzamtzis [123] publicaron una metodología para el análisis muros de fábrica bajo un estado de tensión biaxial utilizando el método de elementos finitos, a partir de los resultados obtenidos por Page. La metodología se centra en el desarrollo de un criterio de rotura anisotrópico, utilizando un polinomio de tensor cúbico.

Comparativamente, existe poca información sobre el comportamiento de las fábricas de ladrillo bajo carga cíclica de compresión. Naraine y Sinha [124-126] presentaron una investigación sobre el comportamiento de fábricas de ladrillo bajo carga cíclica, de compresión uniaxial y biaxial. Establecieron que en las curvas de tensión-deformación existen puntos comunes donde la parte de recarga del ciclo cruza la parte de descarga del ciclo anterior, lo que puede usarse para definir los niveles de estrés permisibles para fábricas de ladrillo bajo carga cíclica.

2.6.4 Comportamiento bajo cargas dinámicas

El estado del conocimiento sobre la resistencia al corte está menos avanzado que el comportamiento relativo en compresión biaxial, aunque éste sea el modo dominante de rotura observado en muchos edificios de fábrica sometidos a cargas laterales debido a esfuerzos horizontales como puede ser el viento, terremotos u otras causas. La mayoría de las investigaciones llevadas a cabo hasta la fecha con respecto al comportamiento a cortante de las fábricas se han limitado a determinar la resistencia máxima y los factores que la afectan.

Atkinson et al. [127] analizaron el modo de fallo por cortante y el desplazamiento de la fábrica de ladrillo durante ensayos cíclicos. Priestley [128] aplicó cargas laterales sobre muros reforzados indicando dos modos de rotura: fallo por cortante, caracterizado por un agrietamiento diagonal de la fábrica; y fallo por flexión, caracterizado por un aplastamiento.

Mayes et al. [129,130] estudiaron la resistencia, los modos de rotura y el comportamiento al corte cíclico de pilares de fábrica, e Hidalgo et al. [131,132] estudiaron el comportamiento cíclico de pilares de fábrica sometidos a inversiones de carga. Gulkan et al. [133,134] ensayaron construcciones de fábrica de una planta sobre una mesa vibradora e investigaron su comportamiento frente a terremotos al someterla a vibración extrema.

Kariotis et al. [135-137], tras realizar una amplia campaña de ensayos dinámicos, indicaron que los muros de fábrica podrían soportar niveles de aceleración superiores a los predichos por cálculos elásticos. Button et al. [138] desarrollaron un modelo analítico para predecir el comportamiento sísmico fuera del plano de los muros de fábrica reforzados. El modelo fue validado a partir de los ensayos dinámicos realizados sobre muros de ladrillo de arcilla [139] y sobre muros de bloques de hormigón [140].

Sucuoglu et al. [141,142] presentaron dos modelos matemáticos lineales para predecir el comportamiento dinámico de muros de fábrica de ladrillo. El primer modelo reconoce la composición de los materiales de la fábrica y predice su respuesta con precisión para una amplia gama de frecuencias, mientras que el segundo es más simple. Continuando con este trabajo, Mengi et al. [143] propusieron un modelo para predecir el comportamiento no lineal, extendiendo el modelo lineal previamente

desarrollado para cubrir el comportamiento en los rangos no lineales. Publicaron que los valores obtenidos cuando se somete a la fábrica a fuerzas dinámicas son radicalmente diferentes a cuando es sometida a cargas estáticas. Los valores son similares hasta que comienza la fisuración, después de la cual el módulo de cizallamiento disminuye y el coeficiente de amortiguación aumenta.

2.6.5 Refuerzos de muros

Matthys y Noland [144] estimaron que más del 70% del parque edificado mundial está conformado por edificios con muros de fábrica. Los terremotos pueden devastar pueblos y ciudades completas ocasionando como resultado una gran cantidad de pérdidas materiales y humanas. La mayoría de estas pérdidas son causadas por fallas en los edificios de fábrica no reforzada o URM por sus siglas en inglés.

Dado que la demolición y la sustitución de estas estructuras de albañilería no son generalmente factibles, esto plantea la cuestión de si tales edificios deben ser readaptados o reforzados. Nuti y Vanzi [145] propusieron como procedimiento para la toma de decisiones, si la intervención para reacondicionar una estructura es económicamente viable o no.

Aunque se han implementado una variedad de soluciones técnicas para el refuerzo de estas estructuras, existe poca información o directrices técnicas con las que un arquitecto o ingeniero pueda juzgar las virtudes y defectos de estos métodos. A continuación, se describen los diferentes métodos de refuerzos de estructuras de fábrica encontrados en la literatura científica.

2.6.5.1 Inyección de mortero y epoxi

La inyección de lechada es una técnica popular de refuerzo, ya que no altera la estética ni las características arquitectónicas de los edificios existentes. El propósito principal de las inyecciones es restaurar la integridad original del muro intervenido, colmatando los huecos y grietas. El éxito de una intervención por inyección depende de la inyectabilidad de la mezcla utilizada, de la técnica de inyección adoptada, de las propiedades mecánicas de la mezcla y de su compatibilidad fisicoquímica con la albañilería.

Se utiliza resina epoxi para grietas relativamente pequeñas (menos de 2 mm de ancho), mientras que la lechada a base de cemento se considera más apropiada para el llenado de grietas más grandes, huecos y cámaras entre muros [146]. Sin embargo, Schuller et al. [147] utilizaron una lechada de cemento (100% de cemento Portland con una mezcla expansiva y una relación a/c de 0,75) para inyectar grietas de 0,08 mm de ancho.

La técnica es eficaz para restablecer la rigidez inicial y aumentar la resistencia de la fábrica. La inyección de lechada a base de cemento es capaz de restablecer hasta

aproximadamente un 80% de la resistencia a la compresión de fábrica [147], entre 80%-110% de la rigidez en el plano del muro y entre 80%-140% en el plano lateral [148]. Además, la inyección de mortero a base de cemento puede incrementar la resistencia al corte [149]. La inyección de epoxi incrementó la resistencia lateral entre 2 y 4 veces la resistencia de la no reforzada, mientras que el aumento de la rigidez (10-20%) es mucho menos significativo.

2.6.5.2 Refuerzo externo

2.6.5.2.a Placas o tubos de acero

El sistema de acero está conectado directamente al muro existente. Las rigideces de la estructura no reforzada y las del nuevo refuerzo de acero son un factor determinante que debe tenerse en cuenta. En caso de sismo, se espera un agrietamiento en la estructura de fábrica original y después de que se haya producido un agrietamiento suficiente, el nuevo sistema de acero tendrá una rigidez comparable y será efectivo [150]. El refuerzo vertical y diagonal mejora la resistencia lateral en el plano del muro reforzado 4,5 veces [151]. El incremento en la resistencia lateral se limitó por el aplastamiento de la fábrica en los extremos seguido por la deformación global del refuerzo vertical. Además, el sistema de acero externo proporciona un mecanismo efectivo de disipación de energía.

2.6.5.2.b Polímero reforzado con fibra (FRP)

El refuerzo mediante polímero reforzado con fibra (FRP) ha sido ampliamente investigado en las últimas dos décadas. Se ha estudiado la interacción entre estos materiales y las fábricas bajo una amplia variedad de condiciones de carga. Ehsani et al. [152] realizaron ensayos de corte sobre elementos de fábrica reforzados con FRP de carbono demostrando que su uso podría mejorar el rendimiento sísmico de las fábricas no reforzadas. Albert, Elwi y Cheng 2001 [153] y Hamoush et al. [154] reportaron un aumento de la capacidad a flexión de los muros de fábrica cuando están reforzados con FRP. Foster et al. [155] evaluaron muros de fábrica reforzados con FRP de vidrio bajo cargas laterales cíclicas utilizando varias configuraciones y tipos de polímero. Revelaron incrementos de hasta 700% en términos de disipación de energía y 300% en ductilidad. Valluzzi et al. [156] reforzaron muros de fábrica utilizando diferentes FRP (vidrio, carbono y polivinilo). Los resultados experimentales indicaron que el refuerzo de FRP aplicado solamente a un lado de los paneles no modificaba significativamente la resistencia al corte, mientras que, si se aplicaba por ambos lados, proporcionaba un comportamiento menos frágil y un notable aumento de la resistencia.

2.6.5.3 Confinamiento de fábrica mediante pilares de hormigón armado

El confinamiento de muros mediante columnas de hormigón armado representa uno de los sistemas de refuerzos de fábricas más utilizados en Asia y América Latina. El confinamiento evita la desintegración y mejora la ductilidad y la disipación de energía

de la fábrica, pero tiene un efecto limitado sobre la resistencia a la carga final [157,158].

El efecto de confinamiento depende principalmente de la rigidez relativa entre la fábrica y el marco circundante. Antes de agrietarse, el efecto de confinamiento puede ser despreciado. Sin embargo, para muros con una esbeltez inferior a 0,33, el confinamiento aumentó la carga de rotura un 27%, mientras que la resistencia lateral aumento un 20%. Para muros con una esbeltez superior, tanto la resistencia lateral como la disipación de energía aumentaron más de un 50% [159].

2.6.5.4 Postesado

El postensado implica una fuerza de compresión aplicada sobre el muro de fábrica que contrarresta las tensiones de tracción resultantes de las cargas laterales. El postesado se utiliza principalmente en estructuras caracterizadas como monumentos. Muchas investigaciones se han llevado a cabo en las últimas dos décadas sobre la albañilería de postensado [160,161]. Los tendones de post-tensión suelen estar en forma de barras de hilos de acero, aunque los tendones de una sola cadena no son infrecuentes [162,163].

El post-tensionado vertical mejora sustancialmente el comportamiento final del muro tanto en el plano como fuera del plano [164]. En un modelo de elementos finitos lineales, Karantoni y Faradis [165] muestran que el postensado horizontal no mejoró significativamente el comportamiento del edificio. Además, exponen que si el post-tensado horizontal y vertical se combinan, el efecto positivo resultante es mayor que la suma de los efectos individuales de las dos direcciones.

2.6.5.5 Técnica del núcleo central

El sistema de centro del núcleo consiste en un núcleo reforzado, situado en el centro del muro existente. Se perfora un orificio vertical continuo a lo largo de todo el muro. La colocación de la lechada bajo presión proporciona un elemento estructural "homogéneo" mucho mayor que el núcleo mismo. Esta viga vertical "homogénea" proporciona una capacidad superior de resistir cargas.

El material de relleno consiste en un material aglutinante (epoxi, cemento o poliéster) y un material de relleno (arena). Los ensayos de cizallamiento muestran que los especímenes hechos con lechada de cemento fueron un 30% más débiles que los especímenes realizados con arena/epoxi o lechadas de arena/poliéster [166].

Esta técnica se utilizó con éxito para duplicar la resistencia de un muro de fábrica en una prueba cíclica estática [167]. La principal desventaja es que esta técnica tiende a crear zonas con propiedades de rigidez y resistencia muy variadas.

2.6.5.6 Tratamiento de superficies

El tratamiento de superficies exteriores en el método más común para el refuerzo de muros de fábrica. Por naturaleza este tratamiento cubre el exterior de la fábrica y afecta la apariencia arquitectónica o histórica de la estructura.

Las técnicas comunes más utilizadas son el ferrocemento, yeso reforzado y hormigón proyectado. En los últimos los refuerzos a base de fibras poliméricas se han extendido ampliamente, mientras que diferentes autores han estudiado recubrimientos a base de morteros de alto rendimiento.

2.6.5.6.a Yeso reforzado

El yeso reforzado consiste en una capa delgada de yeso aplicada sobre refuerzo de acero de alta resistencia. Las barras de acero se pueden disponer de forma diagonal o en forma de malla. En la prueba de tensión diagonal estática, la técnica fue capaz de mejorar la resistencia en el plano entre 1,25 y 3 veces [168]. La mejora de la resistencia depende del espesor de la capa de refuerzo, de la resistencia del yeso, de la cantidad de refuerzo y de los medios de unión con el muro reforzado.

2.6.5.6.b Ferrocemento

El ferrocemento se compone de múltiples capas de mallas metálicas de barras finas con una relación de refuerzo de 3-8% completamente incrustada en una capa de mortero de cemento de alta resistencia (15-30 MPa) y 10-50 mm de espesor. Las propiedades mecánicas del ferrocemento dependen de las propiedades de la malla.

El ferrocemento es ideal para viviendas de bajo coste ya que es barato y se puede hacer con trabajadores no cualificados, mejorando el comportamiento de la fábrica en plano y fuera del plano. La malla ayuda a confinar las unidades de fábrica después del agrietamiento y, por lo tanto, mejora la capacidad de deformación inelástica en el plano. En una prueba cíclica estática [167], esta técnica de refuerzo aumentó la resistencia lateral en el plano 1,5 veces. En cuanto al comportamiento fuera del plano, el ferrocemento mejora la estabilidad fuera del plano del muro y el pandeo, ya que aumenta la relación entre la altura del muro y el espesor.

2.6.5.6.c El hormigón proyectado

Los recubrimientos de hormigón proyectado se pulverizan sobre la superficie de la fábrica. En general, el espesor de la capa es de al menos 60 mm. El recubrimiento de hormigón proyectado se refuerza mediante un mallazo con la cantidad mínima de acero necesaria para el control de la fisuración.

Con el fin de transferir la tensión de corte a través de la interfaz de hormigón proyectado-albañilería, se fijan pasadores (6-13 mm de diámetro y 25-120 mm de longitud) usando mortero de epoxi o cemento. Otros investigadores creen que se

requiere pintar o pulverizar un agente de unión como el epoxi en el ladrillo para que se desarrolle un enlace adecuando con el hormigón.

Kahn [169] realizó pruebas de tensión diagonal sobre muros de URM reportando un aumento de la carga máxima de los muros entre 6 y 25 veces. Abrams y Lynch [167], tras la realización de una prueba cíclica estática, concluyeron que la carga final del muro aumentó tres veces, disipando la energía debido al alargamiento y al rendimiento del refuerzo a tensión. Aunque en la prueba de tensión diagonal la mejora en la carga de agrietamiento fue muy alta, en la prueba cíclica estática el incremento fue insignificante.

2.6.5.6.d Morteros con fibras

Alternativamente a los recubrimientos reforzados con mallas, los recubrimientos de mortero de cemento con fibras pueden emplearse con éxito, ya que el refuerzo de fibra no requiere una cubierta de mortero mínima. Existe poca información al respecto, pero en los últimos años, se han presentado una serie de artículos enumerando las bondades de este tipo de tratamientos.

Hutchison et al. [170] estudiaron muros de fábrica a escala completa reforzados con un recubrimiento de mortero con adición de fibras de acero (14 mm de espesor), aplicado a ambos lados de la muestra sin ningún dispositivo de anclaje. Los resultados de los ensayos confirmaron la capacidad del revestimiento para aumentar significativamente la resistencia y la ductilidad del espécimen retroadaptado con respecto al elemento no reforzado de referencia.

Sevil et al. [171] investigaron el refuerzo de muros mediante un revestimiento de 20 mm de espesor de mortero de cemento con adición de fibras de acero. Se adicionaron diferentes porcentajes de fibras (1%, 2% y 4% en volumen), buscando el contenido óptimo. La propuesta demostró ser viable desde el punto de vista económico y de aplicabilidad mejorando la fábrica en términos de resistencia y desplazamiento. Las mezclas con adición del 2% obtuvieron los mejores resultados.

Faconi et al. [172] realizaron un estudio experimental basado en ensayos cíclicos inversos cuasi estáticos sobre muros de ladrillos de arcilla macizos y cemento pobre reforzados con mortero de calcio aluminato con nano-sílice (25mm de espesor por ambas caras) y fibras de acero y anclados con diferentes tipologías de fijaciones. Los resultados experimentales mostraron que la técnica propuesta fue capaz de mejorar la resistencia y la rigidez de los muros.

3

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

La definición más habitual para un mortero es la de una mezcla de uno o más conglomerantes inorgánicos, con áridos, agua y a veces adiciones y/o aditivos. Las posibilidades finales de un mortero van a depender en gran medida de las dosificaciones que se hacen de estos componentes, aunque finalmente intervengan otros parámetros, como son la puesta en obra y las condiciones de trabajo y de curado.

Se emplean fundamentalmente dos tipos de conglomerantes, cales (aérea o hidráulica) y cementos, que son productos artificiales de naturaleza inorgánica y mineral. Su cometido consiste en unir los áridos y dar cohesión al conjunto después de cambiar su estructura química en los procesos de fraguado, originando nuevos compuestos.

Los áridos son materiales granulares de tamaño variable, inorgánicos e inertes, que por sí solos no reaccionan frente a los agentes externos (aire, agua, hielo, etc) o a los componentes del cemento.

El agua empleada debe de ser de naturaleza inocua, tanto en el amasado como durante el curado en obra. No debe contener ninguna sustancia que, en cantidad suficiente, alteren las propiedades del mortero, tales como sulfatos, cloruros, etc.

Los aditivos son sustancias que, añadidas, antes o durante la mezcla del mortero y/o durante el amasado suplementario, mejoran las propiedades del mismo, tanto en estado fresco como endurecido.

Las adiciones son materiales de origen mineral utilizados en la fabricación de morteros con el fin de mejorar ciertas propiedades o conseguir propiedades especiales; preferentemente se emplean materiales inorgánicos.

Los ladrillos son materiales inorgánicos en forma de paralelepípedo rectangular, normalmente elaborados a partir de arcilla cocida.

En este capítulo se describen las diferentes materias primas empleadas en la elaboración de los distintos tipos de morteros, detallando los diferentes procesos y ensayos realizados para su caracterización.

En la investigación llevada a cabo en esta tesis doctoral se han utilizado las siguientes materias primas: cemento y cal hidráulica como conglomerante; arena silíceas como árido; fibras de vidrio, carbono y basalto como adición al mortero; un aditivo superplastificante y agua. Para la investigación realizada sobre muros de fábrica, se emplearon adicionalmente, cal aérea como conglomerante y ladrillos cerámicos macizos como unidades.

3.1 Cemento

3.1.1 Elección del tipo de cemento

Los cementos son los conglomerantes hidráulicos más empleados en la construcción. El comportamiento y las propiedades del mortero van a depender fundamentalmente del cemento, al ser su componente más activo.

La mezcla de cemento con una cantidad adecuada de agua forma inmediatamente una masa de carácter plástico que es moldeable, pero que con el tiempo va aumentando su viscosidad y su temperatura. Al cabo de un tiempo, que suele oscilar entre los 45 y los 120 minutos aproximadamente, la masa se vuelve rígida, dando lugar a lo que se conoce como “principio de fraguado”. A partir de ese instante, se produce un aumento de las resistencias mecánicas, debido a la formación de fases cristalinas insolubles que deshidratan parcialmente la masa, hasta llegar a ser indeformable. Este momento se conoce como “final de fraguado”, y tiende a producirse antes de las 12 horas desde el inicio de la mezcla. A partir de entonces, se produce el “periodo de endurecimiento”, fase donde se produce un crecimiento exponencial de las resistencias mecánicas del mortero, debido a la consolidación final mediante la formación de fases cristalinas que colmatan los huecos y a la evaporación del agua sobrante. Transcurridos 28 días, en condiciones normalizadas, se obtiene una resistencia a compresión que define el tipo de cemento.

Las características de los cementos vienen reguladas por la Instrucción de Recepción de Cementos RC-08 [173]. Dicha instrucción distingue entre cementos comunes (CEM), cementos especiales de muy bajo calor de hidratación (VLH), cementos resistentes a los sulfatos (SR), cementos resistentes al agua de mar (MR), cementos para usos especiales (ESP) y cementos de aluminato de calcio (CAC).

La Instrucción para Recepción de Cementos RC-08 en su anejo 8, recoge diferentes tablas con recomendaciones en el uso de los distintos tipos de cementos con el fin de facilitar su selección. Estas sugerencias se refieren a consideraciones relativas a los tipos y clases resistentes, así como a la aptitud de los cementos frente a los diferentes ambientes agresivos que más incidencia pueden tener en los distintos tipos de aplicación; para los morteros de albañilería los cementos recomendados son los indicados en la Tabla 3.1.

Aplicación	Cementos recomendados
Morteros de albañilería	Cementos de albañilería
	Cementos comunes, excepto los tipos CEM I y CEM II/A

Tabla 3.1. Cementos recomendados como morteros de albañilería según RC-08.

La norma UNE EN 1504-3 [174] no recomienda ningún cemento en especial, por lo que se considera que se puede emplear cualquier tipo de cemento utilizando las

dosificaciones habituales en la práctica, que cumplan con las especificaciones buscadas dependiendo de la aplicación final del mortero.

El Código Técnico de la Edificación CTE-08 [175] tampoco recomienda ningún cemento especial siempre que se cumplan las especificaciones del proyecto.

La campaña experimental se desarrolló en los laboratorios de materiales de dos universidades, empleándose distintos cementos. Durante la campaña llevada a cabo en la Universidad Politécnica de Madrid y descrita en los capítulos cuarto, quinto y sexto, se ha utilizado un cemento puzolánico CEM IV para la elaboración de distintos tipos de morteros con fibras. Para la campaña experimental desarrollada durante la estancia doctoral realizada en la Vilnius Gediminas Technical University (séptimo capítulo, “aplicación de morteros como refuerzo de muros de fábrica”) se empleó un cemento puzolánico CEM II.

La norma UNE-EN 480-13 [176] establece que el mortero de referencia para albañilería con aditivos se debería fabricar con un cemento CEM I de la clase resistente 42,5 o 52,5. No obstante, se optó por el CEM IV por ser de uso habitual en construcción y por el CEM II por la disponibilidad en el laboratorio de la Vilnius Gediminas Technical University.

La designación completa de los cementos utilizados en esta tesis es la siguiente:

- CEM IV/B (P-V) 32,5 N. Cemento puzolánico tipo IV, con adición de ceniza volante silícica, de bajo contenido en clinker y bajo calor de hidratación, con una clase resistente media de 32,5 MPa y resistencia inicial ordinaria (Figura 3.1a).
- CEM II/A-LL 42,5N. Cemento puzolánico tipo II, con adición de caliza y alto contenido en clinker, con una clase resistente media de 42,5 MPa y resistencia inicial ordinaria (Figura 3.1b).

Figura 3.1. a) Cemento CEM IV/B (P-V) 32,5 N. b) Cemento CEM II/A LL 42,5 N.

3.1.2 Características según el fabricante

Los cementos empleados para el desarrollo de esta tesis doctoral han sido suministrados por:

- CEM IV/B (P-V) 32,5 N. Fabrica Castillejo, del grupo Cemex S.A, situada en la localidad de Yepes (Toledo).
- CEM II/A-LL 42,5N. Fábrica Akmenės Cementas, situada en la localidad de Naujoji Akmenė (Lituania).

Las características técnicas del cemento se resumen en las Tablas 3.2 y 3.3.

Características		CEM IV/B (P-V) 32,5 N	CEM II/A LL 42,5 N
Características físicas y mecánicas			
Tiempo de inicio de fraguado	(min)	-	≥ 60
Tiempo de final de fraguado	(min)	-	≤ 720
Expansión Le Chatelier	(mm)	0,1 mm	0,1 mm
Superficie específica (Blaine)	(cm ² /g)	-	-
Resistencia a compresión inicial	(MPa)	≥ 16,0	≥ 20,0
Resistencia a compresión 28 días	(MPa)	≥ 32,5 y ≤ 52,5	≥ 42,5 y ≤ 62,5
Características químicas			
Pérdida al fuego	(%)	≤ 5	≤ 5
Residuo insoluble	(%)	≤ 5	≤ 5
Sulfatos (SO ₃)	(%)	≤ 3,5	≤ 4
Cloruros	(%)	≤ 0,1	≤ 0,1
Puzolanidad		7 días	7 días

Tabla 3.2. Características del cemento empleado.

Composición	CEM IV/B (P-V) 32,5 N	CEM II/A LL 42,5 N
Clinker (K)	45 a 64	80 a 94
Ceniza volante silícica (V) y puzolana (P)	36 a 55	-
Caliza (LL)	-	6 a 20
Regulador de fraguado	0 a 5	0 a 5

Tabla 3.3. Componentes (%) de los cementos comunes utilizados.

Asimismo, las recomendaciones para los cementos elegidos según las fichas técnicas del fabricante se especifican en la Tabla 3.4.

Tipo de cemento	Aplicaciones
CEM IV/B (P-V) 32,5 N CEM II/A LL 42,5 N	Morteros de albañilería.
	Trabajo de albañilería en general.
	Hormigones en masa o armado de resistencia media.
	Prefabricados de hormigón.
	Firmes de hormigón estabilizados con cemento, firmes de suelo cemento y gravacemento.

Tabla 3.4. Recomendaciones de uso según certificados del fabricante.

3.1.3 Caracterización física

3.1.3.1 Densidad real del cemento

Este parámetro se ha obtenido de acuerdo con la norma UNE 80103 [177], mediante el método del volunómetro. El ensayo consiste en colocar una masa de cemento, conocida y seca, en el interior de un recipiente con una escala graduada y previamente lleno de líquido hasta un nivel determinado. El cemento que se introduce desplaza el líquido hasta un segundo nivel y, por lectura directa, se obtiene el volumen de la masa de cemento. El ensayo se realiza por duplicado. Con este dato se calcula la densidad del cemento con la siguiente expresión (3.1):

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3.1)$$

Donde,

- ρ Densidad real en g/cm³
- m Masa del cemento desecado en g
- v Volumen desplazado en cm³

La densidad real de los morteros ensayados se muestra en la Tabla 3.5.

Tipo de cemento	Densidad real (g/cm ³)
CEM IV/B (P-V) 32,5 N	3,01
CEM II/a II 42,5 N	3,03

Tabla 3.5. Densidad real del cemento.

3.1.4 Caracterización química

Los ensayos para determinar las propiedades químicas del cemento vienen recogidos en la norma UNE-EN 197-1 [178]. En nuestro caso, los datos químicos se han recogido directamente de la ficha técnica del fabricante como se indica anteriormente (Tabla 3.2).

3.2 Cal

3.2.1 Elección del tipo de cal

Las cales son los conglomerantes más empleados para la construcción desde la antigüedad, siendo desplazados por los cementos a partir del siglo XIX. El comportamiento y las propiedades del mortero van a depender fundamentalmente de la cal empleada, dependiendo si se trata de cal aérea o hidráulica.

Las cales hidráulicas naturales (NHL) y artificiales (HL) son conglomerantes capaces de fraguar en un medio saturado de humedad o incluso bajo el agua. Esto es debido a que en su composición hay fases de silicatos cálcicos y aluminatos cálcicos que al hidratarse forman sustancias estables insolubles del tipo gel CSH, CAH y CASH, pero al mismo tiempo, conservan una fase aérea más o menos abundante que fraguará por carbonatación. Este doble comportamiento es el que les da sus principales cualidades a estas cales.

La cal tiene una parte hidráulica que está menos afectada en su fraguado por las condiciones ambientales (lluvia, bajas temperaturas, escasa aireación, etc.), que endurecerá más rápidamente (estabilizando las fábricas, facilitando la superposición de capas, etc.) y que alcanzará mayor resistencia tanto a los agentes de deterioro como a los esfuerzos mecánicos (posibilidad de uso en ambientes más agresivos de tipo marino, lluviosos y fríos, etc.). Pero también hay una parte aérea que fraguará más lentamente permitiendo los movimientos del mortero para su adaptación a los esfuerzos internos y externos (retracción de fraguado, cristalización o formación de productos expansivos, etc.), y que formará una estructura macroporosa que va a facilitar los intercambios de humedad del muro con el ambiente (capilaridades, condensaciones, lluvia, etc.) [8].

La cal hidráulica también difiere del cemento en los tiempos de “principio de fraguado” que oscilan entre los 60 min y 120 min y “final de fraguado” que fluctúan entre las 12 horas y las 40 horas dependiendo del tipo de cal hidráulica.

Por el contrario, la cal aérea es aquella que endurece en presencia de aire con mayor o menor contenido de humedad. Desde que la materia prima se extrae de la cantera hasta su puesta en obra sufre una serie de procesos conocidos como “ciclo de la cal”. En una primera fase se calcina la piedra caliza o dolomía para obtener cal viva (CaO o MgO); posteriormente se apaga con agua obteniendo cal apagada (portlandita: Ca(OH)_2 o brucita: Mg(OH)_2), componentes que cuando se ponen en contacto con el CO_2 atmosférico se transforma en calcita (y/o magnesita o hidromagnesita) [179].

El proceso de carbonatación del hidróxido cálcico se produce lentamente por la acción del CO_2 , al penetrar desde el exterior disuelto en agua. Por lo que se necesita

cierto grado de humedad ambiental para que se produzca la disolución, siendo el porcentaje ideal entre el 40% y el 85% [180].

Las características de las cales vienen reguladas por la norma UNE-EN 459-1 [181]. Dicha norma distingue entre cales aéreas cálcicas (CL), cales aéreas dolomíticas (DL), cales hidráulicas naturales (NHL), cales hidráulicas (FL) y cales hidráulicas artificiales (HL).

Para el desarrollo de esta tesis doctoral se han elegido dos tipos de cales, una cal hidráulica natural (NHL) en la realización de los ensayos llevados a cabo en la Universidad Politécnica de Madrid y una cal aérea CL 90 en la realización de los ensayos llevados a cabo en la Vilnius Gediminas Technical University.

Se optó por la utilización de cal hidráulica natural ya que representa un enlace entre los morteros con cemento Portland y los morteros anteriores al siglo XIX, mostrando más compatibilidad física, química y mecánica con los materiales utilizados en construcciones antiguas [182,183].

Dentro de las posibles cales hidráulicas existentes en el mercado, aparecen en la Tabla 3.6, se ha elegido una resistencia a compresión de 5 MPa, por ser la cal con mayor resistencia y por tener un tiempo de “final de fraguado” inferior a las 15 h, lo que permitirá la reducción del tiempo de desmoldado.

Tipo	Resistencia a compresión (MPa)	
	7 días	28 días
NHL 2	-	≥ 2 a ≤ 7
NHL 3,5	-	≥ 2 a ≤ 10
NHL 5	≥ 2	≥ 2 a ≤ 15

Tabla 3.6. Resistencia a compresión de cales hidráulicas naturales según UNE-EN 459-1 [181].

No obstante, la cal hidráulica natural tiene una disponibilidad reducida en comparación con la cal aérea en muchos países del norte de Europa [184]. Por dicho motivo, para los ensayos realizados en Vilnius se emplearon morteros mixtos, combinando cemento y cal aérea. Silva et al. [185] afirma que existe una gran similitud entre los morteros de cal hidráulica y los morteros mixtos, si la cantidad de cemento empleado es superior al 25% de la masa total de conglomerante de modo que haya un aumento de fuerza a edad temprana e inferior al 50% para no afectar significativamente la compatibilidad.

La designación completa de las cales usadas en este estudio sería la siguiente:

- NHL 5. Cal hidráulica natural, con una clase resistente media de 5 MPa (Figura 3.2a).
- CL 90-S. Cal aérea cálcica hidratada (Figura 3.2b).

Figura 3.2. a) Cal hidráulica natural NHL 5. b) Cal aérea cálcica CL 90-S.

3.2.2 Características según el fabricante

Las cales empleadas en el desarrollo de esta tesis doctoral han sido suministradas por:

- NHL 5. Fábrica Chaux & Enduits, situada en la localidad de Saint-Astier (Francia).
- CL 90-S. Fábrica del grupo Lhoist, situada en la localidad de Ekaterimburgo (Rusia).

Las características técnicas de la cal hidráulica natural se resumen en las Tablas 3.7 y 3.8 y la de cal aérea en la Tabla 3.9.

Características físicas y mecánicas		
Tiempo de inicio de fraguado	(min)	≥ 60
Finura Blaine	(cm ² /g)	7882
Expansión	(mm)	0,8
Agua libre	(%)	0,55
Resistencia a compresión 7 días	(MPa)	≥ 2,0
Resistencia a compresión 28 días	(MPa)	≥ 5,0
Resistencia a flexión 7 días	(MPa)	≥ 0,9
Resistencia a flexión 28 días	(MPa)	≥ 1,3

Tabla 3.7. Características físicas y mecánicas de la cal hidráulica empleada.

Características químicas		
SO ₃	(%)	2,6
Cal libre	(%)	10,2
Residuo	(%)	≤ 15

Tabla 3.8. Características químicas de la cal hidráulica empleada.

Características químicas		
CaO + MgO	(%)	≥ 90
MgO	(%)	≤ 5
CO ₂	(%)	≤ 4
SO ₃	(%)	≤ 2
Cal útil	(%)	≥ 80

Tabla 3.9. Características químicas de la cal aérea empleada.

3.2.3 Caracterización física

3.2.3.1 Densidad real de la cal

Este parámetro se ha obtenido de acuerdo con la norma UNE 80103 [177], siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.2.3.1. El valor obtenido de la densidad real de las cales ensayadas se muestra en la Tabla 3.10.

Tipo de cal	Densidad real (g/cm ³)
NHL 5	2,75
CL 90-S	2,20

Tabla 3.10. Densidad real de la cal.

3.2.4 Caracterización química

Los ensayos para determinar las propiedades químicas de la cal vienen recogidos en la norma UNE-EN 459-2 [186]. En nuestro caso, los datos químicos se han recogido directamente de la ficha técnica del fabricante como se indica en la Tabla 3.8 y 3.9.

3.3 Árido

Los áridos que forman parte de los morteros son materiales granulares inorgánicos inertes de tamaño variable.

Según su procedencia y método de obtención, los áridos pueden clasificarse en áridos naturales, artificiales y reciclados. Los áridos naturales son aquellos que procedentes de yacimientos minerales obtenidos solo por procedimientos mecánicos. Estos áridos pueden a su vez clasificarse en áridos granulares y áridos de machaqueo.

Según el tamaño del árido se dividen en árido fino (arena) y árido grueso (grava). Árido fino es el material que pasa por el tamiz de 4 mm de luz de malla y árido grueso el que queda retenido.

En la investigación realizada en esta tesis doctoral se han utilizado dos arenas de naturaleza silíceas; una procedente de la localidad de Madrid (España) y la otra de la localidad de Vilnius (Lituania); elegidas ambas por la cercanía y por ser empleada habitualmente en la construcción. Estas arenas corresponden al grupo de los áridos granulares, que son aquellos que se obtienen fundamentalmente de graveras que explotan depósitos granulares. Tienen forma redondeada, con superficies lisas y sin aristas. La designación de ambas arenas según la norma UNE 146901 [187] es la siguiente: AF-R-0/4-S.

Ambos tipos de arenas fueron recibidas en el laboratorio con un 10-15% de humedad, por lo que se procedió a secarlas en estufa a 105 °C. Tras un día en la estufa, la arena fue almacenada en recipientes cerrados para evitar en lo posible la ganancia de humedad que pudiera influir en el contenido de agua final del mortero.

La arena utilizada en los ensayos realizados en la Universidad Politécnica de Madrid se ha recibido en el laboratorio en bolsas de 20 kg directamente desde la gravera y fue tamizada por la malla de 4 mm. Mientras que la arena utilizada en el programa experimental llevado a cabo en la Vilnius Gediminas Technical University fue recibida a granel y tamizada con una malla de 4 mm para los morteros empleados en la confección del muro y con una malla de 2 mm cuando los morteros a realizar eran de revestimiento.

Aunque el árido no toma parte activa en el fraguado y el endurecimiento del mortero, conforma la mayor parte de su volumen y desempeña un papel técnico muy importante en sus características. Por tanto, es importante conocer sus características físicas y químicas.

La caracterización de la arena se ha realizado acorde a la norma UNE-EN 13139/AC [188,189], que define los distintos tipos de áridos que se pueden emplear en los morteros y establece las exigencias para estos materiales, que se especifican en los apartados siguientes. Tal y como se acaba de especificar, según esta norma la naturaleza de los dos áridos empleados sería de origen granular natural.

3.3.1 Caracterización física

3.3.1.1 Granulometría y finos

La primera clasificación que considerar en la caracterización de una arena es su granulometría. Para la determinación de las propiedades geométricas del árido se han elegido los tamices de tela metálica trenzada acordes a la norma UNE-EN 933-2 [190], con luz de malla en mm de:

$$4,00 - 2,00 - 1,00 - 0,50 - 0,25 - 0,125 - 0,063$$

Para la elaboración del mortero se ha fijado un tamaño máximo de 4 mm y un tamaño mínimo de 0 mm, según indica la normativa vigente, y que depende del uso y del espesor. En las Tablas 3.11 y 3.12 aparecen los datos extraídos de la norma UNE-EN 13139 [188], que establece los límites superior e inferior y el porcentaje máximo de finos para el tamaño de árido 0/4 mm.

Tamaño de árido (mm)	Límites en % (en masa) que pasa				
	Límites superiores			Límites inferiores	
	$2 D$	$1,4 D$	D	d	$0,5 d$
0/4	100	95 a 100	85 a 99	No se fijan	

Tabla 3.11. Límites superior e inferior para el árido 0/4. UNE-EN 13139 [188].

Tamaño de árido (mm)	Porcentaje máximo que pasa por el tamiz 0,063 mm		
	Categoría 1*	Categoría 2*	Categoría 3*
0/4	3	5	8

* Categoría 1. Morteros para pavimentos, proyectados, reparación, pastas (todos los áridos).

* Categoría 2. Morteros para revocos y enlucidos (todos los áridos).

* Categoría 3. Morteros para albañilería (todos los áridos, excepto la roca triturada).

Tabla 3.12. Límite del contenido en finos para el árido 0/4. UNE-EN 13139 [188].

El tamizado de la arena se ha realizado según la norma UNE-EN 933-1 [191], siguiendo el procedimiento que se muestra a continuación. En primer lugar, se cuarteo la arena según la UNE-EN 933-2 [190] y se seca la muestra hasta masa constante. Seguidamente se cogen 300 g de material, se lava a través del tamiz de 0,063 mm y se vuelve a secar; para concluir se tamiza por la serie de mallazos (Figura 3.3).

Figura 3.3. Columna de tamizado: a) UPM. b) VGTU.

Se ha determinado la granulometría por duplicado. Los valores de las granulometrías de cada arena empleada se muestran en la Tabla 3.13 y aparecen representados en la Figura 3.4.

Tamiz mm	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	Fondo
Granulometría Madrid	100	87,1	70,1	40,5	16,5	4,4	0	0
Granulometría Vilnius 4/0	100	88,5	67,1	26,2	7,9	0,1	0	0
Granulometría Vilnius 2/0	-	100	80,0	34,9	10,1	1,0	0	0

Tabla 3.13. % de arena que pasa por la serie de mallas.

El porcentaje de finos que pasa por el tamiz 0,063 mm es de 1,8 %, 0,9% y 1,1%, respectivamente, cumpliendo con el límite de contenido en finos de la norma UNE EN 13139 [189], la cual especifica que, para morteros para reparaciones, pastas y morteros de albañilería, debe haber un contenido máximo en finos del 3%, tal y como aparece reflejado en la Tabla 3.12.

Figura 3.4. Granulometría de la arena. Media de los dos ensayos.

3.3.1.2 Equivalente de arena

El equivalente de arena se ha determinado de acuerdo con la norma UNE-EN 933-8+A1 [192,193]. Esta prueba de laboratorio que se realiza con el objeto de determinar qué porcentaje de una muestra se puede considerar como arena. De manera sencilla, lo que se hace es separar por medio de una solución química las partículas finas de las arenas. Se considera que una arena tiene una excelente calidad si tiene un equivalente superior al 90%. Solo se realizó la prueba a la arena utilizada para los ensayos realizados en la Universidad Politécnica de Madrid.

La muestra de laboratorio debe reducirse de acuerdo con la norma UNE-EN 932-2 [190] para obtener dos submuestras. La primera submuestra se utiliza para determinar el contenido de agua y de finos de la muestra de laboratorio, y para preparar un árido fino de corrección. La segunda submuestra se utiliza para determinar el valor de equivalente de arena.

El procedimiento consiste en el llenado de las probetas con la solución de lavado hasta alcanzar la primera marca y el vertido de la muestra, dejando reposar las probetas durante 10 min. Al finalizar el periodo de 10 min, se procede al sellado las probetas con tapones de caucho y se agita durante 30 veces en máquina de agitación. Seguidamente, se enjuaga la probeta con la solución de lavado hasta la segunda marca de la probeta, asegurando que todo el material queda dentro de la probeta, para posteriormente dejar reposar la probeta durante 20 min.

Transcurrido este periodo se mide la altura h_1 , correspondiente a la altura de la suspensión con relación a la base de la probeta. Para concluir el ensayo, se coloca un pistón que repose sobre el sedimento y se determina la altura h_2 , midiendo la distancia entre la cabeza del pistón y la cara superior del disco. En la Figura 3.5. se muestran las distintas fases del ensayo.

Figura 3.5. Agitación de la probeta. Lavado de la probeta. Medición de la altura de la suspensión. Medición de la altura del sedimento.

El equivalente de arena se calcula utilizando la siguiente expresión (3.2):

$$SE = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (3.2)$$

Donde,

SE Equivalente de arena

h_2 Altura del sedimento en mm

h_1 Altura de la suspensión en mm

Los resultados obtenidos son los mostrados en la Tabla 3.14.

Equivalente de arena	
$SE = 83$	$SE = 87$
$SE = 85$	

Tabla 3.14. Resultados de equivalente de arena.

3.3.1.3 Densidad aparente de la arena

Esta propiedad se ha determinado según la norma UNE-EN 1097-3 [194]. La densidad aparente se obtiene dividiendo el peso del árido seco que llena un recipiente de volumen conocido (Figura 3.6) por el volumen interior de dicho recipiente.

Para asegurar la fiabilidad del ensayo, el procedimiento se realiza 3 veces rellenando el recipiente con la arena sin ejercer ningún tipo de compactación.

Figura 3.6. Pesada con el molde con capacidad de 1 litro relleno con arena.

Los resultados obtenidos son los indicados en la Tabla 3.15.

Densidad aparente de la arena (Mg/m^3)	
Arena Madrid	$\rho_{\text{bmedia}} = 1,512$
Arena Vilnius 4/0	$\rho_{\text{bmedia}} = 1,760$
Arena Vilnius 2/0	$\rho_{\text{bmedia}} = 1,801$

Tabla 3.15. Resultados de la densidad aparente de la arena.

3.3.1.4 Densidad de partículas de la arena

La densidad de partículas de la arena se ha determinado de acuerdo con la norma UNE-EN 1097-6 [195], usando el método del picnómetro. Es la relación entre la masa seca del árido y el volumen de agua que desplaza cuando se introduce en un picnómetro. Se realizó la prueba a la arena utilizada en los ensayos realizados en la Universidad Politécnica de Madrid.

A partir de la densidad aparente del árido y de la densidad aparente de las partículas se calcula la porosidad.

Se prepara la muestra según la norma UNE-EN 932-1 [191] y se cuarteo según la norma UNE-EN 933-2 [190]. La muestra, que debe ser igual o superior a 1 kilogramo, se lava para retirar las partículas adheridas que pasan por el tamiz 0,063, la muestra se introduce en el picnómetro y se realizan las pesadas según indica la norma (Figura 3.7).

Figura 3.7. Picnómetro con arena y picnómetro con arena y rellenado con agua.

La densidad de las partículas presecadas se calcula empleando la siguiente expresión (3.3):

$$\rho_p = \frac{M_2 - M_1}{V - \frac{M_3 - M_2}{\rho_w}} \quad (3.3)$$

Donde,

- ρ_p Densidad de partículas de arena expresada en Mg/m^3
- ρ_w Densidad del agua expresada en Mg/m^3
- M_1 Masa del picnómetro y del embudo expresada en g
- M_2 Masa del picnómetro, el embudo y la submuestra de ensayo expresada en g
- M_3 Masa del picnómetro, el embudo y la submuestra de ensayo y el agua expresada en g
- V Volumen del picnómetro, expresado en mm

Los resultados obtenidos son los indicados en la Tabla 3.16.

Densidad de partículas (Mg/m^3)		
$\rho_{p1} = 2,685$	$\rho_{p2} = 2,600$	$\rho_{p3} = 2,575$
$\rho_{pmedia} = 2,620$		

Tabla 3.16. Resultados de la densidad de partículas de la arena.

3.3.1.5 Porosidad de la arena

Se ha determinado según la norma UNE-EN 1097-3 [194]. El porcentaje de huecos es la proporción volumétrica de los huecos de recipiente y se calcula a partir de la siguiente ecuación (3.4):

$$v = \frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_p} \quad (3.4)$$

Donde,

v Porcentaje de huecos (porosidad)

ρ_a Densidad aparente de la arena expresada en Mg/m³

ρ_p Densidad de partículas de arena expresada en Mg/m³

Habiendo obtenido en los apartados anteriores una densidad media aparente de 1512 kg/m³, y una densidad media de partículas de 2620 kg/m³, se determina que el porcentaje medio de hueco (porosidad) de la arena presenta un valor de 42,29%.

3.3.1.6 Resumen de resultados de las propiedades físicas de la arena

En la Tabla 3.17 se resumen las características físicas de la arena obtenidas de los ensayos realizados en laboratorio.

Características de la arena				
Ensayo	Norma	Madrid	Vilnius	
Tamaño de la arena	UNE-EN 13139	4/0	4/0	2/0
Calidad de finos	UNE-EN 13139	Contrastado	Contrastado	
Forma de las partículas	UNE-EN 13139	No relevante	No relevante	
Contenido en finos	UNE-EN 933-1	1,8 %	0,9 %	1,1 %
Equivalente de arena	UNE-EN 933-8	85	-	
Densidad aparente	UNE-EN 1097-3	1,5 Mg/m ³	1,7 Mg/m ³	1,8 Mg/m ³
Densidad real	UNE-EN 1097-6	2,62 Mg/m ³	-	
Porosidad	UNE-EN 1097-3	42,29 %	-	

Tabla 3.17. Resumen de las características físicas de la arena.

3.3.2 Caracterización química

Según determina la norma UNE-EN 13139 [189], la aplicación particular final o el origen de los áridos y el filler del árido serán los que determinen la realización o no de ensayos de las propiedades químicas. En principio las arenas no contienen componentes que puedan afectar a la durabilidad o acabado superficial de los morteros.

Los ensayos para determinar las propiedades químicas de la arena vienen recogidos en la norma UNE-EN 1744-1+A1 [196]. En el análisis realizado, los datos químicos se han recogido directamente de las fichas técnicas del fabricante, que es la que indica que la arena está exenta de cloruros, sulfatos solubles y azufre, siendo por tanto, su concentración igual a cero.

3.4 Agua

El agua que se ha empleado es de naturaleza inocua. No contiene ningún agente en cantidades que alteren las propiedades del mortero, tales como sulfatos, cloruros, etc. De lo contrario, si el contenido en sales solubles es elevado podrían derivarse, por ejemplo, eflorescencias. En general, se pueden utilizar aquellas aguas cuya experiencia práctica se haya probado favorablemente.

El agua utilizada en el desarrollo de esta tesis doctoral procede de la red municipal del Ayuntamiento de Madrid dependiente del Canal de Isabel II, cuyo Servicio de Aguas nos ha proporcionado el análisis químico. El resultado es un agua de naturaleza inerte y sancionada como aceptable por la práctica, cuyas características se muestran en la Tabla 3.18. No se conocen las particularidades del agua utilizada en Vilnius, pero se presupone válida por su uso en el laboratorio de materiales de dicha universidad.

Parámetros fisicoquímicos	Unidades	Resultados
Olor	Índice de dilución	0,0
Sabor	Índice de dilución	0,0
Color	mg/l Pt/Co	<1,0
Ph	Ph	7,9
Turbidez	UNF	0,1
Conductividad	µS/cm	108,6
Nitratos	mg/l	0,6
Nitritos	mg/l	<0,05
Amonio	mg/l	<0,01
Cloro libre residual	mg/l	0,5
Fluoruro	mg/l	<0,1
Sodio	mg/l	2,3
Cloruro	mg/l	3,7
Sulfato	mg/l	5,3
Calcio	mg/l	17,8
Dureza total	°F	4,8
Bicarbonato	mg/l	59,3
Hierro	mg/l	0,01
Aluminio	mg/l	0,03
Cobre	mg/l	<0,005
Suma de trihalometanos	mg/l	<0,02

Tabla 3.18. Análisis del agua potable de la ciudad de Madrid 2015 según los datos del Servicio de Aguas del Ayuntamiento de Madrid adjunto al Canal de Isabel II.

3.5 Fibra de vidrio

Desde 1713 se conoce la preparación de fibra de vidrio y en 1886 Brunfaut las preparaba a escala semi-industrial. En la Primera Guerra Mundial se utilizaron a gran escala como aislante sustituyendo al asbesto. En 1931 dos compañías americanas, Owen Illinois Glass co. y Corning Glass Works, desarrollaron un método para el hilado del fundido del vidrio. No fue hasta 1967, cuando se empezó a producir fibra de vidrio con contenido en circonio resistente a los álcalis por parte de Pilkington Corporation [32].

La fibra de vidrio es de naturaleza inorgánica, fabricada a partir de vidrio con distintas composiciones que se funde a altas temperaturas en un crisol de Platino y Rodio, en el conocido como método directo.

Estos crisoles tienen en el fondo unas boquillas por las que fluye el vidrio en hilos sumamente delgados, formando monofilamentos que son estirados mecánicamente al ser enrollados en un cilindro que gira a gran velocidad, con lo que el mono filamento se reduce a 0,0045mm. Entre el crisol y el tambor de enrollado existe un dispositivo que pinta los filamentos con un aglutinante que tiene la función de: evitar que los monofilamentos se destruyan por la fricción, unir los monofilamentos y formar una hebra, evitar la fusión de hebras contiguas, ayudar a las subsecuentes operaciones de la hebra, no permitir la decoloración y ayudar a la adhesión de la resina con la fibra de vidrio. Estos carretes de fibra de vidrio pueden ser trenzados para la formación de “Woven Roving” (telas de refuerzo) o bien, cortados para producir fibra picada.

La fibra de vidrio AR utilizada en la presente investigación fue suministrada en bolsas de 500 g (Figura 3.8) por la empresa Fiber Eagle S.A situada en la localidad de madrileña de San Sebastián de los Reyes.

Figura 3.8. Fibra de vidrio.

3.5.1 Composición de la fibra de vidrio

La base de la fibra vidrio es la sílice (SiO_2) en su forma más pura que existe como polímero. Al tratarse de fibras AR, “resistente a los álcalis”, son ricas en circonio (ZrO_2) y en sodio (Na_2O). En la Tabla 3.19 se puede ver la composición de las fibras de vidrio AR.

Constitución	Contenido (%)
SiO_2	62,00
ZrO_2	17,30
Fe_2O_3	0,07
Al_2O_3	0,20
CaO	5,30
Na_2O	14,30
F	0,30

Tabla 3.19. Composición de las fibras de vidrio AR.

3.5.2 Propiedades de la fibra de vidrio

Las fibras de vidrio AR poseen unas propiedades mecánicas inferiores a las fibras de carbono y basalto (Tabla 3.20).

Propiedades mecánicas		
Densidad	(g/cm^3)	2,68
Módulo de elasticidad	(GPa)	72
Resistencia a tracción	(GPa)	1,7
Elongación hasta fractura	(%)	4,3
Módulo elástico específico	(GPa por g/cm^3)	30
Fuerza de tensión específica	(GPa por g/cm^3)	0,5 - 1
Longitud	(mm)	12

Tabla 3.20. Propiedades mecánicas de las fibras de vidrio.

Al tratarse de fibras de vidrio AR poseen una alta resistencia a los ácidos y a los álcalis, siendo estables químicamente dentro de una matriz cementicia. Además, poseen una baja conductividad térmica y eléctrica.

3.6 Fibra de carbono

Roger Bacon, creó en 1958 las fibras de alto rendimiento de carbono en el Centro Técnico Union Carbide Parma en Cleveland, Ohio. Estas fibras se fabricaban mediante el calentamiento de filamentos de rayón hasta carbonizarlos, pero este proceso resultó ser ineficiente, ya que las fibras resultantes contenían solo un 20% de carbono y presentaban bajas resistencias y escasa rigidez. No fue hasta 1961 cuando se desarrolló un proceso por Akio Shindo de la Agencia de Ciencia Industrial Avanzada y Tecnología de Japón, utilizando poliacrilonitrilo (PAN) como materia prima, lo que permitió la obtención de fibra de carbono con un contenido cercano al 55% [197].

La fibra de carbono se define como una fibra que contiene al menos un 92% en peso de carbono, mientras que la fibra que contiene por lo menos un 99% se la denomina fibra de grafito [198]. Las fibras de carbono tienen generalmente excelentes propiedades a tracción, baja densidad, alta estabilidad térmica y química en ausencia de agentes oxidantes y unas excelentes conductividades térmicas y eléctricas.

El mercado actual de la fibra de carbono está dominado por las fibras de poliacrilonitrilo (PAN) de carbono. En general, las fibras de carbono se fabrican por una pirolisis controlada de las fibras precursoras estabilizadas entre los 200°C y 400°C mediante un proceso de oxidación. Las fibras estabilizadas se someten a un tratamiento de alta temperatura (1000 °C) para eliminar el hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y otros compuestos que no son carbono, en un proceso denominado carbonización. Se concluye mediante un nuevo calentamiento a una temperatura de 3000 °C denominado grafitización, que logra aumentar el tamaño de los cristales de carbono y mejora la orientación molecular, dando como resultado un mayor contenido en carbono y un mayor módulo de Young. Antes del envasado, las superficies son tratadas con un producto catalizador para mejorar la adhesión a la matriz [199].

La fibra de carbono utilizada en el presente trabajo de investigación procede de la empresa Mapei S.A. Fue suministrada en rollos, ya que tenía formato de “tejido de fibra de carbono” y posteriormente fue cortada con la longitud deseada (Figura 3.9).

Figura 3.9. Fibra de carbono.

3.6.1 Composición de la fibra de carbono

Las fibras de carbono proceden de una mezcla de polímeros. El más empleado es el PAN (poliacrilonitrilo), que por ser la materia prima se llama precursor, y que generalmente se combina con otros polímeros: metil acrilato, metil metacrilato, vinil acetato y cloruro de vinilo, todos derivados del petróleo, que es carbono concentrado, proveniente de restos de materia orgánica (fósiles) [200].

En particular, el PAN es una fibra de plástico compuesta por largas cadenas de moléculas de carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno en forma de escalera. Cuando el PAN se calienta, en las condiciones idóneas de temperatura las cadenas de moléculas de carbono se juntan mientras los demás elementos se separan. Los átomos de carbono del polímero cambian de distribución y forman una estructura estable de anillos fuertemente unidos que soportan los unos a los otros.

Mediante un nuevo calentamiento, los anillos se juntan en “listones” de hexágonos de átomos de carbono muy flexibles, a diferencia del grafito, cuya estructura permanece plana. La unión flexible de los listones evita que se deslicen, como pasa en la estructura plana del grafito, lo que resulta en un notable incremento en la resistencia del material.

3.6.2 Propiedades de la fibra de carbono

Las fibras de carbono poseen unas propiedades mecánicas superiores a las fibras de vidrio y basalto como muestra la Tabla 3.21.

Propiedades mecánicas		
Densidad	(g/cm ³)	1,79
Módulo de elasticidad	(GPa)	230
Resistencia a tracción	(GPa)	4,5
Elongación hasta fractura	(%)	2,1
Resistencia eléctrica	(10 ⁻² Ωcm)	1
Conductividad térmica	(W/mk)	20
Longitud	(mm)	12

Tabla 3.21. Propiedades mecánicas de las fibras de carbono.

Por otra parte, las fibras de carbono presentan propiedades térmicas y electromagnéticas destacables, siendo esta última muy interesante para la fabricación de materiales de base cementicia conductores multifuncionales, campo estudiado por diversos autores [201]. Al mismo tiempo se pueden considerar químicamente inertes, excepto en ambientes fuertemente oxidantes o en contacto con materiales fundidos.

3.7 Fibra de basalto

Paul Dhe en 1923 obtuvo una patente estadounidense para la extrusión de filamentos de basalto, sin embargo, pasaron varias décadas para que se produjeran con éxito las primeras fibras de basalto continuas. En 1960 tanto EEUU como la URSS comenzaron su investigación para aplicaciones militares. Mientras que Owens Corning y otras compañías de vidrio estadounidenses abandonaban sus programas de I+D, en Europa del Este continuaron, consiguiéndose la primera fibra de basalto continua en Ucrania a finales de los años 80 [63].

La fibra de basalto se obtiene mediante la extrusión de roca ígnea volcánica con base de basalto, procedente de la lava. Se fabrica a partir de polvo de basalto finamente molido, que funde a alrededor de 1500 °C a 1700 °C, para producir un líquido vítreo fundido que se extruye en forma de hilos con grosores de 10 a 20 μm [202].

El proceso de extrusión de la fibra de basalto es más sencillo y eficiente energéticamente que otras fibras [203]. Las propiedades de las fibras de basalto son mejores que las de las fibras de vidrio y más baratas que sus homólogas de carbono [204].

Es una fibra inorgánica con un alto módulo de elasticidad, alta resistencia, buena deformación a la rotura, resistente a altas temperaturas, excelente estabilidad, buena resistencia química, y es fácil de procesar [205].

La fibra de basalto utilizada en el presente estudio procede de la empresa Mapei S.A. Fue suministrada en rollos ya que tenía formato de “tejido de fibra de basalto” y posteriormente fue cortada con la longitud deseada (Figura 3.10)

Figura 3.10. Fibra de basalto.

3.7.1 Composición de la fibra de basalto

El basalto es químicamente rico en óxidos de magnesio, calcio, sodio, potasio, silicio y hierro, junto a trazas de alúmina. Las fibras están compuestas químicamente de piroxeno, clinopiroxeno, olivino, plagioclasa y minerales. En la Tabla 3.22 se puede ver la composición química típica de las fibras de basalto según las investigaciones desarrolladas por Militky et al. [206] y Deak y Czigany [207].

Constitución	Contenido (%)	
	[206]	[207]
SiO ₂	43,3 - 47	42,43 - 55,69
Al ₂ O ₃	11 - 13	14,21 - 17,97
Fe ₂ O ₃	< 5	10,80 - 11,68
CaO	10 - 12	7,43 - 8,88
MgO	8 - 11	4,06 - 9,45
Na ₂ O	< 5	2,38 - 3,79
TiO ₂	< 5	1,10 - 2,55
K ₂ O	< 5	1,06 - 2,33

Tabla 3.22. Composición de las fibras de basalto por diferentes autores.

3.7.2 Propiedades de la fibra de basalto

Las fibras de basalto tienen unas propiedades mecánicas superiores a las de la fibra de vidrio, pero inferiores a las fibras de carbono como muestra la Tabla 3.23.

Propiedades mecánicas		
Densidad	(g/cm ³)	2,75
Módulo de elasticidad	(GPa)	91
Resistencia a tracción	(GPa)	4
Elongación hasta fractura	(%)	1,8
Módulo elástico específico	(GPa por g/cm ³)	31,78
Fuerza de tensión específica	(GPa por g/cm ³)	1
Longitud	(mm)	12

Tabla 3.23. Propiedades mecánicas de las fibras de basalto.

Por otra parte, las fibras de basalto no son combustibles, tienen una alta estabilidad química, y una buena resistencia a la intemperie, alcalina y a la exposición de ácidos.

3.8 Aditivos

Los aditivos son, por definición, sustancias añadidas en pequeñas cantidades, antes o durante la mezcla del mortero. Su proporción no supera el 5% de la masa del conglomerante, pero aporta a las propiedades de las mezclas algunos cambios específicos y con carácter permanente, tanto en estado fresco como estado endurecido.

Estos productos pueden producir una única modificación en las características del mortero (función principal); o bien, además, modificaciones adicionales (funciones secundarias).

A partir de la experiencia previa del Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de edificación de Madrid en el empleo de aditivos para mejorar diferentes propiedades, se ha elegido el aditivo Glenium Sky 604 (Figura 3.11).

Figura 3.11. Plastificante Glenium Sky 604.

Las características técnicas del aditivo se resumen en la Tabla 3.24.

Características del Glenium Sky 604	
Función principal	Reductor de agua de alta actividad
Efecto secundario	Riesgo de disgregación a dosis elevadas
Aspecto físico	Líquido amarillento turbio
pH (20 °C)	5,5 ± 1
Densidad (20° C)	1,048 ± 0,02 g/cm ³
Viscosidad 20° C Brookfield Sp00/50rpm	< 100 cps
Contenido en cloruros	< 0,1%

Tabla 3.24. Características del Glenium Sky 604.

Este aditivo se recibe desde la casa comercial en estado líquido en garrafas de 25 kg. El empleo de aditivos en estado líquido permite que la dispersión en la masa se realice más fácilmente que con los sólidos, dando como resultado morteros más homogéneos.

El aditivo Glenium Sky 604 pertenece al grupo de los aditivos superplastificantes o reductores de agua de alta actividad, cuya materia prima son los condensados de formaldehído-β-naftalensulfonato (BNS). La estructura química es la que se muestra en la Figura 3.12.

Figura 3.12. Estructura química del BNS. Fuente: BASF [208].

Estos aditivos están formados por macromoléculas tensoactivas capaces de neutralizar las cargas eléctricas de los granos de cemento y, por consiguiente, su capacidad de floculación (Figura 3.13). Dichas macromoléculas tensoactivas tienen un extremo de su cadena hidrófilo con afinidad por el agua y otro hidrófobo repulsor del agua (Grupos polares aniónicos), con lo cual quedan adsorbidas y orientadas en la superficie de los granos del cemento [209].

Figura 3.13. Comportamiento de los aditivos con base BNS. Fuente: BASF [208].

Las ventajas generales que a priori se esperan en el mortero fresco son un incremento de la trabajabilidad, una reducción de la demanda de agua, así como una disminución de la segregación. Los efectos producidos en estado fresco repercuten en las propiedades generales del mortero endurecido, mejorando la resistencia hielo-deshielo, reduciendo la permeabilidad e incrementando la resistencia a los sulfatos. En principio, también es previsible una mejora de la resistencia a compresión.

Estos aditivos deben cumplir la norma UNE-EN 934-3 [210], (Tabla 3.25) aunque la inclusión progresiva de los distintos tipos de fibras también modifica las propiedades de los morteros.

Propiedad	Mortero de referencia	Método de ensayo	Requisito
Contenido en aire después de un amasado normalizado.	EN 480-13	EN 1015-7 método A	$A_1 = (17 \pm 3) \%$, en volumen
Contenido de aire después de 1h en reposo	EN 480-13	EN 1015-7 método A	$\geq A_1 - 3\%$
Contenido en aire después de un amasado prolongado	EN 480-13	EN 1015-7 método A	$\leq A_1 + 5\%$ $\geq A_1 - 3\%$
Reducción de agua requerida para la consistencia normalizada	EN 480-13	EN 480-13	$\geq 8\%$ en masa
Resistencia a compresión a 28 días	EN 480-13	EN 1015-11	Morteros con aditivo $\geq 70\%$ del mortero testigo

Tabla 3.25. Requisitos adicionales para morteros con aditivos.

3.9 Ladrillo

La obra de fábrica de ladrillo se define, según las prescripciones del Instituto Eduardo Torroja [211], como “todo elemento obtenido por la colocación de ladrillos, uno junto a otro y sobre otros ordenadamente y solapando de acuerdo con unas determinadas leyes de traba”. Gran parte de sus propiedades mecánicas dependen de las propiedades de los ladrillos que la componen, definiéndose como un material inorgánico en forma de paralelepípedo rectangular, normalmente elaborados a partir de arcilla cocida.

Los ladrillos utilizados en la campaña experimental desarrollada en la Vilnius Gediminas Technical University cumplen las tolerancias de la normativa europea UNE EN 771-1+A1 [212,213] empleada para la fábrica de albañilería de forma ortoédrica, fabricadas por molde, secado y cocción de una pasta arcillosa. Los ladrillos fueron suministrados por la ladrillera Švenčionėlių keramika situada en la localidad de Švenčionėliai (Lituania). Las dimensiones de los ladrillos se muestran en la Figura 3.14 y Tabla 3.26.

Figura 3.14. Ladrillo de 250x65x120 mm.

Tipo de ladrillo	Ladrillo macizo
Soga (mm)	250
Tizón (mm)	120
Canto (mm)	65

Tabla 3.26. Características geométricas del ladrillo.

Para determinar las características físicas y mecánicas del ladrillo se realizaron una serie de ensayos que se describen a continuación.

3.9.1 Succión o tasa inicial de absorción de agua por capilaridad

La succión superficial de los ladrillos, que está asociada a la composición química y a la cantidad y configuración de sus poros abiertos (tamaño, interconexión), tiene gran importancia en la adherencia del ladrillo con el mortero. Una succión muy alta puede llevar a la deshidratación del mortero, siempre que no se adopte la precaución de humedecer adecuadamente la pieza antes de su colocación. Este hecho produce discontinuidades en la interfase ladrillo–mortero, originando fisuras por las que puede pasar el agua a través del muro.

Por el contrario, una succión muy baja o nula imposibilita la adherencia mecánica conseguida mediante el anclaje de las agujas del cemento hidratado en los poros de la superficie del ladrillo.

El ensayo de absorción de agua por capilaridad se realiza según las directrices técnicas que marca la norma UNE-EN 772-11 [214]. La tasa de absorción mide la cantidad de agua absorbida en función de la superficie de contacto y el tiempo de inmersión con agua de cada ladrillo.

Para ello, los ladrillos, previamente secados a 105 °C hasta masa constante, se sumergen en agua hasta una profundidad de 5 mm (Figura 3.15) y se mantienen durante 60 segundos, momento en el cual se sacan, se retira el agua de las superficies y se pesan.

Figura 3.15. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad.

La tasa inicial de absorción de agua por capilaridad se calcula empleando la siguiente ecuación (3.5):

$$c_{w,i} = \frac{m_{so,s} - m_{seco,s}}{A_s} \times 10^3 \quad (3.5)$$

Donde,

- $c_{w,i}$ Tasa inicial de absorción de agua en $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$
- $m_{so,s}$ Peso del ladrillo al minuto de la inmersión en g
- $m_{seco,s}$ Peso del ladrillo seco en g
- A_s Área bruta de la cara del ladrillo sumergido en mm^2
- t Tiempo igual a 1 min

Se ensayaron un total seis ladrillos, obteniéndose una tasa inicial de absorción de agua por capilaridad obtenida de $1,7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$.

También se determinó el contenido de humedad de los ladrillos mantenidos en condiciones de laboratorio (3.6), así como el porcentaje máximo de absorción de agua (3.7) a partir de las siguientes ecuaciones:

$$h_{l,cl} = \frac{m_{cl} - m_{seco}}{m_{seco}} \times 100 \quad ; \quad h_{l,sat} = \frac{m_{cl} - m_{sat}}{m_{seco}} \times 100 \quad (3.6) ; (3.7)$$

Donde,

- $h_{l,cl}$ Humedad del ladrillo en condiciones de laboratorio en %
- $h_{l,sat}$ Humedad máxima del ladrillo en %
- m_{cl} Peso del ladrillo en condiciones de laboratorio en g
- m_{sat} Peso del ladrillo saturado en g
- $m_{seco,s}$ Peso del ladrillo seco en g

La humedad de los ladrillos se muestra en la Tabla 3.27.

Humedad de los ladrillos (%)	
Condiciones de laboratorio	4
Saturado	20

Tabla 3.27. Contenido de agua de los ladrillos.

3.9.2 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión es el parámetro fundamental a la hora de caracterizar un ladrillo, siendo indicativa de su calidad. La resistencia a compresión nos proporciona una idea de la cohesión interna de la pieza, indicándonos su capacidad de soportar cargas.

Previamente al ensayo de compresión, fue necesario el alisado de las tablas del ladrillo mediante una pulidora de diamante, para satisfacer los requisitos de planicidad y de paralelismo indicados en la norma (Figura 3.16a). El acondicionamiento de los ladrillos se llevó a cabo secándolos a una temperatura de 105 °C hasta masa constante y dejándolos enfriar a temperatura ambiente antes de la realización del ensayo.

La resistencia a compresión se determina según establece la norma UNE-EN 772-1+A1 [215,216]. El ensayo se realiza utilizando la máquina de ensayo Walter+bai ag modelo DV 2000. Los ladrillos se introducen entre los platos de la prensa y se aplica una carga a velocidad uniforme de 2 kN/s hasta la rotura (Figura 3.16b).

Figura 3.16. a) Acondicionamiento de los ladrillos mediante pulido. b) Rotura a compresión del ladrillo.

La resistencia a compresión, f_b , de cada probeta se calcula por medio de la siguiente expresión (3.8):

$$f_b = \frac{F}{A} * d \quad (3.8)$$

Donde,

- f_b Resistencia a compresión en MPa
- F Carga máxima aplicada a la probeta en N
- A Área bruta del ladrillo mm²
- d Factor de forma

Las seis unidades ensayadas obtuvieron una resistencia a compresión de los ladrillos igual a 45 MPa.

3.9.3 Características según el fabricante

Otras características aportadas por el fabricante se muestran en la Tabla 3.28.

Otras características		
Categoría de tolerancia		T2
Reacción al fuego		A1
Difusión de vapor de agua		5/10
Densidad	Kg/m ³	1600-1700
Conductividad térmica	W/mk	0,51
Fuerza a la adhesión	MPa	0,15

Tabla 3.28. Características aportadas por el fabricante.

4

CARACTERIZACIÓN DE LOS MORTEROS

Para caracterizar un nuevo material de construcción es necesario llevar a cabo una serie de ensayos encaminados a obtener sus características físicas, químicas y mecánicas, comparando los resultados que se obtienen con materiales similares ya existentes que se toman como referencia [217,218].

En la investigación llevada a cabo en esta tesis doctoral, las mezclas van a ser morteros formados por la unión de cemento o cal hidráulica, árido y agua, modificados con adiciones de fibras de vidrio, carbono y basalto y en algunos casos con aditivos.

En este capítulo se va a estudiar la proporción idónea de fibras que se pueden añadir a una mezcla para conseguir morteros con propiedades de ductilidad mejoradas que por sus características sean susceptibles de utilizarse como material de construcción mejorando los materiales existentes.

Es evidente que las proporciones de los componentes en la mezcla determinarán las características del mortero, tanto en estado fresco como endurecido, por lo que estas propiedades se tendrán que estudiar de forma conjunta en ambos estados físicos.

El mortero es un material que puede ser empleado en distintas aplicaciones en construcción, debido a las siguientes propiedades:

- Adaptabilidad. Facilidad para adaptarse a cualquier forma.
- Facilidad de aplicación. No requieren equipos muy sofisticados para su puesta en obra, pudiendo ser aplicados manualmente, por bombeo o por proyección.
- Diseñables. El mortero ofrece la posibilidad de adaptar sus características a los requerimientos solicitados modificando su composición y/o la dosificación.

Según la asociación nacional de fabricantes de morteros, de acuerdo con su aplicación constructiva, los morteros se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- Morteros para formación de fábricas
- Morteros de revestimiento
- Mortero para solados
- Morteros cola
- Morteros de reparación
- Morteros impermeabilizantes

La definición de los parámetros necesarios para caracterizar un material está siempre relacionada con los usos que se quiera dar al mismo. Los morteros que vamos a estudiar en este capítulo estarían englobados en estas dos categorías en función de su uso:

- Mortero de albañilería: Mezcla compuesta por uno o varios conglomerantes inorgánicos, áridos, agua y a veces adiciones y/o aditivos, para fábricas de albañilería (fachadas, muros, pilares, tabiques), rejuntado y trabazón de albañilería y revocos exteriores o enlucidos interiores [219].

- Mortero de reparación: “Mezcla compuesta por uno o varios conglomerantes inorgánicos, áridos, agua y a veces adiciones y/o aditivos, que cumplen con las prestaciones marcadas por las normas UNE-EN 1504-3 [174] y UNE-EN 1504-4 [220].

El mortero de albañilería tiene un amplio uso en la construcción de obras, especialmente en edificación, donde generalmente se ejecutan enlucidos o revocos, así como muros de fábrica, mientras que los morteros de reparación, aunque tienen un menor uso, se han utilizado más en los últimos años debido al aumento de las rehabilitaciones y reparaciones en los edificios existentes.

Estas mismas normas distinguen entre morteros diseñados y morteros prescritos. La dosificación de los componentes de los morteros diseñados se ha realizado en fábrica, y la puesta en obra del mortero se debe realizar de acuerdo con las instrucciones del fabricante para obtener las prestaciones declaradas. Sin embargo, en el mortero prescrito la dosificación la debe realizar el director del proyecto, o en su caso el director de la obra, en base a resultados obtenidos por el conocimiento y experiencia, sin existir garantías precisas de las prestaciones del mortero, es decir, sin evaluación previa. Por ello, a la hora de indicar los requisitos para los morteros en estado fresco o en estado endurecido las normas establecen ciertas diferencias entre los morteros diseñados y los morteros prescritos [221].

Los morteros elaborados con fibras de esta tesis doctoral se incluyen en el grupo de los morteros diseñados, ya que, salvo en contadas ocasiones, no hay experiencia contrastada de las prestaciones de estos morteros puestos en obra, por lo que no se pueden establecer proporciones predeterminadas en base a resultados derivados de la experiencia.

4.1 Diseño de morteros

La elección de las dosificaciones a realizar es una de las decisiones más relevantes durante el estudio de un material o compuesto en general. Los cambios que se realicen en la composición de la mezcla supondrán variaciones en los resultados de los ensayos, que posteriormente serán analizados para determinar la influencia que tienen estos en conjunto del material.

4.1.1 Morteros de referencia

Los morteros de referencia tradicionales y usados habitualmente en obra se incluyen en el grupo de morteros prescritos, pues las proporciones son las que se han fijado en los proyectos y en las obras, y en todo caso, son proporciones basadas en la experiencia, no existiendo ninguna normativa que lo defina.

Con cada uno de los conglomerantes estudiados en el capítulo anterior, se han elaborado morteros de referencia con una relación de componentes en peso conglomerante-arena (C/A) de 1/3, según la Tabla 4.1.

Relación C/A en peso	Cemento (kg)	Cal hidráulica (kg)	Arena (kg)
1/3	490	490	1470

Tabla 4.1. Dosificación en peso del conglomerante y de la arena por m³.

La proporción entre el conglomerante y el agua va a determinar la trabajabilidad del mortero y va a influir en las prestaciones de éste. La relación agua-conglomerante debe ser óptima para conseguir una consistencia adecuada para la correcta puesta en obra, normalmente una consistencia plástica. Por tanto, dicha relación debe ser tal que el valor del escurrimiento esté dentro de los límites fijados en la norma UNE-EN 1015-2 [222,223], que establece unos valores límites en función de la densidad aparente del mortero fresco que marca la norma UNE-EN 1015-6 [224,225], de acuerdo con la Tabla 4.2.

Densidad aparente del mortero fresco (kg/m ³)	Valor de escurrimiento (mm)
> 1200	175 ± 10
> 600 a ≤ 1200	160 ± 10
> 300 a ≤ 600	140 ± 10
≤ 300	120 ± 10

Tabla 4.2. Valor del escurrimiento. Norma UNE-EN 1015-2 [222,223].

Una vez realizadas las amasadas de prueba para conseguir la consistencia adecuada, se observó que la necesidad de emplear relaciones agua-conglomerante superiores a 1,2 para cumplir el valor de escurrimiento que establece la norma cuando se trata de morteros con adiciones de fibras superiores al 0,66%. La Figura 4.1, muestra un claro ejemplo de lo citado, comprobándose que el mortero de cemento con una relación agua-conglomerante de 0,95 se queda compacto y no “escurre” cuando se producen las sacudidas, debido a las propiedades ligantes de las fibras, sin embargo, se produce una exudación del agua sobrante. Por tanto, este ensayo no permite discernir la trabajabilidad de los morteros.

Figura 4.1. Amasada de prueba con una relación agua-conglomerante de 0,95.

Con objeto de poder realizar una comparativa entre las diferentes mezclas y que ésta no estuviera desvirtuada por la excesiva relación agua-conglomerante, se procedió a buscar una relación fija para todas las mezclas, con la condición imperativa de que fueran fácilmente trabajables, comprobando que los valores de 0,65 para morteros de cemento y de 0,73 para morteros de cal hidráulica satisfacen los requisitos previstos,

4.1.2 Morteros con adición de fibras.

Para el diseño de los morteros con adición de fibras, se procedió a agregar a los morteros de referencia una cantidad de fibra determinada. Se realizaron mezclas con adición de los distintos tipos de fibras en porcentajes crecientes. Estas adiciones se han realizado en función del volumen total de mortero, teniendo en cuenta la densidad de las fibras y dosificando con su equivalente en peso, en las siguientes proporciones:

- Mortero de referencia, sin adición de fibras
- Adición de un 0,33% de fibras en volumen de mortero
- Adición de un 0,66% de fibras en volumen de mortero
- Adición de un 1% de fibras en volumen de mortero
- Adición de un 1,33% de fibras en volumen de mortero

Para lo que fue necesario la elaboración de cuatro morteros, para cada una de las cuatro fibras (vidrio, carbono, basalto y mezcla de vidrio y carbono) y para cada uno de los dos conglomerantes, más los morteros de referencia, lo que hace un total de treinta y cuatro dosificaciones distintas.

4.1.3 Procedimiento de amasado

El amasado es un factor determinante en las características físicas y mecánicas del mortero endurecido. Una variación en los tiempos de amasado, en la maquinaria o en el ambiente puede suponer variaciones de las mismas.

Figura 4.2. Amasadora utilizada y pala de amasado.

Figura 4.3. Amasado de mortero y retirada del mortero adherido.

4.1.4 Fabricación de las probetas

Para la realización de las probetas de 40x40x160mm se ha seguido el procedimiento establecido en la norma UNE-196-1 [226]. El procedimiento consiste en rellenar el molde designado por la normativa en dos tongadas y después compactarlo, utilizando el equipo de compactación (Figura 4.4a), mediante 25 golpes. En la Figura 4.4b se muestra un molde relleno, compactado y enrasado.

Figura 4.4. a) Equipo de compactación. b) Molde relleno, compactado y enrasado.

En todas las probetas se ha seguido el mismo procedimiento de curado, el cual consiste en introducir los moldes con mortero fresco en la cámara húmeda en condiciones de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura y humedad relativa del 95% durante 24 horas. En la Figura 4.5. se muestra la cámara húmeda del laboratorio de materiales.

Figura 4.5. Curado de probetas en cámara húmeda.

Transcurrido este periodo de curado, se procedió al desmoldado y referenciado de las probetas. A continuación, fueron introducidas de nuevo en la cámara húmeda, para seguir el proceso de curado en las mismas condiciones hasta la edad de 28 días, momento donde se procedió a realizar los distintos ensayos.

4.1.5 Designación de los morteros en la investigación

La nomenclatura utilizada para la designación de morteros es la siguiente:

- MC, mortero de cemento
- MC, mortero de cal hidráulica
- R, mortero de referencia
- FV, mortero con adición de fibra de vidrio
- FC, mortero con adición de fibra de carbono
- FB, mortero con adición de fibra de basalto
- FM, mortero con mezcla de fibra de vidrio y carbono
- Los números 0,33, 0,66, 1, 1,33, señalan el porcentaje de adición en volumen de fibras

De esta manera, algunos ejemplos de morteros dosificados serían los siguientes:

- MC-R: designa un mortero de referencia confeccionado con cemento CEM IV/B (P-V) 32,5 N.
- MCa-FC 0,66: designa un mortero confeccionado con cal hidráulica NHL 5, con adición del 0,66% de fibras de carbono.

4.1.6 Estados del mortero y propiedades a ensayar

La selección de un mortero incluye a múltiples variables donde primarán las funciones que debe desempeñar en el elemento donde se integra. Ninguna combinación de componentes proporciona el mortero óptimo en todas las propiedades exigibles a ese material. Desafortunadamente los factores que mejoran una característica del material pueden perjudicar también otras. Por ello, se analizarán las principales propiedades de los morteros considerando los factores más determinantes en cada uno de ellos.

Los morteros presentan diferentes características en función del estado físico en que se encuentren. Se distinguen dos etapas perfectamente diferenciadas:

- Etapa 1, mortero fresco: corresponde al periodo una vez mezclado y amasado. Su duración varía dependiendo de las características y dosificaciones de las materias primas que integran la mezcla, así como otros factores, tales como la humedad y la temperatura. En esta etapa el mortero es plástico y trabajable, lo que facilita su puesta en obra.
- Etapa 2, mortero endurecido: superada la fase anterior, el cemento fragua y endurece hasta consolidarse, adquiriendo la resistencia que precisa en sus condiciones de servicio.

Para que los morteros se puedan moldear correctamente y adoptar las formas que impone el diseño, deben tener una plasticidad adecuada, por lo que la primera condición que deben cumplir es su aptitud para la puesta en obra. Posteriormente a su colocación

en obra, el mortero endurece y son las prestaciones en estado endurecido las que se deben exigir durante la vida útil de las construcciones.

Con un enfoque general se procede a determinar en los siguientes apartados las propiedades más importantes para cada estado, llevando a cabo los siguientes ensayos:

Estado fresco:

- Consistencia
- Densidad aparente
- Contenido de aire ocluido en el mortero fresco

Estado endurecido:

- Densidad aparente
- Absorción de agua por capilaridad
- Resistencia a flexión
- Parámetros de ductilidad a flexión
- Resistencia a compresión
- Parámetros de ductilidad a compresión
- Módulo de elasticidad por análisis gráfico

4.2 Propiedades físicas del mortero en estado fresco

La fase inmediatamente posterior a la mezcla de materias primas, que se caracteriza por presentar una consistencia plástica, se denomina estado fresco. En este periodo, que oscila entre los 45 y los 120 minutos aproximadamente en cementos y entre los 60 y los 120 minutos en cales hidráulicas, la masa tiende a volverse rígida dando lugar a lo que se conoce como “principio de fraguado”. Desde el principio de fraguado la resistencia mecánica de la masa aumenta hasta llegar a ser completamente indeformable, instante que se conoce como “final de fraguado”. Este periodo que puede durar entre 45 minutos y 12 horas en cementos y entre 12 y 40 horas en cales hidráulicas.

La trabajabilidad o facilidad de puesta en obra es la propiedad más importante del mortero en estado fresco, en virtud de la influencia que ejerce sobre otras propiedades del mismo, tanto en estado fresco como en estado endurecido. Es una combinación de varias propiedades interrelacionadas, siendo las que tienen mayor incidencia; la consistencia, la densidad del mortero fresco, el aire ocluido y el tiempo de fraguado. En muchas ocasiones, la trabajabilidad mejora con la adición de aditivos plastificantes o aireantes.

En la norma UNE-EN 1015-9/A1 [228,229] no se define el concepto de trabajabilidad, pero se indica el procedimiento para determinar el tiempo durante el cual el mortero se puede colocar en obra después del amasado.

4.2.1 Consistencia

La consistencia es una medida de la fluidez y/o de la humedad del mortero fresco y proporciona una medida de su deformabilidad cuando se somete a un determinado esfuerzo. Ha de ser tal, de forma que permita la manejabilidad o trabajabilidad del mortero para un moldeo adecuado con los medios de puesta en obra, garantizando la homogeneidad del conjunto evitando fenómenos de segregación.

La consistencia se adquiere mediante la adición de agua a la masa de arena y conglomerante, por lo que esta propiedad se relaciona directamente con la proporción agua-conglomerante, crucial para el completo desarrollo de las propiedades resistentes del mortero.

La cantidad de agua varía también en función de la granulometría de las arenas, cantidad de finos, empleo de aditivos y adiciones, tales como las fibras; tema central de esta tesis doctoral; así como de la absorción de agua de la base o materiales sobre los que se aplica, de las condiciones ambientales, etc.

Tal y como establece la norma UNE-EN 1015-2 [223], el mortero fresco utilizado para los ensayos y preparación de las probetas debe, en la medida de lo posible, tener la consistencia apropiada para su empleo. Salvo especificación contraria, como es el caso de este trabajo, se llevará la muestra de mortero fresco a un valor de escurrimiento definido.

Los morteros que garantizan una adecuada trabajabilidad son los que tienen una consistencia plástica, designados con la letra “P”, tal y como se refleja en la Tabla 4.3. En otros casos se forman mezclas excesivamente secas y poco trabajables o, por el contrario, muy fluidas con tendencia a la segregación.

Consistencia de utilización	Designación	Valor de escurrimiento (mm)
Mortero seco	S	< 140
Mortero plástico	P	140 a 200
Mortero fluido	F	> 200

Tabla 4.3. Tipos de consistencias y designación. Norma UNE-EN 1015-6 [224].

La consistencia se determina utilizando la mesa de sacudidas de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1015-3/A1/A2 [230,231,232]. Para ello, se coloca el molde troncocónico en el centro de la mesa de sacudidas y se introduce el mortero en dos capas, compactando cada una de ellas con un mínimo de diez golpes del pisón. Se elimina el exceso de mortero con la regla de enrasar y alrededor de 15 segundos después, se levanta lenta verticalmente el molde y se imprime 15 sacudidas a la mesa en aproximadamente otros 15 segundos, quedando el mortero extendido en el disco. Posteriormente se mide el diámetro del mortero en las direcciones

perpendiculares entre sí con un calibre (Figura 4.6). El valor medio de las dos medidas es el escurrimiento del mortero.

Figura 4.6. a) Medida de la torta de mortero.

4.2.1.a Resultados

En la Tabla 4.4 se muestran las dosificaciones empleadas para la elaboración de los morteros de cemento y de cal hidráulica, así como la consistencia obtenida.

Designación	Conglomerante (kg)	Arena (kg)	Fibra (kg)	Plastificante (kg)	Consistencia (mm)	
					M. Cemento	M. Cal Hidráulica
M-R	490	1470	0	0	191	189
M-FV-0,33	490	1470	6,9	0	173	159
M-FV-0,66	490	1470	13,6	1,96	155	145
M-FV-1	490	1470	20,6	3,92	145	140
M-FV-1,33	490	1470	27,4	4,90	142	139
M-FC-0,33	490	1470	4,5	0	164	157
M-FC-0,66	490	1470	9,1	1,96	159	145
M-FC-1	490	1470	13,7	3,92	149	142
M-FC-1,33	490	1470	18,2	4,90	144	133
M-FB-0,33	490	1470	6,9	0	179	157
M-FB-0,66	490	1470	13,9	1,96	157	153
M-FB-1	490	1470	21,1	3,92	145	143
M-FB-1,33	490	1470	28,1	4,90	140	139
M-FM-0,33	490	1470	3,4-2,2	0	160	159
M-FM-0,66	490	1470	6,8-4,5	1,96	153	161
M-FM-1	490	1470	10,3-6,8	3,92	146	142
M-FM-1,33	490	1470	13,7-9,1	4,90	143	138

Tabla 4.4. Dosificaciones y consistencias de los morteros de cemento y cal hidráulica.

Como ya se ha explicado con anterioridad en este capítulo, debido a las propiedades intrínsecas de las fibras que tienden a “coser” la matriz, no es posible ir a valores fijos

de escurrimiento sin que la relación agua-conglomerante se dispare. Por este motivo se ha fijado una relación agua-conglomerante de 0,65 para los morteros de cemento y de 0,73 para los morteros de cal hidráulica.

La adición de fibras supone en este caso una disminución de la consistencia, situándose en torno a los 130-140 mm cuando se adiciona la máxima cantidad de fibras (1,33%), mientras que, para los morteros de referencia es de 190mm. Esto implica que el mortero sea menos trabajable. La razón de este fenómeno es la formación de una estructura en forma de red debido a la distribución de las fibras en el mortero, que restringen la segregación de la mezcla [201]. Esto unido a la mayor cantidad de conglomerante necesario para “envolver” las fibras, debido a la alta superficie específica de estas, supone un aumento de la viscosidad y por tanto una disminución de la consistencia.

No obstante, aunque se haya realizado el ensayo y los resultados se hayan hecho constar en el presente trabajo, se considera que dicho ensayo no está pensado para morteros con adición de fibras y que los resultados no representan fielmente la trabajabilidad del mortero.

4.2.2 Densidad aparente

La densidad del mortero está directamente relacionada con la de las materias primas que lo componen, así como con su contenido de aire ocluido. La densidad del mortero fresco se determina conforme a la norma UNE-EN 1015-6 [225].

La densidad aparente se obtiene dividiendo el peso del mortero fresco que llena un recipiente de volumen conocido (Figura 4.7) por el volumen interior de dicho recipiente.

Figura 4.7. Pesada del recipiente relleno de mortero.

La densidad aparente del mortero en estado fresco se calcula a partir de la siguiente ecuación (4.1):

$$\rho_m > \frac{m_2 - m_1}{V_v} \quad (4.1)$$

Donde,

ρ_m Densidad aparente del mortero fresco en kg/m³

m_1 Masa del recipiente vacío en g

m_2 Masa del recipiente vacío en g

V_v Volumen del recipiente medido en l

4.2.2.a Resultados

Las densidades obtenidas se recogen en la Tabla 4.5.

Designación	Densidad en estado fresco (kg/m ³)		Reducción respecto a la referencia (%)	
	M. Cemento	M. Cal hidráulica	M. Cemento	M. Cal hidráulica
M-R	2170	2110	0	0
M-FV-0,33	2150	2100	1	0
M-FV-0,66	2110	2080	3	1
M-FV-1	2090	2020	4	4
M-FV-1,33	2050	1980	6	6
M-FC-0,33	2150	2100	1	0
M-FC-0,66	2110	2050	3	3
M-FC-1	2080	2000	4	5
M-FC-1,33	2030	1950	6	8
M-FB-0,33	2120	2110	2	0
M-FB-0,66	2100	2030	3	4
M-FB-1	2070	2020	5	4
M-FB-1,33	2060	2000	5	5
M-FM-0,33	2165	2080	0	1
M-FM-0,66	2120	2040	2	3
M-FM-1	2080	2020	4	4
M-FM-1,33	2050	1980	6	6

Tabla 4.5. Densidades aparentes en estado fresco para los morteros de cemento y cal hidráulica.

Las densidades en fresco de los morteros con adición de fibras disminuyen a medida que aumenta el porcentaje de fibras, debido a que las fibras tienden a atrapar aire. Es fenómeno ha sido reportado por diversos autores y ocurre tanto en morteros de cemento [73,79] como en morteros de cal hidráulica [84,86].

Cuando la adición de fibras es del 1,33%, la densidad (en los morteros de cemento) se reduce en todos los casos hasta un máximo de un 6% respecto a las mezclas de

referencia y hasta un máximo de un 8% cuando se trata de morteros de cal hidráulica. Esta reducción de la densidad no es un factor determinante de los morteros al no producir en ningún caso morteros ligeros, sin embargo, permite observar el aumento del aire atrapado en las mezclas, fenómeno que se estudiara en el siguiente apartado.

En cuanto al tipo de fibra adicionada, las de carbono producen morteros con menor densidad, mientras que las fibras de vidrio y basalto muestran resultados similares. Esto se debe a la menor densidad de las fibras de carbono ($1,79 \text{ g/cm}^3$) en comparación a las de vidrio ($2,68 \text{ g/cm}^3$) y basalto ($2,75 \text{ g/cm}^3$).

En la Figura 4.8 se pueden comparar las densidades de las dos series de morteros. Es posible apreciar que los valores de los morteros de cemento son superiores a los morteros de cal hidráulica, debido a que la densidad real de los conglomerantes difiere ligeramente, siendo de $3,01 \text{ g/cm}^3$ para el cemento y $2,75 \text{ g/cm}^3$ para la cal hidráulica.

Figura 4.8. Comparación de las densidades aparentes del mortero fresco para los morteros de cemento y cal hidráulica.

4.2.3 Contenido de aire ocluido en el mortero fresco

El contenido de aire del mortero es una propiedad de gran importancia que permite explicar, en muchos casos, su comportamiento tanto en estado fresco como en endurecido, dando una idea de la cantidad de huecos existentes en la mezcla. Esto justifica que en la fabricación de morteros se tenga un control especial sobre esta propiedad. El contenido de aire se ha determinado según la norma UNE-EN 1015-7 [233], empleando el método de presión.

El aparato de presión se muestra en la Figura 4.9. Consta de un cilindro metálico (recipiente para la muestra) con una capacidad de 1 litro, provisto de una tapa metálica sobre la que se fija una cámara de aire estanca (cámara de presión) que está conectada a un manómetro que permite medir la presión aplicada.

1. Tubo de calibración
2. Válvula A
3. Válvula B
4. Bomba
5. Válvula principal
6. Manómetro
7. Válvula de vaciado
8. Cámara de aire
9. Abrazadera
10. Recipiente

Figura 4.9. a) Esquema del aparato de ensayo [234]. b) Aparato de medida con la muestra de mortero en el interior.

Para llevar a cabo el ensayo, se llena por completo el recipiente con mortero fresco en cuatro capas de espesor aproximadamente iguales compactando cada una de ellas con 10 golpes cortos de pisón, regularmente distribuidos para obtener una superficie plana, eliminando el exceso y enrasando con una regla.

A continuación, se coloca la tapa y se cierra la válvula principal de aireación. Luego se llena de agua el espacio de aire situado encima del mortero, inyectado el agua por la válvula “A” al tiempo que se mantiene abierta la válvula “B” para eliminar todo el aire situado en la superficie del mortero.

Posteriormente se inyecta aire hasta alcanzar una presión estable; se cierran las válvulas A y B, y se abre la válvula situada entre la cámara de aire y el recipiente de la muestra. La disminución de la presión en la cámara de aire refleja el contenido de aire de la muestra de mortero. Se calcula el contenido en aire como el valor medio de los dos valores individuales de cada muestra de mortero ensayada.

4.2.3.a Resultados

La determinación del contenido de aire en el mortero fresco resulta relevante, ya que indica la red capilar de poros en el interior del mortero, que pueden deberse a la inclusión de aire al adicionar fibras, a un amasado deficiente o a una inadecuada compactación del mortero. Al haberse realizado todos los morteros siguiendo el protocolo de amasado y el de compactación, se puede descartar que ambas posibilidades afecten al porcentaje de aire ocluido.

En la Tabla 4.6 se recoge el porcentaje de aire ocluido de los morteros de cemento y de cal hidráulica en estado fresco.

Designación	Porcentaje de aire ocluido (%)		Aumento respecto a la referencia (%)	
	M. Cemento	M. Cal hidráulica	M. Cemento	M. Cal hidráulica
M-R	2,4	3,1	0	0
M-FV-0,33	5,2	3,5	117	13
M-FV-0,66	8,1	4,7	238	52
M-FV-1	9,4	6,3	292	103
M-FV-1,33	12,7	7,5	429	142
M-FC-0,33	5,2	4,1	117	32
M-FC-0,66	7,6	5,3	217	71
M-FC-1	9,6	6,0	258	94
M-FC-1,33	13,1	6,9	383	123
M-FB-0,33	6,4	4,2	167	35
M-FB-0,66	8,6	5,1	258	65
M-FB-1	9,5	6,1	296	97
M-FB-1,33	12,5	6,9	421	123
M-FM-0,33	6,3	4,0	163	29
M-FM-0,66	7,1	5,3	196	71
M-FM-1	9,1	6,5	279	110
M-FM-1,33	12,0	7,3	400	135

Tabla 4.6. Porcentaje de aire ocluido en estado fresco para los morteros de cemento y cal hidráulica.

En la Tabla 4.6 se puede observar el aumento del aire ocluido para los diferentes morteros según aumenta la adición de fibras. Este fenómeno ya ha sido reportado por diferentes autores, tanto para morteros de cemento [69,78,79,82] como para los de cal hidráulica [81,82,84] y tiene su origen en la interrupción de la continuidad de la microestructura del material como resultado de la inclusión de heterogeneidades en un cuerpo homogéneo. Específicamente, las fibras inorgánicas, modifican la trabajabilidad del mortero, favoreciendo la formación de microcavidades en la zona de transición interfacial entre la pasta y las fibras obstaculizando la hidratación o carbonatación de ésta [84]. También puede ser debido al pretratamiento de las superficies de las fibras.

En las Figuras 4.10 y 4.11 se muestra como el aumento en los porcentajes de adición de fibras aumenta el contenido de aire ocluido, independientemente del tipo de fibra y del conglomerante. De media, en los morteros de cemento con porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%, el contenido de aire ocluido se incrementa 2,5, 3, 4 y 5 veces, respectivamente con respecto a los morteros convencionales, obteniéndose los valores superiores cuando se adiciona fibra de vidrio.

Figura 4.10. Porcentaje de aire ocluido para los morteros de cemento.

Para los morteros de cal hidráulica, en promedio, la adición de fibras en porcentajes del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%, supone un contenido de aire ocluido cerca de 1,5, 1,5, 2 y 2,5 veces superior al obtenido en los morteros de referencia, obteniéndose los valores más altos cuando se adiciona fibra de vidrio.

Figura 4.11. Porcentaje de aire ocluido para los morteros de cal hidráulica.

Para los morteros de cemento con fibras, el aumento del aire ocluido es casi el doble que el obtenido por los mismos morteros de cal hidráulica. Se puede afirmar, por tanto, que la interacción entre las fibras y el conglomerante es mejor cuando éste es cal hidráulica.

4.3 Propiedades físicas del mortero endurecido

A partir del final del fraguado, se produce lo que se conoce como el periodo de endurecimiento, fase donde existe un crecimiento exponencial de las resistencias mecánicas de la masa. Una vez que el mortero fragua y endurece, aparecen los cristales silicatados y aluminatos cálcicos que proporcionan la resistencia mecánica del mortero a corto y a largo plazo. Así, a los 28 días, en condiciones normalizadas, se obtiene una resistencia a compresión que define el tipo de mortero. Sobre las resistencias mecánicas tienen especial incidencia las condiciones climatológicas y de aplicación, en especial el curado.

4.3.1 Densidad aparente

La densidad del mortero depende fundamentalmente de las densidades que posean sus componentes, así como de su granulometría y volumen que ocupen en la dosificación; además, incide en la densidad la relación agua-conglomerante, siendo más poroso a medida que aumenta dicha relación.

Si incorporamos una pequeña cantidad de agua, ésta será suficiente para conseguir la hidratación del conglomerante del mortero. No obstante, se obtendrían consistencias demasiado secas y no trabajables. Por ello, se añade siempre una cierta cantidad de agua de amasado que mejora las propiedades de las mezclas. Por esta razón, se produce una pérdida de agua sobrante en el mortero a lo largo del tiempo, que no se combina con las partículas de conglomerante para la formación y endurecimiento de cristales.

La densidad en estado endurecido se ha determinado según la norma UNE-EN 1015-10/A1 [234,235]. Para la determinación de la densidad las probetas se han secado en la estufa hasta peso constante. A continuación, se han saturado de agua y después se han sumergido en agua para determinar su volumen aparente mediante pesada hidrostática (Figura 4.12).

Figura 4.12. Pesada hidrostática de la probeta seca.

El volumen aparente se calcula a partir de la siguiente expresión (4.2):

$$V_s > \frac{m_{s,sat} - m_{s,i}}{\rho_w} \quad (4.2)$$

Donde,

- V_s Volumen de la probeta de mortero endurecido en m^3
- ρ_w Densidad del agua en kg/m^3
- $m_{s,sat}$ Masa la probeta satura de mortero en kg
- $m_{s,i}$ Masa aparente de la probeta saturada del mortero endurecido sumergido en agua en kg

Una vez calculado el volumen aparente, la densidad aparente en seco de cada probeta se calcula a partir de la siguiente ecuación (4.3):

$$\rho_s > \frac{m_{s,sec}}{V_s} \quad (4.3)$$

Siendo,

- ρ_s Densidad en seco del mortero endurecido en kg/m^3
- $m_{s,sec}$ Masa la probeta del mortero endurecido secado en estufa en kg
- V_s Volumen de la probeta de mortero endurecido en m^3

4.3.1.a Resultados

Los valores de las densidades se han calculado para la edad de 28 días y su valor final es el resultado de la media aritmética de los valores individuales, recogándose en la Tabla 4.7 los valores en estado endurecido.

Designación	Densidad en estado endurecido (kg/m³)		Reducción respecto a la referencia (%)	
	M. Cemento	M. Cal hidráulica	M. Cemento	M. Cal hidráulica
M-R	2150	1970	0	0
M-FV-0,33	2110	1920	2	3
M-FV-0,66	2090	1890	3	4
M-FV-1	2070	1850	3	6
M-FV-1,33	2030	1820	5	8
M-FC-0,33	2090	1930	3	2
M-FC-0,66	2060	1900	4	4
M-FC-1	1990	1860	7	6
M-FC-1,33	1960	1830	9	7
M-FB-0,33	2040	1960	5	1
M-FB-0,66	2010	1920	7	3
M-FB-1	1990	1900	7	4
M-FB-1,33	1970	1860	8	6
M-FM-0,33	2090	1880	3	5
M-FM-0,66	2050	1860	5	6
M-FM-1	2020	1820	6	8
M-FM-1,33	1990	1790	7	9

Tabla 4.7. Densidades aparentes en estado endurecido para los morteros de cemento y cal hidráulica.

Como era de esperar, se ha obtenido que la densidad en estado endurecido resulta inversamente proporcional a la cantidad de fibra añadida. Al igual que ocurre en el mortero fresco, a medida que aumenta el porcentaje de fibras, aumenta el aire ocluido en la mezcla, lo que justifica la disminución de la densidad del mortero endurecido.

Comparando las densidades aparentes de los morteros en estado fresco y en estado endurecido, se puede determinar la cantidad de agua evaporada, es decir, el agua destinada exclusivamente al amasado que no se combina con el conglomerante. Del mismo modo, comparando ambas densidades, podemos conocer la cantidad de agua que se ha empleado en la hidratación del conglomerante.

El agua evaporada deja en su lugar un vacío ocupado por aire, por lo tanto, una disminución grande de la densidad aparente del mortero endurecido indica una porosidad elevada y una cantidad de agua de amasado muy superior a la mínima necesaria para hidratar el cemento. En la Tabla 4.8 aparece una comparativa entre las densidades en estado fresco y las densidades en estado endurecido de los morteros de cemento y de cal hidráulica.

Designación	Densidad de los morteros de cemento (kg/m ³)		Densidad de los morteros de cal hidráulica (kg/m ³)	
	Fresco	Endurecido	Fresco	Endurecido
MC-R	2170	2130	2110	1970
MC-FV-0,33	2150	2110	2100	1920
MC-FV-0,66	2110	2080	2080	1890
MC-FV-1	2090	2050	2020	1850
MC-FV-1,33	2050	2010	1980	1820
MC-FC-0,33	2150	2090	2100	1930
MC-FC-0,66	2110	2060	2050	1900
MC-FC-1	2080	1990	2000	1860
MC-FC-1,33	2030	1960	1950	1830
MC-FB-0,33	2120	2040	2110	1960
MC-FB-0,66	2100	2010	2030	1920
MC-FB-1	2070	1990	2020	1900
MC-FB-1,33	2060	1970	2000	1860
MC-FM-0,33	2165	2090	2080	1880
MC-FM-0,66	2120	2050	2040	1860
MC-FM-1	2080	2020	2020	1820
MC-FM-1,33	2050	1990	1980	1790

Tabla 4.8. Comparación densidades en estado fresco y endurecido para los morteros cemento y cal hidráulica.

El valor porcentual de la pérdida de densidad en un indicador del agua de amasado que se ha evaporado. En las Figuras 4.13 y 4.14 se observa cómo se han reducido las densidades del estado fresco al estado endurecido para los morteros de cemento y los de cal hidráulica, respectivamente. Queda patente la relación entre la incorporación de fibras y la cantidad de aire ocluido, aumentando, más del doble, cuando se trata de morteros de cal hidráulica.

Figura 4.13. Comparación de densidades aparentes del mortero en estado fresco y endurecido para los morteros de cemento.

Figura 4.14. Comparación de densidades aparentes del mortero en estado fresco y endurecido para los morteros de cal hidráulica.

4.3.2 Absorción de agua por capilaridad

La capacidad de un mortero para atraer y retener agua en su interior depende de la cantidad y configuración de sus poros abiertos (tamaño, interconexión), por lo que el estudio de la absorción además será un indicativo de la red de poros abiertos.

El ensayo de absorción de agua por capilaridad se ha realizado acorde a las directrices técnicas que marca la norma UNE-EN 1015-18 [236]. El ensayo permite la medición del coeficiente que mide la cantidad de agua absorbida en función de la superficie de contacto y el tiempo de inmersión con agua de cada probeta.

Para su determinación se han fabricado probetas prismáticas de 40x40x160 mm que han sido secadas en estufa hasta peso constante e impregnadas de parafina en todas sus superficies. Posteriormente se han roto a flexión e introducidas en una bandeja con la cara de rotura inmersa en agua de 5mm a 10mm (Figura 4.15). Por último, las probetas han sido pesadas tras 10 y 90 minutos de inmersión.

Figura 4.15. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad.

El coeficiente de absorción de agua por capilaridad es igual a la pendiente de la recta que une los puntos representativos de las medias tomadas a los 10 minutos y a los 90 minutos, y se calcula a partir de la siguiente expresión (4.4):

$$C = 0,1 * (M2 - M1) \quad (4.4)$$

Donde,

C Coeficiente de absorción de agua en $\text{kg}/(\text{m}^2 * \text{min}^{0.5})$

M1 Peso de la probeta a los 10 min en g

M2 Peso de la probeta a los 90 min en g

4.3.2.a Resultados

La determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad en morteros resulta de gran relevancia ya que la durabilidad de los morteros a largo plazo va a depender del balance de agua en el interior del mortero, estrechamente relacionado con la red de poros, así como de la naturaleza de las disoluciones que se encuentran en los poros, y de las condiciones ambientales que llevan asociados (ciclos de temperatura y humedad relativa).

En la Tabla 4.9 se muestran los coeficientes de absorción de agua por capilaridad de los diferentes morteros de cemento y cal hidráulica.

Designación	Coeficiente de absorción de agua (kg/(m ² *min ^{0.5}))		Aumento /reducción respecto a la referencia (%)	
	M. Cemento	M. Cal hidráulica	M. Cemento	M. Cal hidráulica
M-R	0,28	2,00	0	0
M-FV-0,33	0,40	2,28	43	14
M-FV-0,66	0,32	1,77	14	-11
M-FV-1	0,27	1,01	-4	-50
M-FV-1,33	0,32	1,34	14	-33
M-FC-0,33	0,38	2,29	36	15
M-FC-0,66	0,32	1,62	14	-19
M-FC-1	0,28	1,77	0	-11
M-FC-1,33	0,30	1,71	7	-15
M-FB-0,33	0,34	2,28	21	14
M-FB-0,66	0,29	1,59	4	-21
M-FB-1	0,24	1,30	-14	-35
M-FB-1,33	0,25	1,53	-11	-23
M-FM-0,33	0,33	2,03	18	2
M-FM-0,66	0,30	1,76	7	-12
M-FM-1	0,26	1,57	-7	-22
M-FM-1,33	0,31	1,73	11	-14

Tabla 4.9. Coeficiente de absorción de agua por capilaridad para los morteros de cemento y cal hidráulica.

La incorporación de fibras provoca un comportamiento difícilmente definido, produciéndose aumentos o disminuciones de los coeficientes en función del porcentaje de fibra añadida, fenómeno reportado por otros autores [237,238].

Comparando los valores de absorción de agua por capilaridad y aire ocluido, se comprueba que no tienen relación directa. Esto es debido a que las fibras previenen la aparición de microfisuras en las primeras edades que favorecen el tránsito de agua a través del mortero [239].

En la Figura 4.16 se aprecia que los coeficientes de absorción de agua para los morteros de cemento con porcentajes de fibra del 0,33% son, de media, un 29% superiores a los de la referencia, siendo los morteros que más agua absorben. Para los porcentajes de 0,66% y 1,33% los coeficientes siguen siendo superiores a la referencia, con promedios en torno al 10% y 5%, respectivamente. Sin embargo, los morteros de cemento con adición del 1% de fibras muestran unos coeficientes inferiores, de media, un 6% a los obtenidos en morteros convencionales. En cuanto al tipo de fibra, las de basalto son las que mejores resultados arrojan, ofreciendo morteros con una menor capacidad de absorción de agua.

Figura 4.16. Coeficiente de absorción de agua por capilaridad para los morteros de cemento.

Para los morteros de cal hidráulica, Figura 4.17, el comportamiento es similar al mostrado por los morteros de cemento, observándose un aumento de los coeficientes de absorción de agua, en promedio, cercanos al 11% cuando se le añaden un 0,33% de fibras. Mientras que para probetas MCa-F-0,66 los coeficientes se sitúan, de media, en torno al 14% por debajo de la referencia; siendo alrededor de un 31% inferiores en dosificaciones MCa-F-1 y menores al 21% para probetas MCa-F-1,33. En cuanto al tipo de fibra, dependiendo del porcentaje añadido varía la fibra que ofrece mejores resultados, siendo las de carbono las que producen morteros con una mayor capacidad de absorción de agua para todos los porcentajes.

Figura 4.17. Coeficiente de absorción de agua por capilaridad para los morteros de cal hidráulica.

4.4 Propiedades mecánicas del mortero endurecido

Los valores de resistencia a distintos esfuerzos mecánicos, tales como compresión y flexión, son útiles no solo en la determinación de la capacidad portante de un elemento constructivo, sino que también permiten valorar, entre otros parámetros, el grado de compactación y la consolidación de los componentes que forman su estructura, el grado de alteración del material y la potencial predisposición al deterioro.

De hecho, la resistencia a compresión parece identificar la mayoría de los materiales, sobre todo a aquellos cuya utilidad es estructural y aquellos de composición pétreo, ya que al determinar la resistencia a rotura a compresión se está determinando la tensión que es capaz de soportar el material, es decir, la tensión a partir de la cual la estructura interna del material se destruye.

Sin embargo, hay que tener presente que el objetivo de esta tesis doctoral es definir un mortero con propiedades mejoradas de ductilidad, y que, por lo tanto, en este tipo de aplicación será necesario controlar además otros parámetros.

Los morteros endurecidos van a estar sometidos a diversas tensiones mecánicas, que van en función de su ubicación en obra: compresión, cortante, flexión, tracción, etc. A estas sollicitaciones propias de la función que desempeñan los morteros en obra, hay que añadir las que provienen de la propia deformación del soporte que pueden llegar a provocar incluso la rotura. El mortero, en la mayor parte de sus aplicaciones, debe actuar como elemento de unión resistente compartiendo las sollicitaciones del sistema constructivo del que forma parte, siendo este motivo otro punto de partida del trabajo, de ahí el estudio de morteros de cal hidráulica.

El equipo empleado para la realización de los ensayos de resistencia a flexión y compresión ha sido una máquina universal de ensayos, de la marca Ibertest modelo MIB-60/AM (Figura 4.18) con un control de carga por carrera.

Figura 4.18. Equipo Ibertest modelo MIB-60/AM.

4.4.1 Resistencia a flexión

La resistencia a flexión se determina según establece la norma UNE-EN 1015-11/A1 [240,241]. Las probetas a ensayar a flexión son prismáticas de dimensiones 40x40x160 mm³. Se colocan en la prensa sobre dos rodillos de apoyo de acero, separados entre ejes una longitud de 100 mm ± 5mm, mientras que un tercer rodillo instalado centralmente entre los de apoyo, transmite una carga a una velocidad de 0,4 mm/min con el objetivo de determinar las curvas de tensión-desplazamiento de los morteros con distintas adiciones de fibras, así como la resistencia a flexión (Figura 4.19).

Figura 4.19. Determinación de la resistencia a flexión.

La resistencia a flexión, R_f , de cada probeta se calcula por medio de la siguiente expresión (4.5):

$$R_f = 1,5 * \frac{F * L}{b * d^2} \quad (4.5)$$

Donde,

- R_f Resistencia a flexión en MPa
- F Carga máxima aplicada a la probeta en N
- L Distancia entre los rodillos de apoyo en mm
- b Ancho de la probeta en mm
- d Grosor de la probeta en mm

4.4.1.a Resultados

Para cada dosificación de mortero se han ensayado series de tres probetas a 28 días de edad. En la Tabla 4.10 aparecen los valores obtenidos, correspondientes a la media aritmética de los valores individuales de cada una de las series.

Designación	Resistencia a flexión (MPa)		Aumento /reducción respecto a la referencia (%)	
	M. Cemento	M. Cal hidráulica	M. Cemento	M. Cal hidráulica
M-R	6,90	0,74	0	0
M-FV-0,33	6,89	1,03	0	39
M-FV-0,66	6,60	1,07	-4	45
M-FV-1	6,02	1,31	-13	77
M-FV-1,33	5,57	1,33	-19	80
M-FC-0,33	6,44	0,96	-7	30
M-FC-0,66	6,44	1,18	-7	59
M-FC-1	5,86	1,47	-15	99
M-FC-1,33	5,11	1,38	-26	86
M-FB-0,33	6,85	0,99	-1	34
M-FB-0,66	6,42	1,23	-7	66
M-FB-1	6,12	1,40	-11	89
M-FB-1,33	5,38	1,40	-22	89
M-FM-0,33	6,80	1,01	-1	36
M-FM-0,66	6,71	1,18	-3	59
M-FM-1	6,22	1,36	-10	84
M-FM-1,33	5,44	1,33	-21	80

Tabla 4.10. Resistencia a flexión para los morteros de cemento y de cal hidráulica.

Se observa que el mortero de cemento sufre una pérdida progresiva de resistencia a flexión según aumenta en contenido de fibras, para todos los tipos adicionadas, hasta llegar al 1,33% donde se producen las mayores mermas de resistencia. En promedio, para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%, las resistencias a flexión caen un 2%, 5%, 14% y un 22% respectivamente, obteniéndose los valores más bajos cuando se trata fibra de carbono, llegando a valores un 26% inferiores. Esto es debido a la dificultad en la dispersión de las fibras cuando aumenta su contenido [60,61].

En la literatura, el descenso de las resistencias a flexión de los morteros de cemento por incorporación de fibras ha sido comentado por varios autores [60,78]. No obstante, otros autores [59,67,74,76] han publicado estudios donde la adición de fibras provoca una mejora de las resistencias a flexión cuando los porcentajes añadidos son bajos.

En la Figura 4.20 se aprecia que la caída de las resistencias a flexión según aumenta el contenido de fibras es muy similar independientemente de la naturaleza de éstas.

Figura 4.20. Resistencia a flexión para los morteros de cemento.

Por el contrario, para los morteros de cal hidráulica, se ha observado un aumento de las resistencias a flexión, para todos los tipos de fibras adicionadas, con valores superiores al 35% para probetas MCa-F-0,33; alrededor del 57% en dosificaciones MCa-F-0,66, que llegan al 87% de aumento en la flexión en mezclas con adición del 1% en fibras (MCa-F-1) y cercanas al 84% en probetas MCa-F-1,33. Se han registrado los valores más elevados con adiciones del 1% de fibras de carbono y basalto. El aumento de la resistencia a flexión en morteros de cal hidráulica por incorporación de fibras es un fenómeno ya estudiado por varios autores [81,82,84].

Como se puede apreciar en la Figura 4.21, el aumento de las resistencias a flexión no es progresivo, ya que para mezclas con adiciones del 1,33%, los valores obtenidos son iguales o inferiores a los alcanzados con un 1%. Esto indica que, para un mortero de cal hidráulica con una dosificación dada, existe un porcentaje máximo de fibras a partir del cual la resistencia a flexión no mejora.

Figura 4.21. Resistencia a flexión para los morteros de cal hidráulica.

Resulta reseñable que las fibras de carbono y basalto provoquen las mayores caídas de resistencia a flexión en morteros de cemento, llegando a valores un 26% y un 22% inferiores, respectivamente, mientras que para los morteros de cal hidráulica dichas fibras suponen los mayores incrementos obteniéndose valores un 99% y un 89% superiores, sobre los morteros de referencia.

4.4.2 Capacidad de absorción de energía a flexión

Para analizar la ductilidad de los morteros, varios autores han propuesto ensayos con distintas configuraciones de carga; flexión (será analizada en este apartado), compresión (será analizada en el siguiente apartado) y tracción indirecta (será analizada en el siguiente capítulo). De estas, la más frecuente es la configuración de flexión [242]. Los diagramas de carga-desplazamiento, obtenidos tras los ensayos, permiten calcular la capacidad de absorción de energía del material a través de distintos indicadores; energía absorbida hasta un desplazamiento dado, índices adimensionales (en el caso de ensayos a flexión) o cualquier otro parámetro que cuantifique la respuesta del mortero en el régimen post-pico.

Se ha determinado la ductilidad del material modificando el procedimiento descrito en las normas UNE 83510:2004 [243] y ASTM C 1018-97 [244] que describen el método de ensayo estándar para el cálculo de los índices de tenacidad a flexión y resistencia a la primera fisura de hormigones con fibras.

La norma ASTM C 1018-97 expone: “la tenacidad determinada como el área bajo la curva de carga-desplazamiento es una indicación de la capacidad de absorción de energía de la muestra en particular y, en consecuencia, su magnitud depende directamente de las características geométricas de la probeta”. Por este motivo, y debido a que en el capítulo siguiente se va a estudiar la influencia de la geometría de la probeta en la ductilidad del material, se ha calculado la energía absorbida, mediante el análisis del área bajo la curva de tensión-desplazamiento hasta un desplazamiento variable, δ , tal como indica la siguiente ecuación (4.6):

$$G_{\delta} = \int_0^{\delta} \sigma d\delta \quad (4.6)$$

De este modo, mediante el análisis de los diagramas de tensión-desplazamiento a flexión se tiene en cuenta las características geométricas de la probeta. Se han calculado los siguientes parámetros:

G_{fr}	Energía absorbida a flexión hasta tensión de rotura en N/mm
δ_{max}	Desplazamiento máximo a flexión en mm
$G_{fL/150}$	Energía absorbida a flexión en N/mm
G_{fu}	Energía absorbida a flexión hasta colapso en N/mm
δ_u	Desplazamiento último a flexión en mm

$I_5, 10, 20, 30$ Índices de tenacidad
 I_u Índice de tenacidad último

La energía absorbida a flexión hasta tensión de rotura (G_{fr}) cuantifica la cantidad de energía necesaria para producir la rotura, y se calcula mediante la integración de la curva tensión-desplazamiento hasta el punto de resistencia máxima (Figura 4.22a).

La energía absorbida a flexión hasta un desplazamiento $L/150$ ($G_{fL/150}$), es la energía que es necesaria comunicar a la probeta para que ésta alcance una flecha igual a $1/150$ de la distancia entre ejes de apoyos, y viene representada por el área $O'AC'D'$. Igualmente se ha calculado la energía absorbida a flexión hasta tensión última (G_{fu}), que mide la energía absorbida hasta el colapso de la probeta.

El índice de tenacidad I_{30} se obtiene como resultado de dividir el área bajo la curva tensión-desplazamiento desde el origen hasta el segmento CD (correspondiente a 15,5 veces la flecha de primera fisura, $O'ACD$) por el área del triángulo $O'AB$.

Figura 4.22. Diagrama tensión-desplazamiento esquemático con indicación de los límites de cálculo de: a) energía absorbida $G_{fL/150}$ e índice I_{30} [243]. b) índices I_5 , I_{10} e I_{20} [144].

El índice de tenacidad I_5 se obtiene como resultado de dividir el área bajo la curva tensión-desplazamiento desde el origen hasta el segmento CD (correspondiente a 3 veces la flecha de primera fisura) por el área del triángulo $O'AB$. Con igual criterio, el índice de tenacidad I_{10} se obtiene como resultado de dividir el área bajo la curva tensión-desplazamiento desde el origen hasta el segmento $C'D'$ (correspondiente a 5,5 veces la flecha de primera fisura) por el área del triángulo $O'AB$. Finalmente, el índice de tenacidad I_{20} se obtiene como resultado de dividir el área bajo la curva desde el origen hasta el segmento $C'D'$ (correspondiente a 10,5 veces la flecha de primera fisura) por el área del triángulo $O'AB$. Debido a que algunos morteros no alcanzan el I_{30} se ha calculado el índice de tenacidad último (I_u), que se obtiene como resultado de dividir el área bajo la curva desde el origen hasta el segmento $C'D'$ (correspondiente a la desplazamiento último de la probeta) por el área del triángulo $O'AB$.

4.4.2.a Resultados

Para comprender la influencia de las fibras en el comportamiento post-fisuración a flexión de los morteros de cemento hay que examinar los diagramas de tensión-desplazamiento (Figuras 4.23, 4.24, 4.25 y 4.26). Pueden apreciarse tres etapas. En la I etapa, el comportamiento es lineal hasta que se alcanza la tensión de primera fisura. A partir de este punto, pierde la linealidad debido a la menor rigidez provocada por la microfisuración (etapa II) hasta llegar a la resistencia máxima. En la tercera etapa, las resistencias residuales caen rápidamente para luego estabilizarse e ir descendiendo lentamente hasta que se produce el colapso. Esto se debe al efecto de cosido de las fibras, que impide la rotura frágil gracias al esfuerzo compuesto que se produce. Esta tercera etapa difiere en función del tipo y porcentaje de fibra añadida.

A continuación, se presentan los diagramas de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento, comentándose parcialmente los resultados de las diferentes mezclas. Posteriormente se presentará la Tabla 4.11 que recoge los resultados del análisis realizado.

En la Figura 4.23 se muestra el diagrama de tensión-desplazamiento de los morteros de cemento con fibra de vidrio. Se puede apreciar el aumento de la capacidad de deformación de estos morteros llegando a desplazamientos de 1,6 mm antes de producirse el colapso. La energía absorbida hasta la rotura es, de media, un 13% inferior a la obtenida en el mortero de referencia, debido a que su resistencia a flexión es menor. Sin embargo, las energías absorbidas $G_{fL/150}$ y G_{fu} son superiores en un 94%, 111%, 193% y 105% y en un 154%, 160%, 297% y 164%, respectivamente, para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%.

Figura 4.23. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento con fibra de vidrio.

Para los morteros de cemento con fibra de carbono, Figura 4.24, el análisis del diagrama de tensión-desplazamiento refleja un aumento de la energía absorbida a flexión ($G_{fL/150}$) en un 62%, 151%, 258% y 172% sobre el mortero convencional para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%, respectivamente. Mientras que los valores de energía absorbida últimos (G_{fu}), sufren un incremento del 78%, 205%, 533% y 245% para los porcentajes de adición mencionados anteriormente. No obstante, la energía absorbida hasta rotura es, de media, un 20% inferior.

Figura 4.24. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento con fibra de carbono.

En la Figura 4.25 se muestra el diagrama de tensión-desplazamiento de los morteros de cemento con fibra de basalto. Comparando estos morteros con el de referencia, se observa un aumento de la capacidad de absorción de energía a flexión ($G_{fL/150}$) en un 38%, 59%, 141% y 92% para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33% respectivamente. Mientras que los valores de absorción de energía a flexión hasta tensión última (G_{fu}), sufren un incremento en torno al 38%, 64%, 190% y 112% para las cantidades de fibras ya citadas. La energía absorbida hasta tensión máxima (G_{fr}) empeora, de media, un 10% con respecto al mortero de referencia.

Figura 4.25. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento con fibra de basalto.

Cuando se trata de morteros de cemento con fibras mixtas, Figura 4.26, el análisis del diagrama de tensión-desplazamiento indica que la energía absorbida hasta la rotura (G_{fr}) empeora, de media, un 10% con respecto al mortero de referencia. No obstante, las energías absorbidas $G_{fL/150}$ y G_{fu} son superiores en un 26%, 103%, 194% y 175% y en un 26%, 120%, 303% y 268%, respectivamente, para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%.

Figura 4.26. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento con fibras mixtas.

El aumento de la capacidad de absorción de energía en morteros de cemento con adición de fibras ha sido comentado por numerosos autores [53, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 65, 69, 79, 80, 245].

Los resultados del análisis de los diagramas de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento aparecen reflejados en la Tabla 4.11.

Designación	G_{fr} (MPa)	δ_{max} (mm)	$G_{fL/150}$ (MPa)	G_{fu} (MPa)	δ_u (mm)	I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}	I_u
MC-R	0,595	0,195	0,595	0,595	0,195					1,00
MC-FV-0,33	0,588	0,157	1,152	1,513	0,892	1,79				2,57
MC-FV-0,66	0,530	0,144	1,257	1,549	1,128	2,09	2,69			2,92
MC-FV-1	0,569	0,180	1,746	2,363	1,616	2,74	3,61			4,15
MC-FV-1,33	0,391	0,131	1,218	1,570	1,257	2,53	3,31			4,02
MC-FC-0,33	0,441	0,137	0,966	1,152	0,931	1,91	2,28			2,61
MC-FC-0,66	0,510	0,152	1,494	1,813	1,442	2,55	3,13			3,56
MC-FC-1	0,522	0,175	2,130	3,770	2,816	3,49	4,95	6,28	7,14	7,22
MC-FC-1,33	0,439	0,157	1,616	2,054	1,618	3,11	4,03			4,68
MC-FB-0,33	0,550	0,153	0,822	0,822	0,423					1,49
MC-FB-0,66	0,473	0,146	0,944	0,978	0,781	1,78				2,07
MC-FB-1	0,633	0,186	1,433	1,725	1,393	2,12	2,56			2,73
MC-FB-1,33	0,493	0,165	1,142	1,263	1,060	2,13	2,48			2,56
MC-FM-0,33	0,519	0,147	0,750	0,750	0,444					1,45
MC-FM-0,66	0,561	0,159	1,210	1,308	0,913	1,96	2,31			2,33
MC-FM-1	0,557	0,170	1,747	2,397	1,784	2,75	3,62	4,31		4,31
MC-FM-1,33	0,508	0,160	1,637	2,188	1,628	2,73	3,61			4,31

Tabla 4.11. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento.

La energía absorbida en régimen elástico (G_{fr}) por los morteros de cemento con adición de fibras disminuye, de media, cerca de un 10% respecto al mortero de referencia. Esto se debe a que los materiales cementantes con fibras poseen un “límite de proporcionalidad” definido como la carga bajo la cual su comportamiento es totalmente elástico. Por debajo de este límite la influencia de la fisuración de la matriz de mortero puede despreciarse. Se puede suponer, por tanto, que los morteros con fibras se comportan elásticamente hasta este límite, como si se tratara de un mortero convencional con menores resistencias [246].

Los morteros de cemento presentan, de media, valores de absorción de energía a flexión ($G_{fL/150}$) superiores en un 55%, 106%, 196% y 136% cuando se adicionan fibras en porcentajes del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33% respectivamente. Mientras que los valores de absorción de energía hasta tensión última (G_{fu}) sufren un incremento en torno al 81%, 169%, 311% y 176% para los porcentajes de adición mencionados anteriormente. Se observa, por tanto, que la capacidad de absorción de energía aumenta según se incrementa la cantidad de fibra añadida hasta llegar al 1%, donde se alcanzan los valores máximos, mientras que para porcentajes del 1,33% se obtienen valores más cercanos al 0,66%. Esta merma de la capacidad de absorción de energía se debe a que para cantidades de fibras superiores al 1%, se necesita una mayor cantidad de conglomerante para “envolver” las fibras debido a su elevada superficie

específica. Este efecto ocurre tanto para morteros de cemento como de cal hidráulica, como se verá a continuación.

Para los morteros de cemento, las energías absorbidas $G_{fL/150}$ y G_{fu} aumentan en mayor medida cuando la fibra adicionada es de carbono. Así pues, la fibra de carbono presenta valores superiores en un 16% y 38% a la fibra de vidrio, en un 43% y 86% a la fibra de basalto y en un 16% y 42% a las mixtas. Este aumento se debe a que dichas fibras permiten mayores flechas antes del colapso, llegando a desplazamientos últimos de 2,8 mm, mientras que para las fibras de vidrio, basalto y mixtas estas son de 1,6 mm, 1,4 mm y 1,8 mm, respectivamente.

Los índices de tenacidad relacionan la absorción de energía en régimen elástico con la absorción de energía post-fisuración hasta un desplazamiento determinado, ofreciéndonos la visión más global de la ductilidad de los diferentes morteros. Solo se ha podido calcular el índice I_{30} , en morteros con adición de fibras de carbono con porcentajes de adición del 1%, lo que indica que es el mortero de cemento más dúctil, mostrando un índice superior a 7.

En la figura 4.27 se muestran los índices de tenacidad últimos de los morteros de cemento con fibras. Para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66% 1% y 1,33% la media de los índices últimos se sitúa en torno a 2, 3, 5 y 4, por lo que se puede concluir que independientemente del tipo de fibra y el porcentaje añadido a los morteros de cemento, éstos poseen una mayor ductilidad que sus homólogos de referencia.

Figura 4.27. Índices de tenacidad últimos de los morteros de cemento.

Examinado las curvas de tensión-desplazamiento (Figuras 4.28, 4.29, 4.30 y 4.31) observamos cuatro etapas diferenciadas en el comportamiento a flexión de los morteros de cal hidráulica con fibras. Hasta alcanzar una resistencia comprendida entre el 60%-70% de la resistencia máxima, el comportamiento es lineal (etapa I). A partir de este punto, el comportamiento sigue siendo sensiblemente lineal pero la pendiente de la recta

es inferior debido a la menor rigidez de la probeta provocada por la microfisuración (etapa II). Una vez alcanzada la resistencia máxima, el efecto de cosido de las fibras impide la rotura frágil, mostrando un comportamiento post-fisuración mejorado con respecto a los morteros sin fibras (etapas III y IV). En la tercera etapa, las cargas residuales caen rápidamente para luego estabilizarse e ir descendiendo lentamente hasta que se produce el colapso (etapa IV). Las etapas III y IV difieren en función del tipo y porcentaje de fibra añadida.

A continuación, se presentan los diagramas de tensión-desplazamiento de los morteros a flexión de cal hidráulica, comentándose parcialmente los resultados. Posteriormente se presentará la Tabla 4.12 que recoge los resultados del análisis elaborado.

En la Figura 4.28 se muestra el diagrama de tensión-desplazamiento de los morteros de cal hidráulica con fibra de vidrio. Comparando estos morteros con el de referencia, se observa un aumento de la capacidad de absorción de energía a flexión hasta rotura (G_{fr}) en un 230%, 217%, 371% y 407% para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33% respectivamente. Mientras que los valores de energía absorbida $G_{fL/150}$ y G_{fu} sufren incrementos del 1690% y 1690%, del 2268% y 2737%, del 2840% y 4132% y del 2596% y 3150%, respectivamente, para los porcentajes mencionados con anterioridad.

Figura 4.28. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cal hidráulica con fibra de vidrio.

Cuando se trata de morteros de cal hidráulica con fibras de carbono, Figura 4.29, el análisis del diagrama de tensión-desplazamiento muestra un aumento de las energías absorbidas a flexión; G_{fr} , $G_{fL/150}$ y G_{fu} ; en un 296%, 542%, 686% y 629%, en un 2060%, 3095%, 3202% y 3699% y en un 2410%, 6971%, 12073% y 6723%, respectivamente, sobre los morteros de referencia, para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%.

Figura 4.29. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cal hidráulica con fibra de carbono.

Para los morteros de cal hidráulica con fibra de basalto, Figura 4.30, el análisis del diagrama de tensión-desplazamiento refleja un aumento de la energía absorbida a flexión hasta tensión de rotura en un 189%, 653%, 665% y 740% sobre el mortero convencional, para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%. Mientras que los valores de absorción de energía a flexión $G_{fL/150}$ y G_{fu} , sufren incrementos del 887% y 897%, del 3043% y 4302%, del 3466% y 5981% y del 3013% y 3605%, respectivamente, para los porcentajes de adición mencionados anteriormente.

Figura 4.30. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cal hidráulica con fibra de basalto.

En la Figura 4.31 se muestra el diagrama de tensión-desplazamiento de los morteros de cal hidráulica con fibras mixtas. La energía absorbida hasta rotura (G_{rf}) es superior en un 203%, 349%, 564% y 556% a los morteros convencionales, para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%. Mientras que los valores de absorción de

energía $G_{fL/150}$ y G_{fu} son superiores en un 2121%, 2864%, 3437% y 3153% y en un 2351%, 3518%, 5464% y 4685%, respectivamente, para los porcentajes de adición mencionados anteriormente.

Figura 4.31. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cal hidráulica con fibras mixtas.

Los resultados del análisis de los diagramas de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento aparecen reflejados en la Tabla 4.12.

Designación	G_{fr} (MPa)	δ_{max} (mm)	$G_{fL/150}$ (MPa)	G_{fu} (MPa)	δ_u (mm)	I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}	I_u
Mca-R	0,016	0,034	0,016	0,016	0,060					1,00
Mca-FV-0,33	0,054	0,060	0,294	0,294	0,503	2,47	3,92			5,43
Mca-FV-0,66	0,052	0,062	0,388	0,465	0,875	2,46	4,02	6,57		8,95
Mca-FV-1	0,077	0,082	0,482	0,694	1,178	2,25	4,49	7,45		8,98
Mca-FV-1,33	0,083	0,088	0,442	0,533	0,948	2,36	4,30	6,11		6,41
Mca-FC-0,33	0,065	0,090	0,354	0,412	0,820	2,76	4,33			6,34
Mca-FC-0,66	0,105	0,124	0,524	1,160	2,008	3,16	5,06	8,25		11,01
Mca-FC-1	0,129	0,134	0,542	1,996	3,250	2,77	4,58	8,27	10,86	15,49
Mca-FC-1,33	0,120	0,128	0,639	1,119	1,633	3,46	5,57	8,45		9,36
Mca-FB-0,33	0,047	0,063	0,164	0,164	0,284	2,09	3,24			3,45
Mca-FB-0,66	0,124	0,134	0,515	0,722	1,035	2,78	4,50			5,84
Mca-FB-1	0,126	0,130	0,585	0,997	1,389	3,03	4,91	6,89		7,95
Mca-FB-1,33	0,138	0,140	0,511	0,608	0,867	2,69	4,07			4,41
Mca-FM-0,33	0,066	0,070	0,364	0,402	0,843	2,58	4,15	6,08		6,08
Mca-FM-0,66	0,074	0,077	0,486	0,593	0,929	2,92	4,85	7,55		8,06
Mca-FM-1	0,109	0,107	0,580	0,912	1,439	3,35	5,24	7,79		8,38
Mca-FM-1,33	0,108	0,115	0,533	0,785	1,250	3,11	4,79	7,12		7,29

Tabla 4.12. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cal hidráulica.

Los morteros de cal hidráulica experimentan un aumento de la capacidad de absorción de energía cuando se le añaden fibras. Este comportamiento ya ha sido reportado por diversos autores [84,86].

La energía absorbida a flexión hasta tensión máxima (G_{rf}), se incrementa, de media, un 155%, 340%, 472% y 473%, cuando se adicionan porcentajes de fibras del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33% respectivamente con respecto a los morteros de referencia. Mientras que energía absorbida a flexión $G_{fL/150}$ y G_{fu} , se incrementa en un 1592%, 2717%, 3136% y 3040% y en un 1737%, 4282%, 6818% y 4441%, respectivamente, para los porcentajes de adición mencionados anteriormente.

Por tanto, la absorción de energía aumenta según se incrementa el porcentaje de fibra hasta llegar al 1%, donde se alcanzan los valores máximos, mientras que para porcentajes del 1,33% se obtienen valores más cercanos al 0,66%.

Comparando las distintas fibras, los morteros de cal hidráulica con fibras de carbono son los que presentan una mayor capacidad de absorción de energía. Los valores de absorción de energía a flexión $G_{fL/150}$ y G_{fu} son superiores en un 28% y 120% sobre la fibra de vidrio, un 16% y 116% sobre la fibra de basalto y un 5% y 73% sobre las mixtas. El aumento de estos valores cuando se adiciona fibra de carbono se debe a que dichas fibras permiten una mayor flecha de la probeta antes del colapso, llegando a desplazamientos últimos de 3,25 mm, mientras que para las fibras de vidrio, basalto y mixtas estas son de 1,18 mm, 1,4 mm y 1,4 mm, respectivamente.

Debido a la elevada capacidad de deformación necesaria para que se produzca la rotura de los morteros de cal hidráulica ensayados, solo se ha podido calcular el índice I_{30} , en morteros con fibras de carbono (1%), mostrando un valor cercano a 11. En la Figura 4.32 se muestran los índices de tenacidad últimos de los morteros de cal hidráulica con fibras. Para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66% 1% y 1,33% la media de los índices últimos se sitúa en torno a 5, 8, 10 y 7.

Figura 4.32. Índices de tenacidad últimos de los morteros de cal hidráulica.

Cabe señalar que existe una desviación estándar, entre el 5% y el 15%, en el cálculo de las absorciones de energía en probetas con la misma dosificación, debido en gran medida a una mala dispersión o a la orientación ineficiente de las fibras [69,80]. Si la concentración de fibra es demasiado alta o demasiado baja, o si las fibras no están alineadas en la dirección de la tensión aplicada cerca de la zona de fractura, su eficiencia en la absorción de energía no se optimiza. Este efecto ocurre para ambos tipos de conglomerante.

4.4.3 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión es uno de los parámetros principales para seleccionar el tipo de mortero a utilizar en obra. Proporciona una idea de la cohesión interna del mortero, indicando su capacidad de soportar cargas sin disgregarse; es indicativa de la calidad mecánica del mortero y puede relacionarse con otras propiedades como la adherencia y la durabilidad.

La resistencia a compresión del mortero depende en gran parte del tipo y la cantidad del conglomerante y de la relación agua-conglomerante; aumentará con un incremento del contenido de cemento y disminuirá con un aumento de la inclusión de aire o del contenido de agua. Igualmente depende de las adicciones o aditivos incorporados al mortero.

La norma UNE-EN 998-2 [242], clasifica los morteros en función de su resistencia a compresión a los 28 días, tal y como se indica en la Tabla 4.13.

Clase	M1	M2	M5	M10	M15	M20	Md*
Resistencia a compresión (MPa)	1	2,5	5	10	15	20	d

* d es una resistencia a compresión superior a 25 MPa declarada por el fabricante.

Tabla 4.13. Clases de mortero según UNE-EN 998-2 [219].

Mientras que la norma UNE-1504-3 [174], clasifica los morteros de reparación en función de su resistencia a compresión a los 28 días, tal y como se indica en la Tabla 4.14.

Clase	Clase R4	Clase R3	Clase R2	Clase R1
Resistencia a compresión (MPa)	≥ 45	≥ 25	≥ 15	≥ 10

Tabla 4.14. Clases de mortero según UNE-EN 1504-3 [174].

Para la determinación de la resistencia a compresión de la probeta se ha utilizado la máquina de ensayo, Ibertest modelo MIB-60/AM, que permite controlar la carga por deformación. Se realiza en cada una de las dos mitades (semiprismáticas) resultantes del ensayo de resistencia a flexión, aplicando una velocidad de carga de 1 mm/min con el objetivo de determinar los diagramas de tensión-deformación a compresión de los morteros, Figura de 4.33.

Figura 4.33. Determinación de la resistencia a compresión.

La resistencia a compresión, R_c , de cada probeta se calcula por medio de la siguiente expresión (4.7):

$$R_c = 1,5 * \frac{F}{S} \quad (4.7)$$

Donde,

- R_c Resistencia a compresión en MPa
- F Carga máxima aplicada a la probeta en N
- S Sección transversal de la probeta mm²

4.4.3.a Resultados

Para cada dosificación de mortero se han ensayado seis probetas a 28 y otras seis a 120 días de edad. El valor obtenido es el resultado de la media aritmética de los valores individuales. En la Tabla 4.15 aparece los valores obtenidos de las resistencias a compresión para los morteros de cemento.

Designación	Resistencia a compresión (MPa)		Reducción respecto a la referencia (%)	
	28 días	120 días		
MC-R	23,63	37,31	0	0
MC-FV-0,33	23,27	35,12	2	6
MC-FV-0,66	21,17	34,05	10	9
MC-FV-1	20,22	31,74	14	15
MC-FV-1,33	19,15	31,21	19	16
MC-FC-0,33	22,01	34,35	7	8
MC-FC-0,66	20,03	32,72	15	12
MC-FC-1	19,72	32,01	17	14
MC-FC-1,33	19,10	30,48	19	19
MC-FB-0,33	21,93	34,91	7	6
MC-FB-0,66	21,23	33,53	10	10
MC-FB-1	20,82	31,33	12	16
MC-FB-1,33	19,36	30,08	18	20
MC-FM-0,33	22,84	36,62	3	2
MC-FM-0,66	21,74	33,07	8	12
MC-FM-1	20,95	31,97	11	14
MC-FM-1,33	19,58	30,75	17	18

Tabla 4.15. Resistencia a compresión para los morteros de cemento.

Se observa que el mortero de cemento sufre una pérdida progresiva de resistencia a compresión según aumenta en contenido de fibras, independientemente del tipo de fibra utilizada, hasta llegar al 1,33% donde se producen las mayores mermas de resistencia. Así pues, la inclusión de los distintos tipos de fibras supone, de media, una pérdida de resistencia a compresión a 28 días en torno al 5%, 11%, 14% y 18% para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33 respectivamente, mientras que las resistencias de los morteros ensayados a 120 días caen cerca del 6%, 11%, 15% y 18%, acusando las mayores pérdidas cuando se adiciona fibra de carbono y basalto.

Esto es frecuente en materiales de cemento reforzados con fibras [61,65,67], ya que, a menos que el contenido de fibras sea muy bajo (inferior a aproximadamente 0,2% [247], las fibras de la mezcla no son tan efectivas como los agregados (mismo volumen) para resistir las compresiones. A esto habría que añadir el aumento del aire ocluido en las mezclas como causa directa de la pérdida de resistencia a compresión.

En las Figuras 4.34 y 4.35 se aprecia el comportamiento a compresión de los morteros de cemento descrito anteriormente. Se puede ver la gran similitud en el comportamiento de los morteros independientemente del tipo de fibra adicionada.

Como era de esperar se produce una ganancia de resistencia a compresión de los morteros de cemento con fibras con el transcurso de los días. Así pues, comparando los

valores obtenidos tras el ensayo a 28 días y a 120 días, se observan aumentos entre un 50% y un 60% de la resistencia a compresión.

Figura 4.34. Resistencia a compresión a 28 días para los morteros de cemento.

Figura 4.35. Resistencia a compresión a 120 días para los morteros de cemento.

En las Tabla 4.16 aparece los valores obtenidos de las resistencias a compresión para los morteros de cal hidráulica.

Designación	Resistencia a compresión (MPa)		Aumento respecto a la referencia (%)	
	28 días	120 días		
MCa-R	2,49	5,95	0	0
MCa-FV-0,33	2,98	7,16	20	20
MCa-FV-0,66	3,30	7,40	33	24
MCa-FV-1	3,78	8,52	52	43
MCa-FV-1,33	3,81	7,94	53	33
MCa-FC-0,33	2,60	6,20	4	4
MCa-FC-0,66	3,02	6,84	21	15
MCa-FC-1	3,29	7,40	32	24
MCa-FC-1,33	3,32	7,30	33	23
MCa-FB-0,33	2,72	6,60	9	11
MCa-FB-0,66	3,46	7,14	39	20
MCa-FB-1	3,60	7,79	45	31
MCa-FB-1,33	3,44	7,30	38	23
MCa-FM-0,33	3,00	6,70	20	13
MCa-FM-0,66	3,11	7,07	25	19
MCa-FM-1	3,65	7,70	47	29
MCa-FM-1,33	3,61	7,52	45	26

Tabla 4.16. Resistencia a compresión para los morteros de cal hidráulica.

En morteros de cal hidráulica, independientemente del tipo de fibra adicionada se observa un aumento de las resistencias a compresión respecto a los morteros convencionales, con valores superiores al 13% para probetas MCa-F-0,33; alrededor del 28% en dosificaciones MCa-F-0,66, que llegan al 44% de aumento en la compresión en mezclas con adición del 1% en fibras (MCa-F-1) y cercanas al 42% en probetas MCa-F-1,33. Mientras que la resistencia a 120 días también aumenta un 12%, 20%, 32% y 26% cuando se le adicionan fibras en porcentajes del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33 respectivamente. Los valores más elevados se han registrado con la adición de fibras de vidrio.

En las Figuras 4.36 y 4.37 se aprecia que la evolución de las resistencias a compresión según aumenta el contenido de fibras, tanto a 28 días como 120 días, es muy similar para todas las fibras.

Figura 4.36. Resistencia a compresión a 28 días para los morteros de cal hidráulica.

Figura 4.37. Resistencia a compresión a 120 días para los morteros de cal hidráulica.

El aumento de las resistencias a compresión no es progresivo, ya que para mezclas con adiciones del 1,33%, los valores obtenidos son iguales o inferiores a los alcanzados con un 1%. Este comportamiento indica que, para un mortero de cal hidráulica con una dosificación dada, existe un porcentaje máximo de fibras a partir del cual estas no mejoran la resistencia a compresión.

Al igual que ocurre en morteros de cemento, los morteros de cal hidráulica sufren una mejora de las resistencias a compresión con el transcurso de los días. Este aumento se sitúa entre un 110% y un 140% dependiendo del tipo y porcentaje de fibra añadida.

En la Figura 4.38 se comparan los resultados de resistencia a compresión y de aire ocluido obtenidos en morteros de cemento. La correlación es igual a 0,93 cuando se ensayan a 28 días y a 0,91 cuando son ensayados a 120 días. Esto se debe a que el

aumento del aire ocluido da como consecuencia un mortero menos compacto y por lo tanto menos resistente.

Figura 4.38. Correlación entre la resistencia a compresión de los morteros de cemento y en porcentaje de aire ocluido.

En el caso de morteros de cal hidráulica no existe dicha correlación, ya que la resistencia a compresión mejora con la inclusión de fibras a pesar del claro aumento de la cantidad de aire ocluido en la mezcla.

4.4.4 Capacidad de absorción de energía a compresión

Para determinar la ductilidad a compresión de los morteros, se ha seguido el procedimiento descrito en la norma UNE 83508 [248] que describe el método de ensayo estándar para el cálculo del índice de tenacidad a compresión de hormigones con fibras.

Esta norma analiza la capacidad de absorción de energía del material mediante el cálculo del área bajo la curva carga-desplazamiento y, por tanto, no tiene en cuenta las características geométricas de la probeta. Como consecuencia, y a efectos de comparación entre las distintas tipologías de probeta planteadas en el capítulo siguiente, se determinó la densidad de energía de deformación a compresión. La densidad de energía de deformación se obtiene calculando el área bajo la curva de tensión-deformación hasta una deformación variable, ε , tal como indica la siguiente ecuación (4.8):

$$E_{\bar{\varepsilon}} = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \delta \varepsilon \, d\varepsilon \quad (4.8)$$

De este modo, mediante el análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión se tiene en cuenta las características geométricas de la probeta. Se han calculado los siguientes parámetros:

E_{cr}	Densidad de energía de deformación a compresión hasta tensión de rotura en MPa
ϵ_{max}	Deformación máxima a compresión en ‰
$E_{c1,125}$	Densidad de energía de deformación a compresión en MPa
E_{cu}	Densidad de energía de deformación a compresión hasta tensión última en MPa
ϵ_u	Deformación última a compresión en ‰

La densidad de energía de deformación a compresión hasta tensión de rotura (E_{cr}) cuantifica la cantidad de energía necesaria para producir la rotura a compresión, y se calcula mediante la integración de la curva de tensión-deformación hasta el punto de tensión máxima.

La densidad de energía de deformación a compresión hasta un desplazamiento 1,125mm ($E_{c1,125}$), es la energía que es necesaria comunicar a la probeta en el ensayo para que ésta alcance desplazamiento de 1,125mm. Igualmente se ha calculado la densidad de energía de deformación a compresión hasta tensión última (E_{cu}), que mide la energía absorbida hasta una resistencia residual inferior a 5 MPa en morteros de cemento e inferior a 1 MPa en morteros de cal hidráulica.

4.4.4.a Resultados

Para comprender la influencia de las fibras en el comportamiento post-fisuración a compresión de los morteros de cemento hay que examinar los diagramas de tensión-deformación (Figuras 4.39, 4.40, 4.41 y 4.42; ensayos a 28 días; y Figuras 4.43, 4.44, 4.45 y 4.46; ensayos a 120 días). Puede dividirse en 3 etapas. Hasta alcanzar una tensión aproximadamente un 95% de la alcanzada en el ensayo, el comportamiento es lineal (etapa I). A partir de este punto, pierde la linealidad debido a la menor rigidez provocada por la microfisuración (etapa II). Una vez alcanzado la resistencia máxima, las resistencias residuales caen, necesitando para ello una mayor o menor deformación en función del tipo y la cantidad de fibras adicionadas (etapa III).

A continuación, se presentan los diagramas de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento ensayados a 28 días, comentándose parcialmente los resultados de las diferentes mezclas. Posteriormente se presentará la Tabla 4.17 que recoge los resultados del análisis realizado.

En la Figura 4.39 se muestra el diagrama de tensión-deformación a compresión a 28 días de los morteros de cemento con fibras de vidrio. La densidad de energía a compresión, $E_{c1,125}$, es inferior a la marcada por los morteros de referencia en un 3%, 13%, 10% y 11% para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%, mientras que los valores de densidad de energía últimos son superiores en un 9%, 1%, 29% y 22%.

Figura 4.39. Diagrama de tensión-deformación a compresión a 28 días de los morteros de cemento con fibra de vidrio.

Para los morteros de cemento con fibra de carbono, Figura 4.40, el análisis del diagrama de tensión-deformación refleja un descenso de la densidad de energía de deformación a compresión, $E_{c1,125}$, en un 1%, 6%, 6% y 11% sobre el mortero convencional para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%, respectivamente. Mientras que los valores de densidad de energía, E_{cu} , sufren un incremento en torno al 57%, 58%, 92% y 74%.

Figura 4.40. Diagrama de tensión-deformación a compresión a 28 días de los morteros de cemento con fibra de carbono.

En la Figura 4.41 se muestra el diagrama de tensión-deformación de los morteros de cemento con fibra de basalto. Comparándolos con el mortero de referencia, se observa un descenso de la densidad de energía de deformación, $E_{c1,125}$, en un 3%, 8%, 9% y 11% cuando se adicionan fibras en porcentajes del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%,

respectivamente. Mientras que los valores de densidad de energía últimos sufren un incremento en torno al 16%, 17%, 22% y 15%.

Figura 4.41. Diagrama de tensión-deformación a compresión a 28 días de los morteros de cemento con fibra de basalto.

Cuando se trata de morteros de cemento con fibras mixtas, Figura 4.42, las curvas muestran una caída de la densidad de energía de deformación a compresión, $E_{c1,125}$, en un 0%, 1%, 3% y 4% con respecto a la referencia para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%. Cuando la probeta se somete a altas deformaciones, E_{cu} , se produce un incremento de la energía absorbida en un 33%, 41%, 50% y 40%.

Figura 4.42. Diagrama de tensión-deformación a compresión a 28 días de los morteros de cemento con fibras mixtas.

Los resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento ensayados a 28 días aparecen reflejados en la Tabla 4.17.

Designación	E_{cr} (MPa)	ϵ_{max}	$E_{c1,125}$ (MPa)	E_{cu} (MPa)	ϵ_u
MC-R	0,15546	0,01106	0,46523	0,55838	0,04012
MC-FV-0,33	0,10587	0,00763	0,45162	0,60623	0,04832
MC-FV-0,66	0,15707	0,01299	0,40340	0,61235	0,04802
MC-FV-1	0,13507	0,01020	0,42042	0,72059	0,06630
MC-FV-1,33	0,12189	0,00941	0,41519	0,67939	0,06276
MC-FC-0,33	0,11332	0,00839	0,46812	0,87702	0,07394
MC-FC-0,66	0,10790	0,00882	0,43725	0,88472	0,08024
MC-FC-1	0,14677	0,01173	0,43658	1,07406	0,10445
MC-FC-1,33	0,26760	0,02035	0,41414	0,97219	0,08275
MC-FB-0,33	0,09343	0,00704	0,44930	0,64976	0,05362
MC-FB-0,66	0,12012	0,00856	0,42930	0,65183	0,05726
MC-FB-1	0,13594	0,01053	0,42238	0,68053	0,06110
MC-FB-1,33	0,12740	0,00980	0,41352	0,64374	0,05643
MC-FM-0,33	0,13279	0,00917	0,47562	0,74076	0,05714
MC-FM-0,66	0,13109	0,00974	0,46084	0,78648	0,06610
MC-FM-1	0,14650	0,01144	0,45240	0,83808	0,07179
MC-FM-1,33	0,16418	0,01190	0,44687	0,78014	0,06365

Tabla 4.17. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión a 28 días de los morteros de cemento.

La densidad de energía de deformación a compresión en régimen elástico de los morteros con fibras ensayados a 28 días es inferior en todos los casos a la registrada por el mortero de referencia, excepto para la mezcla MC-FC-1,33 y MC-FM-1,33. También se observa una caída de los valores de densidad de energía, $E_{c1,125}$, respecto a la referencia del 1%, 7%, 7% y 9%, mientras que los valores de densidad de energía, E_{cu} , experimentan un incremento del 29%, 29%, 48% y 38% para los porcentajes 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%, respectivamente.

Comparando la naturaleza de las fibras, los morteros con fibra de carbono presentan los mejores resultados. La adición de estas fibras supone un incremento de la densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} de los morteros en un 4% y 48% sobre la fibra de vidrio, en un 2% y 45% sobre la fibra de basalto y en un 1% y 21% sobre las mixtas. Este aumento se debe al incremento de la capacidad de deformación, llegando a deformaciones unitarias últimas de 0,105, mientras que para las fibras de vidrio, basalto y mixtas estas son de 0,066, 0,061 y 0,072, respectivamente.

Seguidamente se presentan los diagramas de tensión-deformación a compresión a 120 días de los morteros de cemento, comentándose parcialmente los resultados de las diferentes mezclas. Posteriormente se presentará la Tabla 4.18 que recoge los resultados del análisis elaborado

Para los morteros de cemento con fibra de vidrio ensayados a 120 días, Figura 4.43, el análisis del diagrama de tensión-deformación a compresión refleja, un aumento de la densidad de energía, $E_{c1,125}$, en un 6% y 2% sobre el mortero convencional para los porcentajes de adición del 0,33% y 0,66%, mientras que para las adiciones del 1% y 1,33%, disminuye un 5% para ambos. Los valores de densidad de energía, E_{cu} , sufren un incremento en torno al 11%, 2%, 12% y 1% con la adición de fibras.

Figura 4.43. Diagrama de tensión-deformación a compresión a 120 días de los morteros de cemento con fibra de vidrio.

Cuando se trata de morteros de cemento con fibras carbono, Figura 4.44, el diagrama de tensión-deformación refleja que la densidad de energía de deformación, $E_{c1,125}$, aumenta un 9%, 7%, 2% y 3% con respecto a la referencia para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%, mientras que la densidad de energía, E_{cu} , se incrementa en un 38%, 37%, 48% y 12%.

Figura 4.44. Diagrama de tensión-deformación a compresión a 120 días de los morteros de cemento con fibra de carbono.

En la Figura 4.45 se muestra el diagrama de tensión-deformación de los morteros de cemento con fibra de basalto. La densidad de energía de deformación, $E_{c1,125}$, es superior a la marcada por los morteros de referencia en un 3% y 1% para los porcentajes de adición del 0,33% y 0,66%, mientras que para las adiciones del 1% y 1,33%, disminuye en un 3% y 8%. La densidad de energía, E_{cu} , sufre un incremento en torno al 5%, 4%, y 7% cuando se adicionan porcentajes del 0,33%, 0,66% y 1%, mientras que para el 1,33% cae un 13%.

Figura 4.45. Diagrama de tensión-deformación a compresión a 120 días de los morteros de cemento con fibra de basalto.

En la Figura 4.46 se muestra el diagrama de tensión-deformación de los morteros de cemento con fibras mixtas. Comparándolos con los morteros de referencia, se observa un aumento de la densidad de energía de deformación, $E_{c1,125}$, en un 17%, 3%, 0% y 1% para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33% respectivamente. Mientras que los valores de densidad de energía, E_{cu} , sufren un incremento en torno al 28%, 19%, 37% y 13%.

Figura 4.46. Diagrama de tensión-deformación a compresión a 120 días de los morteros de cemento con fibras mixtas.

Los resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento ensayados a 120 días aparecen reflejados en la Tabla 4.18.

Designación	E_{cr} (MPa)	ϵ_{max}	$E_{c1,125}$ (MPa)	E_{cu} (MPa)	ϵ_u
MC-R	0,38208	0,01652	0,61103	1,00834	0,05045
MC-FV-0,33	0,18896	0,01017	0,64493	1,12030	0,06258
MC-FV-0,66	0,23775	0,01215	0,62033	1,03280	0,06567
MC-FV-1	0,23323	0,01253	0,58272	1,12760	0,07608
MC-FV-1,33	0,22383	0,04675	0,57769	0,94597	0,06498
MC-FC-0,33	0,23630	0,01165	0,66531	1,38808	0,08483
MC-FC-0,66	0,24303	0,01208	0,65089	1,38625	0,08178
MC-FC-1	0,25178	0,01268	0,62139	1,49668	0,09875
MC-FC-1,33	0,25011	0,01298	0,62938	1,12901	0,08367
MC-FB-0,33	0,21750	0,01110	0,63212	1,05585	0,06348
MC-FB-0,66	0,20293	0,01078	0,61214	1,05055	0,07060
MC-FB-1	0,19673	0,01080	0,59262	1,07516	0,06858
MC-FB-1,33	0,19302	0,01090	0,55946	0,87829	0,05910
MC-FM-0,33	0,27722	0,01355	0,71308	1,29012	0,06860
MC-FM-0,66	0,22946	0,11750	0,62654	1,20166	0,07315
MC-FM-1	0,02289	0,01213	0,61027	1,38282	0,08950
MC-FM-1,33	0,27113	0,01398	0,61759	1,14230	0,07075

Tabla 4.18. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión a 120 días de los morteros de cemento.

La densidad de energía de deformación a compresión hasta rotura de los morteros con fibras ensayados a 120 días es, de media, un 40% inferior en todos los casos a la

registrada por el mortero de referencia. Los valores de densidad de energía, $E_{c1,125}$, de los morteros reforzados registran un incremento de un 9% y 3% cuando se añaden porcentajes de fibras del 0,33% y 0,66%, mientras que para adiciones del 1% y 1,33% los valores caen un 2% en ambos casos. Los valores de densidad de energía, E_{cu} , se incrementan un incremento del 20%, 16%, 26% y 2% para los porcentajes 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33% respectivamente.

Los morteros con fibras de carbono son los que tienen una mayor capacidad de absorción de energía a compresión. De media, la fibra de carbono mejora la densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} de los morteros en un 6% y 28% sobre la fibra de vidrio, en un 7% y 33% sobre la fibra de basalto y en un 1% y 8% sobre las mixtas, respectivamente. Este aumento se debe a que dichas fibras permiten una deformación superior, llegando a deformaciones unitarias últimas de 0,098, mientras que para las fibras de vidrio, basalto y mixtas estas son de 0,076, 0,070 y 0,089 respectivamente.

Comparando los resultados obtenidos en los morteros de cemento ensayados a 28 y a 120 días observamos como los valores de densidad de energía de deformación E_{cr} , $E_{c1,125}$ y E_{cu} , se incrementan, de media, un 70%, un 42% y un 57% respectivamente, con el paso de los días. Esto se debe al incremento de las resistencias a compresión en un 57% y de las deformaciones en un 15%.

Para comprender la influencia de las fibras en el comportamiento post-fisuración a compresión de los morteros de cal hidráulica hay que examinar los diagramas de tensión-deformación (Figuras 4.47, 4.48, 4.49 y 4.50; ensayos a 28 días; y Figuras 4.51, 4.52, 4.53 y 4.54; ensayos a 120 días). Puede dividirse en 3 etapas. Hasta alcanzar una tensión aproximada del 70% la resistencia máxima, el comportamiento es lineal (etapa I). A partir de este punto, comienza a perder linealidad debido a la menor rigidez provocada por la microfisuración tomando forma de parábola (etapa II). Una vez alcanzada la carga máxima, las resistencias residuales caen, necesitando para ello una mayor o menor deformación en función de la cantidad de fibras adicionadas (etapa III).

A continuación, se presentan los diagramas de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica ensayados a 28 días, comentándose parcialmente los resultados de las diferentes mezclas. Posteriormente se presentará la Tabla 4.19 que recoge los resultados del análisis realizado.

En la Figura 4.47 se muestra el diagrama de tensión-deformación a compresión a 28 días de los morteros de cal hidráulica con fibra de vidrio. La densidad de energía de deformación hasta tensión de rotura es superior en un 81%, 162%, 189% y 200% sobre los morteros convencionales, cuando se adicionan porcentajes de fibras del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%. Mientras que los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} , son superiores en un 20%, 29%, 43% y 40% y en un 100%, 142%, 220% y 204%, respectivamente, para los porcentajes mencionados anteriormente.

Figura 4.47. Diagramas a compresión a 28 días de los morteros de cal hidráulica con fibra de vidrio.

Cuando se trata de morteros de cal hidráulica con fibras de carbono, Figura 4.48, el análisis de las curvas arroja unos valores de densidad de energía de deformación E_{cr} , $E_{c1,125}$ y E_{cu} , superiores en un 78%, 109%, 138% y 168%, en un 3%, 20%, 29% y 29% y en un 87%, 127%, 214% y 150% sobre los morteros de referencia, para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%, respectivamente.

Figura 4.48. Diagramas a compresión a 28 días de los morteros de cal hidráulica con fibra de carbono.

Para los morteros de cal hidráulica con fibra de basalto, Figura 4.49, el análisis del diagrama refleja un aumento de la densidad de energía de deformación hasta rotura en un 73%, 163%, 186% y 102% sobre el mortero convencional, con la adición de porcentajes de fibras del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%. Mientras que los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} , sufren un incremento del 4% y 73%, del 30% y 134%,

del 32% y 197% y del 29% y 236%, respectivamente, para los porcentajes de adición mencionados anteriormente.

Figura 4.49. Diagramas a compresión a 28 días de los morteros de cal hidráulica con fibra de basalto.

En la Figura 4.50 se muestra el diagrama de tensión-deformación de los morteros de cal hidráulica con fibras mixtas. Comparándolos con el de referencia, se observa un aumento de la densidad de energía, E_{cr} , de estos morteros en un 67%, 93%, 134% y 128% para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%. Mientras que las densidades de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} , sufren un incremento del 13% y 85%, del 13% y 137%, del 39% y 246% y del 46% y 187%, respectivamente, para los porcentajes de adición mencionados anteriormente.

Figura 4.50. Diagramas a compresión a 28 días de los morteros de cal hidráulica con fibras mixtas.

Los resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica ensayados a 28 días aparecen reflejados en la Tabla 4.19.

Designación	E_{cr} (MPa)	ϵ_{max}	$E_{c1,125}$ (MPa)	E_{cu} (MPa)	ϵ_u
MCa-R	0,03091	0,01665	0,05922	0,12278	0,06263
MCa-FV-0,33	0,05589	0,02303	0,07097	0,24577	0,11540
MCa-FV-0,66	0,08094	0,02955	0,07627	0,29656	0,12773
MCa-FV-1	0,08930	0,02955	0,08441	0,39292	0,15790
MCa-FV-1,33	0,09279	0,03080	0,08284	0,37280	0,15730
MCa-FC-0,33	0,05512	0,02598	0,06074	0,22922	0,11570
MCa-FC-0,66	0,06445	0,02600	0,07085	0,27911	0,13103
MCa-FC-1	0,07356	0,02720	0,07659	0,38524	0,17465
MCa-FC-1,33	0,08292	0,03010	0,07640	0,30650	0,13463
MCa-FB-0,33	0,05337	0,02503	0,06175	0,21298	0,10430
MCa-FB-0,66	0,08145	0,02948	0,07690	0,28737	0,11735
MCa-FB-1	0,08840	0,03103	0,07803	0,36487	0,15705
MCa-FB-1,33	0,06238	0,02410	0,07632	0,41236	0,19008
MCa-FM-0,33	0,05159	0,02295	0,06690	0,22772	0,10925
MCa-FM-0,66	0,05953	0,02573	0,06686	0,29088	0,13753
MCa-FM-1	0,07241	0,02540	0,08228	0,42437	0,18958
MCa-FM-1,33	0,07054	0,02368	0,08643	0,35213	0,14915

Tabla 4.19. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión a 28 días de los morteros de cal hidráulica.

La capacidad de absorción de energía a compresión de los morteros de cal hidráulica con fibras ensayados a 28 días es superior, en todos los casos, a la registrada por el mortero de referencia. Así pues, con la adición de fibras en porcentajes del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33% se produce un incremento medio de la densidad de energía hasta tensión de rotura en un 75%, 132%, 162% y 150%, respectivamente. También se observa un aumento de los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ del 10%, 23%, 36% y 36%, mientras que los valores de densidad de energía últimos experimentan un incremento sobre el 86%, 135%, 219% y 194%. Por lo tanto, la adición de fibras supone un mejor comportamiento post-agrietamiento, observándose los mejores datos cuando se añade un 1% de fibras.

Los morteros de cal hidráulica ensayados a 28 días son capaces de absorber una mayor cantidad de energía cuando se le adicionan fibras de vidrio. Estas fibras presentan valores superiores de densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} en un 11% y 9% sobre la fibra de carbono, en un 7% y 2% sobre la fibra de basalto y en un 4% y 1% sobre las mixtas, respectivamente.

Seguidamente se presentan los diagramas de tensión-deformación a compresión a 120 días de los morteros de cal hidráulica, comentándose parcialmente los resultados de las diferentes mezclas. Posteriormente se presentará la Tabla 4.20 que recoge los resultados del análisis elaborado.

En la Figura 4.51 se muestra el diagrama de tensión-deformación a compresión a 120 días de los morteros de cal hidráulica con fibra de vidrio. La densidad de energía de deformación hasta rotura es superior en un 55%, 124%, 175% y 147% a los morteros convencionales, cuando se adicionan porcentajes de fibras del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%. Los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} , son superiores en un 43%, 47%, 69% y 53% y en un 71%, 112%, 169% y 112%, respectivamente, para los porcentajes de adición mencionados anteriormente.

Figura 4.51. Diagramas a compresión a 120 días de los morteros de cal hidráulica con fibra de vidrio.

En la Figura 4.52 se muestra el diagrama de tensión-deformación de los morteros de cal hidráulica con fibra de carbono. Comparándolos con el de referencia, se observa un aumento de la densidad de energía E_{cr} de estos morteros en un 74%, 160%, 202% y 239% para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33% respectivamente. Mientras que las densidades de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} , sufren un incremento del 16% y 76%, del 27% y 143%, del 37% y 189% y del 45% y 203%, respectivamente, para los porcentajes de adición ya citados.

Figura 4.52. Diagramas a compresión a 120 días de los morteros de cal hidráulica con fibra de carbono.

Cuando se trata de morteros de cal hidráulica con fibras de basalto, Figura 4.53, el análisis de las curvas muestra unos valores de densidad de energía de deformación E_{cr} , $E_{c1,125}$ y E_{cu} , superiores en un 55%, 64%, 110% y 149%, en un 21%, 34%, 50% y 45% y en un 23%, 50%, 94% y 105%, respectivamente, sobre los morteros de referencia, cuando se adicionan porcentajes de fibras del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%.

Figura 4.53. Diagramas a compresión a 120 días de los morteros de cal hidráulica con fibra de basalto.

Para los morteros de cal hidráulica con fibra de basalto, Figura 4.54, el análisis del diagrama de tensión-deformación refleja un aumento de la densidad de energía de deformación hasta rotura en un 41%, 43%, 115% y 174% sobre el mortero convencional, para los porcentajes de adición del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33%, respectivamente. Mientras que los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} , sufren un incremento del 39% y 25%, del 42% y 63%, del 60% y 137% y del 53% y 122% para adiciones citadas.

Figura 4.54. Diagramas a compresión a 120 días de los morteros de cal hidráulica con fibras mixtas.

Los resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica ensayados a 120 días aparecen reflejados en la Tabla 4.20.

Designación	E_{cr} (MPa)	ϵ_{max}	$E_{c1,125}$ (MPa)	E_{cu} (MPa)	ϵ_u
MCa-R	0,04712	0,01083	0,11158	0,24096	0,05978
MCa-FV-0,33	0,07317	0,01375	0,15983	0,41100	0,09625
MCa-FV-0,66	0,10567	0,01945	0,16376	0,51161	0,11180
MCa-FV-1	0,12970	0,02078	0,18843	0,64813	0,13663
MCa-FV-1,33	0,11635	0,02035	0,17094	0,51180	0,17675
MCa-FC-0,33	0,08206	0,01751	0,12960	0,42428	0,12418
MCa-FC-0,66	0,12248	0,02400	0,14119	0,58453	0,17060
MCa-FC-1	0,14236	0,02732	0,15249	0,69577	0,18904
MCa-FC-1,33	0,15950	0,02783	0,16169	0,73038	0,17598
MCa-FB-0,33	0,07285	0,01660	0,13507	0,29694	0,07823
MCa-FB-0,66	0,07741	0,01578	0,14969	0,36150	0,09115
MCa-FB-1	0,09888	0,01810	0,16696	0,46776	0,11288
MCa-FB-1,33	0,11755	0,02133	0,16162	0,49377	0,12225
MCa-FM-0,33	0,06661	0,01438	0,15513	0,30110	0,07428
MCa-FM-0,66	0,06722	0,01380	0,15822	0,39263	0,09203
MCa-FM-1	0,10122	0,01798	0,17828	0,57018	0,12608
MCa-FM-1,33	0,12915	0,02255	0,17111	0,53565	0,12363

Tabla 4.20. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión a 120 días de los morteros de cal hidráulica.

La capacidad de absorción de energía a compresión de los morteros de cal hidráulica con fibras ensayados a 120 días es superior a la registrada por el mortero de referencia. De media, la adición de cantidades de fibras del 0,33%, 0,66%, 1% y 1,33% supone un incremento de la densidad de energía hasta tensión de rotura en un 56%, 98%, 151% y 167%, respectivamente. También se observa un aumento de los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ del 30%, 37%, 54% y 49%, mientras que los valores de densidad de energía últimos experimentan un incremento del 56%, 92%, 147% y 1136%.

Los morteros de cal hidráulica con fibras de vidrio ensayados a 120 días presentan valores de densidad de energía de deformación a compresión un 17%, 11% y 3% superiores a los obtenidos por los morteros con fibras de carbono, basalto y mixtas, respectivamente. Sin embargo, cuando se somete al mortero a deformaciones últimas, son los morteros con fibras de carbono los que presentan mejores resultados, en un 17% sobre las de vidrio, un 50% sobre las de basalto y un 35% sobre las mixtas.

Comparando los resultados obtenidos por los morteros de cal hidráulica ensayados a 28 y a 120 días, observamos como los valores de densidad de energía de deformación a compresión E_{cr} , $E_{c1,125}$ y E_{cu} , se incrementan de media un 47%, un 112% y un 60%, respectivamente. Esto es debido al aumento de las resistencias a compresión con el transcurso de los días de media un 124%.

4.4.5 Módulo de elasticidad

Partiendo de los valores registrados en los ensayos de flexión, se ha determinado el módulo elástico de los morteros mediante el cálculo de la pendiente del tramo elástico en la curva tensión-deformación.

Los valores obtenidos no son exactos, calculándose a los efectos de comparación entre magnitudes. Esto se debe a que, en la parte elástica de la curva, el valor de la pendiente puede no representar necesariamente el módulo de elasticidad. En este trabajo las extensiones se han obtenido por el movimiento del pistón a través del software de la prensa. Se entiende que, las medidas de deformación así determinadas difieren de las que se hubieran obtenido a través de extensómetros en un orden de magnitud que no compromete los resultados comparativos.

Para determinar la pendiente, y por lo tanto el valor del módulo elástico a flexión, se realizó el ajuste por mínimos cuadrados. Se determinaron la línea de tendencia en el rango elegido, con la ecuación y el coeficiente de correlación mediante un programa informático. Este último, parámetro para el estudio de una distribución bidimensional, muestra el grado de dependencia entre las variables x e y . El rango se estableció según tipo de material a ensayar y definido por el tramo lineal de la gráfica.

4.4.5.a Resultados

En la Tabla 4.21 se muestra el módulo de elasticidad a flexión de los diferentes morteros.

Designación	Módulo de elasticidad (MPa)		Aumento /reducción respecto a la de referencia (%)	
	M. Cemento	M. Cal hidráulica	M. Cemento	M. Cal hidráulica
M-R	1543	862	0	0
M-FV-0,33	1649	410	7	-52
M-FV-0,66	1761	431	14	-50
M-FV-1	1463	300	-5	-65
M-FV-1,33	1695	278	10	-68
M-FC-0,33	1944	251	26	-71
M-FC-0,66	1747	251	13	-71
M-FC-1	1292	395	-16	-54
M-FC-1,33	1466	391	-5	-55
M-FB-0,33	1850	322	20	-63
M-FB-0,66	1842	214	19	-75
M-FB-1	1458	298	-6	-65
M-FB-1,33	1403	254	-9	-71
M-FM-0,33	1849	537	20	-38
M-FM-0,66	1791	674	16	-22
M-FM-1	1533	510	-1	-41
M-FM-1,33	1414	362	-8	-58

Tabla 4.21. Módulo de elasticidad a flexión de los morteros de cemento y de cal hidráulica.

Se observa que la incorporación de fibras, independientemente del tipo de éstas, tanto en morteros de cemento como en los de cal hidráulica, provoca un comportamiento poco definido en los módulos elásticos, produciéndose aumentos o disminuciones de los módulos en función del porcentaje de fibra añadida, fenómeno ya reportado [249].

En la Figura 4.55 se aprecia que el módulo de elasticidad de los morteros de cemento con adición de fibras del 0,33% y del 0,66% son superiores al registrado por el mortero de referencia, del orden del 18% y 16% respectivamente. Sin embargo, para los porcentajes del 1% y 1,33%, los módulos son inferiores en torno al 7% y 3% respecto a los morteros convencionales.

Figura 4.55. Módulo de elasticidad a flexión para los morteros de cemento.

Para los morteros de cal hidráulica, Figura 4.56, aunque el comportamiento es variable, la adición de fibras supone un comportamiento más elástico del mortero.

Figura 4.56. Módulo de elasticidad a flexión para los morteros de cal hidráulica.

4.5 Recopilación de la discusión de resultados del capítulo

A continuación, se muestra la discusión de los resultados obtenidos tras la realización de los distintos ensayos descritos en el capítulo.

- La formación de una estructura en forma de red, debido a la distribución de las fibras en el mortero, unido a la mayor cantidad de conglomerante necesario para “envolver” las fibras debido a la alta superficie específica de éstas, supone un aumento de la viscosidad y por tanto una disminución de la consistencia y de la trabajabilidad.

- El porcentaje de aire ocluido en el mortero aumenta con el incremento del porcentaje de fibras, lo que trae consigo un descenso de la densidad del mortero, fenómeno que tiene su origen, en la interrupción de la continuidad de la microestructura del material, como resultado de la inclusión de heterogeneidades en un cuerpo homogéneo.
- La absorción de agua por capilaridad no tiene relación directa con el aumento del aire ocluido, debido a que las fibras previenen la aparición de microfisuras en las primeras edades que favorecen el tránsito de agua a través del mortero.
- El mortero de cemento sufre una pérdida progresiva de resistencia, tanto a flexión como a compresión según aumenta en contenido de fibras, hasta llegar al 1,33% donde se producen las mayores mermas de resistencia, independientemente del tipo de fibra utilizada.
- El mortero de cal hidráulica sufre un aumento de la resistencia mecánica cuando se le adicionan fibras. El aumento de la resistencia a flexión no es progresivo, ya que para mezclas con adiciones del 1,33%, los valores obtenidos son iguales o inferiores a los alcanzados con un 1%.
- Las fibras de carbono provocan las mayores caídas de resistencia a flexión y compresión en morteros de cemento, mientras que para los morteros de cal hidráulica dichas fibras suponen los mayores incrementos.
- La dispersión aleatoria de fibras dentro de la masa del mortero permite que siempre haya algunas que actúan de puentes entre las dos partes del mortero que dividen las fisuras, pudiendo transmitir los esfuerzos con ángulos muy variables de acuerdo con la orientación que posean con respecto al plano de la fisura. Este comportamiento hace que los morteros con fibras tengan una mayor capacidad de absorción de energía, manifestando un comportamiento más dúctil.
- Los morteros con fibras de carbono tienen la mayor capacidad de deformación, hasta 20 veces en caso de morteros de cemento y cerca de 100 veces para los de cal hidráulica.
- Si la concentración de fibra es demasiado alta o demasiado baja, o si las fibras no están alineadas en la dirección de la tensión, su eficiencia no es óptima.
- Existe un porcentaje máximo de fibras a partir del cual no se mejora la capacidad de absorción de energía de los morteros, independientemente del tipo de conglomerante empleado. Esta conclusión será el punto de partida de la investigación desarrollada en el siguiente capítulo “Caracterización de los morteros con mejores propiedades”.

5

CARACTERIZACIÓN DE LOS MORTEROS CON MEJORES PROPIEDADES MECÁNICAS

Para caracterizar completamente un mortero con fibras, no sirve con conocer su densidad, capacidad de absorción de agua, resistencias a mecánicas y capacidad de absorción de energía. Por ello, es necesario realizar una extensa batería de ensayos con el fin de estudiar el material en profundidad.

Con tal fin, en este apartado se exponen los ensayos realizados para caracterizar completamente el material, así como los resultados obtenidos. Los ensayos realizados son los siguientes:

- Resistencia a flexión sobre diferentes tipologías de probeta
- Resistencia a compresión sobre diferentes tipologías de probeta
- Módulo de Young
- Velocidad de impulsos ultrasónicos
- Resistencia a tracción indirecta
- Resistencia a impacto
- Resistencia a la adhesión
- Retracción
- Análisis microestructural

El estudio se completa mediante la realización de estos ensayos en diferentes tipos de probetas, analizando si la geometría de ésta influye en las propiedades de los morteros elaborados.

5.1 Elección de la cantidad de fibras en los morteros

Debido al número de dosificaciones distintas planteadas en el capítulo anterior y a lo ambicioso de la campaña experimental, es necesario acotar el estudio. Se ha decidido seleccionar la cantidad de fibras que mejora en mayor medida las propiedades de los morteros. Esto supone la realización de diez dosificaciones distintas, cinco de cemento y cinco de cal hidráulica.

La elección de la cantidad de la cantidad de fibras que mejora en mayor medida las propiedades del mortero ha sido una de las decisiones más relevantes del estudio. Se ha fijado en un 1% en volumen, basándose en los siguientes criterios:

- Capacidad de absorción de energía del mortero. La tenacidad, tanto a flexión como a compresión, es superior en los morteros con un 1% de adición de fibras, siendo el factor determinante.
- Resistencia a compresión y flexión del mortero. Los morteros con adiciones del 1% de fibras presentan, en general, mejores resistencias mecánicas que el resto de los morteros con adición de fibras.

5.1.1 Dosificación

En la Tabla 5.1 se muestra la dosificación empleada para cada uno de los morteros.

Designación	Conglomerante (kg)	Arena (kg)	Fibra (kg)			Plastificante (kg)
			Vidrio	Carbono	Basalto	
M-R	490	1470				0
M-FV-1	490	1470	20,6			3,92
M-FC-1	490	1470		13,7		3,92
M-FB-1	490	1470			21,1	3,92
M-FM-1	490	1470	10,3	6,85		3,92

Tabla 5.1. Dosificación para los morteros de cemento y cal hidráulica.

5.1.2 Protocolo de amasado

Para la elaboración de las probetas necesarias para la extensa batería de ensayos planteados, se han de realizar amasadas de 0,028 m³. Se ha tenido que modificar ligeramente el procedimiento de amasado descrito en el capítulo anterior, debido al tamaño de la amasadora utilizada. La diferencia radica en el orden de adición de los materiales, ya que no es posible mezclar el agua y las fibras en un primer momento debido a que se pegan a las paredes del cazo de la amasadora. El procedimiento modificado es el siguiente:

- Se vierte la arena y el conglomerante dentro del recipiente. Inmediatamente después, se pone en marcha la amasadora a velocidad normal, iniciando los tiempos de amasado. Después de 30 segundos de amasado en los que se adicionan de forma regular las fibras, se añade el agua durante los 30 segundos siguientes de forma paulatina, continuando el amasado durante 60 segundos.
- A continuación, se para la amasadora durante 90 segundos retirando con una paleta todo el mortero adherido a las paredes, el fondo y las palas de la hormigonera. Concluyendo el proceso con un amasado durante 60 s (Figura 5.1).

Figura 5.1. Amasada tipo de 0,028 m³.

5.1.3 Fabricación de las probetas

Para la realización de los ensayos de la segunda fase de esta investigación, se han realizado los siguientes tipos de probetas:

Probetas prismáticas de 160x40x40 mm. Este tipo de probetas se han utilizado para la determinación de las siguientes características del mortero endurecido:

- Resistencia a flexión y compresión
- Módulo de Young
- Velocidad de impulsos ultrasónicos

El procedimiento consiste en rellenar el molde en dos tongadas y después compactarlo mediante 25 golpes. En la Figura 5.2 se muestra un molde relleno, compactado y enrasado.

Figura 5.2. Realización de probetas de prismáticas de 40x40x160 mm.

Probetas rectangulares de 500x100x30 mm y 500x50x50 mm. Estas probetas han utilizado para los siguientes ensayos:

- Resistencia a flexión
- Resistencia al impacto

El procedimiento consiste en rellenar el molde en dos tongadas y después compactarlo, mediante el golpeo en el molde con un martillo para evitar la formación de burbujas de aire. En la Figura 5.3 se muestra un molde relleno, compactado y enrasado.

Figura 5.3. Realización de probetas prismáticas de 100x30x500 mm y 50x50x500 mm.

Probetas cilíndricas de Ø100x200 mm. Estas probetas han utilizado para los siguientes ensayos:

- Resistencia a compresión
- Resistencia a flexión indirecta o ensayo brasileño

El procedimiento consiste en rellenar el molde en tres tongadas. Se compacta cada capa con 15 golpes con la barra compactadora, para después golpear lateralmente el molde con un mazo, hasta que las burbujas de aire mayores dejen de aparecer. En la Figura 5.4 se muestran los molde rellenos, compactados y enrasados.

Figura 5.4. Realización de probetas cilíndricas de Ø 100x200 mm.

Probetas de 100x100x100 mm. Estas probetas se han utilizado para la caracterización a compresión de las distintas mezclas. El procedimiento consiste en rellenar el molde en dos tongadas. Se compacta cada capa con 15 golpes con la barra compactadora, para después golpear lateralmente el molde con un mazo, hasta que las burbujas de aire mayores dejen de aparecer. En la Figura 5.5 se muestran los moldes rellenos, compactados y enrasados.

Figura 5.5. Realización de probetas de 100x100x100 mm.

Para la realización de los ensayos de adherencia se ha utilizado un soporte de ladrillo hueco simple de 400x200 mm. El procedimiento consiste en aplicar una capa de 1 cm de mortero sobre la superficie de la probeta. Para ello, inicialmente se humedece el soporte cerámico y se coloca el molde correctamente nivelado. A continuación, se aplica

el mortero, se nivela con la llana y se separa el mortero mediante el anillo troncocónico (Figura 5.6).

Figura 5.6. Realización de probetas de adherencia.

Probetas prismáticas de 25x25x287 mm. Estas probetas se han utilizado para la realización del ensayo de retracción. El procedimiento consiste en rellenar el molde en dos tongadas y compactarlo, mediante un pisón. Una vez compactado se suelta el tornillo de fijación de las piezas de tope, para prevenir cualquier tipo de restricción de los topes durante la retracción inicial de la probeta (Figura 5.7).

Al aplicar el procedimiento marcado por la norma en los morteros de cal hidráulica han surgido los siguientes problemas, ya reportados por Ramírez de Arellano et al [250]:

- Resistencia insuficiente del mortero a las 24 horas y a edades tempranas, para poder desmoldar las probetas y hacer la primera medida en el comparador de longitudes.
- Falta de adherencia de los pernos calibradores al mortero.
- Dificultad para desenroscar los pernos calibradores del soporte de perno, sin dañar la unión entre el mortero y el perno.

Por todo esto, ha sido necesario modificar el proceso de confección, pasando de desmoldar a las 24 horas a desmoldar a los dos días, tiempo suficiente para que el mortero de cal hidráulica haya obtenido la resistencia suficiente para llevar a cabo las mediciones sin que la probeta sufra ningún daño.

Figura 5.7. Realización de probetas de retracción.

El curado difiere ligeramente del descrito en el capítulo anterior debido al material de algunos moldes (madera). Se dejan en condiciones de laboratorio durante 24 h. Transcurrido este periodo, son desmoldadas y, después de ser convenientemente referenciadas (Figura 5.8), son introducidas en la cámara húmeda en condiciones de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura y humedad relativa del 95% hasta la edad de 28 días, en las cuales realizaremos los distintos ensayos.

Figura 5.8. Desmoldado de probetas.

5.2 Ensayos

Los ensayos se han realizado acordes a los criterios del capítulo anterior y siguiendo los mismos procedimientos, por lo que solo se indican los resultados y conclusiones obtenidas.

Paralelamente se ha completado el estudio llevando a cabo otro tipo de ensayos cuyo proceso experimental se explica en los subapartados siguientes.

5.2.1 Resistencia a flexión en función de la geometría de la probeta

Para la realización del ensayo de flexión se ha seguido el procedimiento descrito en el capítulo anterior. Se ha utilizado un equipo Ibertest modelo MIB-60/AM, que permite controlar la carga por desplazamiento ($0,4 \text{ mm/min}$). La probeta se sitúa dos puntos de apoyo con una separación de $2/3$ la longitud de la probeta y un tercer punto en la mitad (Figura 5.9).

Figura 5.9. Determinación de la resistencia a flexión: a) probeta de $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}$. b) probeta de $500 \times 50 \times 50 \text{ mm}$. c) probeta de $500 \times 100 \times 30 \text{ mm}$. d) probeta de $600 \times 150 \times 100 \text{ mm}$.

Para cada dosificación de mortero se han ensayado 3 probetas de cada geometría a 28 días. En la Tabla 5.2 aparecen los resultados de la resistencia a flexión para las diferentes mezclas de cemento en función del tipo de probeta ensayada.

Designación	Resistencia a flexión (Mpa)			
	160x40x40	500x50x50	500x100x30	600x150x100
MC-R	6,90	6,45	6,10	5,99
MC-FV-1	6,02	5,36	5,49	4,88
MC-FC-1	5,86	5,31	5,30	4,95
MC-FB-1	6,12	5,46	5,31	5,00
MC-FM-1	6,22	5,60	5,16	5,15

Tabla 5.2. Resistencia a flexión de los morteros de cemento según el tipo de probeta.

Se observa que el mortero de cemento sufre mermas en la resistencia a flexión cuando se le adicionan las diferentes fibras, independientemente la geometría de la probeta. Así pues, la inclusión de los distintos tipos de fibras supone, de media, una pérdida de resistencias a flexión de los morteros con fibras respecto a la referencia, del 12% en probetas de 160x40x40 mm, del 16% en probetas de 500x50x50 mm, del 12% en probetas de 500x100x30 mm y del 17% para probetas de 600x150x100 mm.

La Figura 5.10 muestra las variaciones de la resistencia a flexión del mismo tipo de mortero de cemento en función de la geometría de la probeta. Comparando los valores obtenidos en la probeta de 160x40x40 mm -la designada por la normativa- con los alcanzados en el resto de las probetas ensayadas, se observa, un descenso de las resistencias en un 10% cuando se ensaya la probeta de 500x50x50 mm, en un 12% cuando el espécimen es de 500x100x30 mm y en un 17% cuando la tipología de probeta es de 600x150x100 mm.

Figura 5.10. Resistencia a flexión para los morteros de cemento según el tipo de probeta.

Para los morteros de cal hidráulica, la fuerza (kN) necesaria para romper a flexión las probetas de 500x50x50 mm, 500x100x30 mm y 600x150x100 mm, es menor a la lectura mínima detectada por el equipo de ensayo por lo que no se pudo calcular la resistencia a flexión para estas probetas.

5.2.2 Capacidad de absorción de energía a flexión en función de la geometría de la probeta

Para analizar la capacidad de absorción de energía a flexión de los morteros con fibras en función de la geometría de la probeta, al igual que en el capítulo 4, se han examinado los diagramas de tensión-desplazamiento utilizando los siguientes parámetros:

G_{fr}	Energía absorbida a flexión hasta tensión de rotura en N/mm
δ_{max}	Desplazamiento máximo a flexión en mm
$G_{fL/150}$	Energía absorbida a flexión en N/mm
G_{fu}	Energía absorbida a flexión hasta colapso en N/mm
δ_u	Desplazamiento último a flexión en mm
$I_{5, 10, 20, 30}$	Índices de tenacidad
I_u	Índice de tenacidad último

Primero se comparan las curvas de tensión-desplazamiento a flexión en función de la geometría de la probeta (Figuras 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14), para después compararlas en función del tipo de fibra (Figuras 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 y 5.19). Posteriormente se presentará la Tabla 5.3 que recoge los resultados del análisis realizado.

En la Figura 5.11 se muestra el diagrama de tensión- desplazamiento a flexión de los morteros de cemento ensayados en probetas de 160x40x40 mm. La energía absorbida a flexión hasta rotura, G_{fr} , de los morteros con fibras empeoran, de media, sobre un 4% con respecto al mortero de referencia. La energía absorbida $G_{fL/150}$ de los morteros con fibras es superior a la marcada por los morteros de referencia en un 193%, 258%, 141% y 194% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente, mientras que los valores de absorción de energía hasta tensión última G_{fu} son superiores en un 297%, 533%, 190% y 303% para las fibras mencionadas con anterioridad.

Figura 5.11. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento para probetas de 160x40x40mm.

Cuando el ensayo se realiza sobre probetas de 500x50x50 mm, Figura 5.12, el análisis del diagrama de tensión-desplazamiento refleja, de media, un descenso de la energía absorbida G_{fr} de los morteros con fibra con respecto a los morteros convencionales, del 28%. La energía absorbida $G_{fL/150}$ aumenta en un 70%, 185%, 110% y 140% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas respectivamente. Mientras que los valores de absorción de energía G_{fu} , aumentan en torno al 92%, 618%, 200% y 300% cuando se adicionan las fibras anteriormente mencionadas.

Figura 5.12. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento para probetas de 500x50x50mm.

Cuando los morteros de cemento se ensayan en probetas de 500x100x30mm, Figura 5.13, el diagrama de tensión-desplazamiento indica que la energía absorbida $G_{fL/150}$ aumenta un 173%, 252%, 184% y 227% con respecto a la referencia cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas. Mientras que los valores de

absorción de energía G_{fu} se incrementan en un 288%, 1092%, 411% y 605%. La energía absorbida hasta la rotura G_{fr} aumenta, de media, un 11% para los cuatro tipos de fibras mencionadas. Se observa que este tipo de probeta tiene una menor rigidez, soportando una mayor deformación antes de producirse la rotura.

Figura 5.13. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento para probetas de 500x100x30mm.

En la Figura 5.14 se muestra el diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento ensayados en probetas de 600x150x100 mm. La energía absorbida a flexión hasta rotura empeora, de media, un 7% con respecto al mortero de referencia. La energía absorbida $G_{fL/150}$ aumenta en un 168%, 266%, 130% y 177% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente, mientras que los valores de absorción de energía hasta tensión última son superiores en un 168%, 574%, 146% y 230% para las fibras ya mencionadas.

Figura 5.14. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento para probetas de 600x150x100mm.

En la Figura 5.15 se muestra el diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento de referencia ensayados en las distintas probetas. Comparando el diagrama obtenido tras el ensayo sobre la probeta de 160x40x40 mm -la designada por la normativa- con las curvas obtenidas cuando se ensayan las otras geometrías planteadas, se observa un aumento de la capacidad de absorción de energía a flexión hasta rotura del 51% cuando se ensayan probetas de 500x50x50 mm, del 76% cuando la probeta ensayada es de 500x100x30 mm y del 67% si la probeta es de 600x150x100 mm.

Figura 5.15. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento de referencia.

Para los morteros de cemento con fibra de vidrio, Figura 5.16, la comparación de resultados entre la probeta designada por normativa y las planteadas en este estudio muestran un descenso en los valores de absorción de energía a flexión $G_{fL/150}$ del 13% cuando se ensayan probetas de 500x50x50 mm y un aumento del 64% cuando se ensayan probetas de 500x100x30 mm y del 52% si la probeta es de 600x150x100 mm. Mientras que los valores de absorción de energía G_{fu} son inferiores en un 27% para las probetas de 500x50x50 mm, siendo superiores en un 72% y 13% para las probetas de 500x100x30 mm y de 500x100x30 mm.

Figura 5.16. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento con adición de fibras de vidrio.

Cuando se trata de morteros de cemento con fibras de carbono, Figura 5.17, cotejando los resultados de los morteros de cemento obtenidos sobre probetas de 160x40x40 mm con los alcanzados cuando se ensayan las otras tipologías, se observa un aumento de la energía absorbida a flexión $G_{fL/150}$ del 20% cuando se ensayan probetas de 500x50x50 mm, del 74% cuando la probeta ensayada es de 500x100x30 mm y del 71% si la probeta es de 600x150x100 mm. Mientras que los valores de absorción de energía hasta tensión última aumentan en un 72%, 232% y 78% para los tipos de probetas mencionadas anteriormente.

Figura 5.17. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento con adición de fibras de carbono.

Para los morteros de cemento con fibras basalto, Figura 5.18, el análisis del diagrama de tensión-desplazamiento en función de la geometría refleja un aumento en los valores de absorción de energía $G_{fL/150}$ del 32% cuando se ensayan probetas de 500x50x50 mm, del 108% cuando la probeta ensayada es de 500x100x30 mm y del 58% si la probeta es de 600x150x100 mm, en comparación con la probeta designada por la normativa. Mientras que los valores de absorción de energía G_{fu} son superiores en un 57%, 211% y 42% para las tipologías de probetas mencionadas anteriormente.

Figura 5.18. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento con adición de fibras de basalto.

Para los morteros de cemento con fibras de mixtas, Figura 5.19, la comparación de resultados entre la probeta designada por normativa y las planteadas en este estudio muestran un aumento en la energía absorbida $G_{fL/150}$ del 24% cuando se ensayan probetas de 500x50x50 mm, del 96% cuando la probeta ensayada es de 500x100x30 mm y del 58% si la probeta es de 600x150x100 mm. Mientras que los valores de absorción de energía G_{fu} son superiores en un 50%, un 209% y un 37% para las tipologías de probetas mencionadas anteriormente.

Figura 5.19. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento con adición de fibras mixtas.

La Tabla 5.3 muestra los resultados del análisis de los diagramas de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento para los distintos tipos de probetas.

Probeta (mm)	Designación	G_{fr} (MPa)	δ_{max} (mm)	$G_{fL/150}$ (MPa)	G_{fu} (MPa)	δ_u (mm)	I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}	I_u
160x40x40	MC-R	0,595	0,130	0,595	0,595	1,296					1
	MC-FV-1	0,569	0,180	1,746	2,363	1,616	2,74	3,61			4,15
	MC-FC-1	0,522	0,175	2,130	3,770	2,816	3,49	4,95	6,28	7,14	7,22
	MC-FB-1	0,633	0,186	1,433	1,725	1,393	2,12	2,56			2,73
	MC-FM-1	0,557	0,170	1,747	2,397	1,784	2,75	3,62	4,31		4,31
500x50x50	MC-R	0,900	0,274	0,900	0,900	0,274					1
	MC-FV-1	0,470	0,169	1,527	1,729	0,929	2,89	3,68			3,68
	MC-FC-1	0,907	0,297	2,566	6,469	3,178	3,58	5,17	7,07		7,13
	MC-FB-1	0,474	0,172	1,889	2,700	1,517	3,42	4,75			5,7
	MC-FM-1	0,738	0,261	2,158	3,598	1,766	3,26	4,47			4,88
500x100x30	MC-R	1,049	0,343	1,049	1,049	0,343					1
	MC-FV-1	1,025	0,360	2,863	4,075	1,705	3,14				3,98
	MC-FC-1	1,627	0,468	3,696	12,512	3,776	3,55	5,78			7,69
	MC-FB-1	0,942	0,343	2,975	5,365	2,317	3,52	5,14			5,7
	MC-FM-1	1,063	0,339	3,429	7,397	2,888	3,64	5,7			6,96
600x150x100	MC-R	0,993	0,347	0,994	0,994	0,347					1
	MC-FV-1	0,691	0,262	2,660	2,660	0,942	3,46				3,85
	MC-FC-1	1,087	0,418	3,639	6,695	3,591	3,69	5,23			6,16
	MC-FB-1	0,990	0,375	2,288	2,448	1,446	2,34				2,47
	MC-FM-1	0,916	0,341	2,754	3,278	1,980	2,96	3,54			3,58

Tabla 5.3. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento en función del tipo de probeta.

La energía absorbida de energía $G_{fL/150}$ y G_{fu} de los morteros de cemento es, de media, superior en un 151% y 211% cuando se añaden fibras de vidrio, en un 240% y 705% cuando se añaden fibras de carbono, en un 141% y 237% cuando se añaden fibras de basalto y en un 184% y 359% cuando se añaden fibras mixtas.

Confrontando los valores obtenidos por los morteros de cemento con fibras con los obtenidos por los morteros convencionales, en función de la geometría de la probeta ensayada, se observa un aumento de los valores de absorción de energía $G_{fL/150}$ y G_{fu} , de los morteros con fibras, en un 196% y 331% cuando se trata de probetas de 160x40x40 mm, en un 126% y 303% si la probeta ensayada es de 500x50x50 mm, en un 209% y 599% cuando se trata de probetas 500x100x30 mm y en un 186% y 280% para probetas de 600x150x100 mm.

Mientras que si cotejamos los valores obtenidos tras el ensayo sobre la probeta de 160x40x40 mm -la designada por la normativa- con los resultados obtenidos cuando se ensayan las diferentes geometrías planteadas, se observa, de media, un aumento de la energía absorbida $G_{fL/150}$ en torno al 23% cuando se ensayan probetas de 500x50x50 mm, en un 84% si la probeta ensayada es de 500x100x30 mm y en un 61% para probetas de 600x150x100 mm. Igualmente los valores de absorción de energía G_{fu} son superiores en un 41%, 160% y 47% para dichas geometrías. Esto indica que la relación ancho-canto de la probeta es determinante en el comportamiento post-fisuración. A mayor sea esta relación mejor respuesta dúctil tendrá el mortero, ya que, al tener un plano dominante, las fibras se orientan preferentemente en dos direcciones elevando el número de fibras que atraviesan la zona de fractura [172].

En morteros de cemento, los valores de energía absorbida a flexión G_{fr} , $G_{fL/150}$ y G_{fu} aumentan en mayor medida cuando la fibra adicionada es de carbono. Así pues, la fibra de carbono presenta valores superiores en un 50%, 37% y 172% sobre la fibra de vidrio, en un 36%, 40% y 141% sobre la fibra de basalto y en un 27%, 19% y 77%, respectivamente.

En la figura 5.20 se muestran los índices de tenacidad últimos de los morteros de cemento con fibras. Estos son entre cuatro y siete veces superiores al registrado por los morteros de referencia dependiendo del tipo de fibra adicionada, siendo la fibra de carbono la que consigue mejorar en mayor medida la ductilidad del mortero. Mientras que, si analizamos los morteros en función de la tipología de probeta, los índices son entre cuatro y seis veces superiores a los morteros convencionales, presentando los morteros con fibras ensayados en probetas de 500x100x30 mm un comportamiento más dúctil.

Figura 5.20. Índices de tenacidad últimos de los morteros de cemento en función de la geometría de probeta.

5.2.3 Resistencia a compresión en función de la geometría de la probeta

Para la realización del ensayo de compresión se ha seguido el procedimiento descrito en el capítulo 4. Se han ensayado probetas cúbicas de 40 mm y 100 mm, prismáticas de 160x40x40 mm colocadas verticalmente y cilíndricas de Ø100x200 mm (Figura 5.21).

Figura 5.21. Determinación de la resistencia a compresión: a) probeta de 40x40x40 mm. b) probeta de 160x40x40 mm. c) probeta de 100x100x100 mm. d) probeta de Ø100x200 mm.

Para cada dosificación de mortero se han ensayado 3 probetas de cada tipo. El valor obtenido es el resultado de la media aritmética de los valores individuales. En la Tabla 5.4 aparecen los resultados de resistencia a compresión a 28 días de las diferentes mezclas de cemento en función del tipo de probeta ensayada.

Designación	Resistencia a compresión (Mpa)			
	40x40x40	160x40x40	100x100x100	Ø100x200
MC-R	23,63	24,73	21,60	17,27
MC-FV-1	20,22	20,93	20,51	15,13
MC-FC-1	19,72	20,73	18,56	15,12
MC-FB-1	20,82	21,04	19,30	14,91
MC-FM-1	20,95	21,95	19,05	15,03

Tabla 5.4. Resistencia a compresión de los morteros de cemento según el tipo de probeta.

La resistencia a compresión de los morteros de cemento con adición de fibras es inferior a la obtenida en el mortero de referencia, independientemente la geometría de la probeta ensayada. Así pues, la inclusión de los distintos tipos de fibras supone, de media, una caída de resistencias a compresión del 14% cuando se ensayan probetas de 40x40x40 mm, del 14% si son probetas de 160x40x40 mm, del 10% si son cúbicas de 100 mm y del 13% para las cilíndricas.

La Figura 5.22 muestra la variación existente de las resistencias a compresión del mismo tipo de mortero de cemento en función de la geometría de la probeta. Comparando las resistencias a compresión de los morteros de cemento en la probeta de 40x40x40 mm -la designada por la normativa- con las resistencias obtenidas cuando se ensayan las otras geometrías planteadas, se observa un aumento de las resistencias en un 4% cuando se ensayan probetas de 160x40x40 mm, mientras que para las probetas de 100x100x100 mm y de Ø100x200 mm la resistencia cae en un 6% y un 26%, respectivamente.

Figura 5.22. Resistencia a compresión para los morteros de cemento según el tipo de probeta.

En la Tabla 5.5 aparecen los resultados de la resistencia a compresión a 28 días de los diferentes morteros de cal hidráulica en función del tipo de probeta ensayada.

Designación	Resistencia a compresión (Mpa)			
	40x40x40	160x40x40	100x100x100	Ø100x200
MCa-R	2,49	2,70	2,55	2,69
MCa-FV-1	3,78	3,54	3,11	3,08
MCa-FC-1	3,29	3,40	2,89	3,12
MCa-FB-1	3,60	3,73	3,19	3,24
MCa-FM-1	3,65	3,60	2,91	3,15

Tabla 5.5. Resistencia a compresión de los morteros de cal hidráulica según el tipo de probeta.

Los morteros de cal hidráulica experimentan un aumento de resistencia a compresión con la adición de las diferentes fibras respecto al mortero de referencia, independientemente la geometría de la probeta. Consiguientemente, la inclusión de los distintos tipos de fibras supone, de media, un aumento de resistencias a compresión, del 44% cuando se ensayan probetas de 40x40x40 mm, del 32% en especímenes de 160x40x40 mm, del 17% cuando son de 100x100x100 mm y del 19% para las cilíndricas.

La Figura 5.23 muestra la variación existente de las resistencias a compresión del mismo tipo de mortero de cal hidráulica en función de la geometría de la probeta. Confrontando las resistencias a compresión de los morteros de cal hidráulica obtenidos en la probeta designada por la normativa con las resistencias derivadas del ensayo en las otras geometrías planteadas, se observa, un aumento de los valores en un 2% cuando se ensayan probetas de 160x40x40 mm, mientras que para los morteros testados en probetas cúbicas de 100 mm y cilíndricas la resistencia cae en un 8% y un 12%, respectivamente.

Figura 5.23. Resistencia a compresión para los morteros de cal hidráulica según el tipo de probeta.

Por tanto, la geometría de la probeta influye en la resistencia a compresión de los morteros. A mayor tamaño de la probeta ensayada menor capacidad de resistir cargas.

5.2.4 Capacidad de absorción de energía a compresión en función de la geometría de la probeta

Para analizar la capacidad de absorción de energía a compresión de los morteros en función de la geometría de la probeta, al igual que en el capítulo 4, se han examinado los diagramas de tensión-deformación utilizando los siguientes parámetros:

E_{cr}	Densidad de energía de deformación a compresión hasta tensión de rotura en MPa
ϵ_{max}	Deformación máxima a compresión en ‰
$E_{c1,125}$	Densidad de energía de deformación a compresión en MPa
E_{cu}	Densidad de energía de deformación a compresión hasta tensión última en MPa
ϵ_u	Deformación última a compresión en ‰

Primero se comparan los diagramas de tensión-deformación a compresión en función de la geometría de la probeta (Figuras 5.24, 5.25, 5.26 y 5.27 para los de cemento y Figuras 5.33, 5.34, 5.35 y 5.36 para los de cal hidráulica), para después compararlas en función del tipo de fibra (Figuras 5.28, 5.29, 5.30, 5.31 y 5.32 para los de cemento y Figuras 5.37, 5.38, 5.39, 5.40 y 5.41 para los de cal hidráulica). Posteriormente se presentará la Tabla 5.6 que recoge los resultados del análisis realizado.

En la Figura 5.24 se muestra el diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento ensayados en probetas de 40x40x40 mm. La densidad de energía de deformación $E_{c1,125}$ de estos morteros es inferior a la marcada por los morteros de referencia en un 10%, 6%, 9% y 3% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente. Mientras que los valores de densidad de energía, E_{cu} , son superiores en un 29%, 92%, 22% y 50%.

Figura 5.24. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento para probetas de 40x40x40mm.

Cuando el ensayo se realiza sobre probetas de 160x40x40 mm, Figura 5.25, el análisis de las curvas refleja un descenso de la densidad de energía $E_{c1,125}$ en un 22%, 14%, 27% y 22% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas respectivamente, en relación al mortero de referencia. Mientras que los valores de densidad de energía últimos se incrementan un 29%, 16%, 21% y 5% con la adición de las fibras ya citadas.

Figura 5.25. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento para probetas de 160x40x40mm.

En la Figura 5.26 se muestra el diagrama de tensión-deformación de los morteros de cemento cuando se ensayan probetas de 100x100x100 mm. Comparándolos con el mortero de referencia, se observa un descenso de los valores de densidad de energía de deformación, $E_{c1,125}$, en un 4%, 10%, 3% y 12% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas. Mientras que los valores de densidad de energía, E_{cu} , sufren pérdidas cercanas al 5% cuando se adicionan fibras de vidrio e incrementos del 89%, 17% y 47% cuando las fibras añadidas son de carbono, basalto y mixtas.

Figura 5.26. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento para probetas de 100x100x100mm³.

Cuando los morteros de cemento son ensayados en probetas cilíndricas Ø100x200 mm, Figura 5.27, la densidad de energía de deformación a compresión, $E_{c1,125}$, de los morteros aumenta en un 53%, 36%, 50% y 55% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, en relación con el de referencia. Mientras que la densidad de energía hasta deformaciones últimas se incrementa en un 69%, 169%, 28% y 79%.

Figura 5.27. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento para probetas de Ø100x200mm.

En la Figura 5.28 se muestra el diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento de referencia ensayados en las distintas probetas. Comparando los resultados obtenidos tras el ensayo sobre la probeta de 40x40x40 mm -la designada por la normativa- con los derivados de ensayar las otras geometrías planteadas, se observa un descenso de la densidad de energía de deformación a compresión, $E_{c1,125}$, del 89% cuando se ensayan probetas de 160x40x40 mm, del 65%

cuando son cúbicas de 100 mm y del 91% si son probetas cilíndricas. Mientras que los valores de densidad de energía, E_{cu} , son inferiores en un 85%, 23% y 89% para las tipologías mencionadas.

Figura 5.28. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento de referencia.

Para los morteros de cemento con fibra de vidrio, Figura 5.29, el análisis de curvas muestra un descenso en los valores de densidad de energía de deformación a compresión, $E_{c1,125}$, en un 90% cuando se ensayan probetas de 160x40x40 mm, en un 63% cuando son cúbicas de 100 mm y en un 85% cuando se ensayan probetas de Ø100x200 mm, con respecto a las probetas cúbicas designadas por la normativa. Mientras que los valores de densidad de energía hasta deformaciones últimas son inferiores en un 92%, 44% y 86% para los tipos de probetas nombrados anteriormente.

Figura 5.29. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento con adición de fibras de vidrio.

Para los morteros de cemento con fibra de carbono, Figura 5.30, la comparación de resultados entre la probeta designada por normativa y las planteadas en este estudio refleja un descenso en los valores de densidad $E_{c1,125}$ del 90% cuando se ensayan probetas de 160x40x40 mm, del 66% cuando se ensayan probetas de 100x100x100 mm y del 87% si la probeta es de Ø100x200 mm. Mientras que los valores de densidad de energía hasta deformación última son inferiores en un 91%, 25% y 85% para las geometrías descritas anteriormente.

Figura 5.30. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento con adición de fibras de carbono.

En la Figura 5.31 se muestra el diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento con fibras de basalto ensayados en las distintas probetas. Comparando las curvas obtenidas del ensayo sobre la probeta de 40x40x40 mm con los diagramas derivados de los ensayos sobre las diferentes geometrías de probetas planteadas, se observa un descenso de la densidad de energía, $E_{c1,125}$, en un 91% cuando se ensayan probetas de 160x40x40 mm, en un 62% si son de 100x100x100 mm y en un 85% si son especímenes cilíndricos. Mientras que los valores de densidad de energía E_{cu} son inferiores en un 90%, 26% y 89% respectivamente.

Figura 5.31. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento con adición de fibras de basalto.

Para los morteros de cemento con fibras de mixtas, Figura 5.32, la comparación de resultados entre la probeta designada por normativa y las planteadas en este estudio refleja un descenso en los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ en un 91% cuando se ensayan probetas de 160x40x40 mm, en un 68% si son cúbicas de 100 mm y alrededor del 86% en probetas cilíndricas. Mientras que los valores de densidad de energía E_{cu} son inferiores en un 90%, 25% y 87% para los tipos de probetas nombrados anteriormente.

Figura 5.32. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento con adición de fibras mixtas.

La Tabla 5.6 muestra los resultados del análisis de los diagramas de tensión deformación a compresión de los morteros de cemento para los distintos tipos de probetas.

Probeta (mm)	Designación	E_{cr} (MPa)	ϵ_{max}	$E_{c1,125}$ (MPa)	E_{cu} (MPa)	ϵ_u
40x40x40	MC-R	0,15546	0,01106	0,46523	0,55838	0,04012
	MC-FV-1	0,13507	0,01020	0,42042	0,72059	0,06630
	MC-FC-1	0,14677	0,01173	0,43658	1,07406	0,10445
	MC-FB-1	0,13594	0,01053	0,42238	0,68053	0,06110
	MC-FM-1	0,14650	0,01144	0,45240	0,83808	0,07179
160x40x40	MC-R	0,05231	0,00367	0,08512	0,08511	0,00601
	MC-FV-1	0,04130	0,00326	0,06011	0,06016	0,00456
	MC-FC-1	0,04512	0,00348	0,09893	0,09897	0,00703
	MC-FB-1	0,03843	0,00311	0,06691	0,06698	0,00535
	MC-FM-1	0,04100	0,00322	0,08100	0,08101	0,00564
100x100x100	MC-R	0,11971	0,00920	0,16391	0,42930	0,03368
	MC-FV-1	0,09940	0,00831	0,15712	0,40635	0,03323
	MC-FC-1	0,11335	0,00951	0,14713	0,80994	0,07842
	MC-FB-1	0,10021	0,00813	0,15842	0,50087	0,04731
	MC-FM-1	0,11113	0,00947	0,14455	0,63152	0,05982
Ø100x200	MC-R	0,04104	0,00404	0,06010	0,06011	0,00539
	MC-FV-1	0,03529	0,00372	0,06279	0,10159	0,00966
	MC-FC-1	0,04516	0,00493	0,05572	0,16147	0,01581
	MC-FB-1	0,02944	0,00322	0,06154	0,07678	0,00761
	MC-FM-1	0,03570	0,00365	0,06377	0,10768	0,01084

Tabla 5.6. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica en función del tipo de probeta.

La densidad de energía de deformación hasta rotura de los morteros de cemento reforzados con fibras es inferior en todos los casos a la registrada por el mortero de referencia, excepto para la mezcla MC-FC-1 en probetas cilíndricas. Mientras que, de media para las probetas ensayadas, se observa un aumento de los valores de densidad de energía de deformación a compresión, $E_{c1,125}$, respecto a la referencia en un 5%, 1%, 3% y 5% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas respectivamente. Mientras que los valores de densidad de energía hasta deformación última experimentan un incremento sobre el 16%, 91%, 11% y 43% para dichas fibras.

Confrontando los valores obtenidos por los morteros de cemento con adición de fibras con los obtenidos por los morteros convencionales, se observa un descenso de la densidad de energía $E_{c1,125}$, de los morteros con fibras, en un 7% cuando la probeta ensayada es de 40x40x40 mm, en un 21% cuando se trata de probetas de 160x40x40 mm, en un 7% para la geometría de probeta de 100x100x100 mm y un aumento del 49% cuando la probeta es cilíndrica. Mientras que los valores de densidad de energía E_{cu} aumentan en un 48%, 37% y 86% cuando el ensayo se realiza en probetas de

40x40x40 mm, 100x100x100 mm y Ø100x200 mm respectivamente, y sufren una caída del 10% cuando la probeta ensayada es de 160x40x40 mm.

Mientras que si cotejamos los valores obtenidos tras el ensayo sobre la probeta de 40x40x40 mm -la designada por la normativa- con resultados derivados del ensayo en las otras geometrías de probetas planteadas, se observa, de media, un descenso de la densidad de energía $E_{c1,125}$ en un 90% cuando se ensayan probetas de 160x40x40 mm, en un 65% si la probeta es de 100x100x100 mm y en un 87% cuando se ensayan probetas de Ø100x200 mm. Mientras que los valores densidad de energía E_{cu} son inferiores en un 90%, 28% y 87% para las tipologías de probetas citadas anteriormente. Esto indica que la geometría de la probeta es determinante en el comportamiento post-fisuración. A menor tamaño de la probeta mayor será su capacidad de absorción de energía, debido a que se acentúa un alineamiento preferente de las fibras. Mientras que las probetas con mayor esbeltez presentan respuestas menos dúctiles a compresión [251,252]. También se observa que, la rigidez de la probeta está relacionada con la esbeltez de ésta.

En morteros de cemento, las densidades de energía de deformación a compresión $E_{c1,125}$ y E_{cu} aumentan en mayor medida cuando la fibra adicionada es de carbono. Así pues, la fibra de carbono presenta valores superiores en un 3% y 66% sobre la fibra de vidrio, en un 3% y 62% sobre la fibra de basalto y en un 1% y 29% sobre las mixtas, respectivamente.

A continuación, se presentan los diagramas de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica en función del tipo de probeta, Figuras 5.33, 5.34, 5.35, y 5.36, comentándose parcialmente los resultados de las diferentes mezclas. Posteriormente se presentará la Tabla 5.7 que recoge los todos los resultados del análisis realizado.

En la Figura 5.33 se muestra el diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica ensayados en probetas de 40x40x40 mm. La densidad de energía hasta rotura es superior en un 189%, 138%, 186% y 134% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas. Mientras que los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} son superiores en un 43%, 29%, 32% y 39% y en un 220%, 214%, 197% y 246%, respectivamente, cuando se añaden las fibras citadas.

Figura 5.33. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica para probetas de 40x40x40mm.

Cuando el ensayo se realiza sobre probetas de 160x40x40 mm, Figura 5.34, el análisis de las curvas refleja un aumento de la densidad de energía de deformación hasta la rotura en un 87%, 62%, 72% y 74% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas respectivamente. Los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} son superiores en un 417%, 393%, 472% y 458% y en un 154%, 341%, 351% y 342%, respectivamente, cuando se añaden las fibras nombradas anteriormente.

Figura 5.34. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica para probetas de 160x40x40mm.

En la Figura 5.35 se muestra el diagrama de tensión-deformación de los morteros de cal hidráulica cuando se ensayan probetas de 100x100x100 mm. Comparándolos con el mortero de referencia, se observa un aumento de la densidad de energía E_{cr} en un 164%, 218%, 139% y 227% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y

mixtas. Mientras que los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} son superiores en un 21%, 21%, 31% y 23% y en un 177%, 296%, 186% y 351%, respectivamente, cuando se añaden las fibras citadas inicialmente.

Figura 5.35. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica para probetas de 100x100x100mm.

Cuando los morteros de cal hidráulica son ensayados en probetas cilíndricas, Figura 5.36, se observa un aumento de los valores de densidad de energía hasta rotura en un 94%, 350%, 241% y 253% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, con respecto a la referencia. Mientras que los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} son superiores en un 69%, 22%, 18% y 28% y en un 143%, 170%, 112% y 173%, respectivamente, cuando se incorporan las fibras enumeradas anteriormente.

Figura 5.36. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica para probetas de Ø100x200mm.

En las Figuras 5.37, 5.38, 5.39, 5.40 y 5.41 se muestran los diagramas de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica en función del tipo de fibra.

En la Figura 5.37 se muestra el diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica de referencia ensayados en las distintas probetas. Comparando los resultados obtenidos tras el ensayo en probetas de 40x40x40 mm con los derivados de los ensayos en las otras geometrías planteadas, se observa un descenso de densidad de energía hasta rotura en un 87% cuando se ensayan probetas de 160x40x40 mm, en un 71% si son probetas cúbicas de 100 mm y en un 83% si son probetas cilíndricas. Mientras que los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} son inferiores en un 93% y 93%, 60% y 72% y 85% y 77% para las geometrías mencionadas.

Figura 5.37. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica de referencia.

Para los morteros de cal hidráulica con fibra de vidrio, Figura 5.38, el análisis de las curvas refleja un descenso de los valores de densidad de energía hasta rotura en un 92% cuando se ensayan probetas de 160x40x40 mm, en un 74% si son probetas de 100x100x100 mm y en un 89% si son probetas cilíndricas, con respecto a las probetas que designa la normativa. Mientras que los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} son inferiores en un 76% y 95%, 66% y 76% y 82% y 82% para las geometrías de probetas citadas anteriormente.

Figura 5.38. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica con adición de fibras de vidrio.

La comparación de los diagramas de tensión-deformación de los morteros de cal hidráulica con fibras de carbono según la geometría de probeta, Figura 5.39, muestra un descenso en los valores de densidad de energía hasta rotura en un 91% cuando se ensayan probetas de 160x40x40 mm, en un 62% si son probetas cúbicas de 100 mm y en un 69% si las probetas son cilíndricas, con respecto a las probetas de 40x40x40 mm. Mientras que los valores de densidad de energía de deformación $E_{c1,125}$ y E_{cu} son inferiores en un 74% y 95%, 62% y 64% y 86% y 80% para las tipologías de probetas nombradas inicialmente.

Figura 5.39. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica con adición de fibras de carbono.

En la Figura 5.40 se muestra el diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica con fibras de basalto ensayados en las distintas probetas.

Comparando los resultados alcanzados tras el ensayo en probetas de 40x40x40 mm con los obtenidos tras los ensayos en las otras geometrías planteadas, se observa un descenso de densidad de energía hasta rotura en un 92% cuando se ensayan probetas de 160x40x40 mm, en un 76% si son probetas cúbicas de 100 mm y en un 80% si son probetas cilíndricas. Mientras que los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} son inferiores en un 71% y 90%, 60% y 73% y 86% y 83% para las geometrías citadas con anterioridad.

Figura 5.40. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica con adición de fibras de basalto.

Para los morteros de cal hidráulica con fibras mixtas, Figura 5.41, el análisis de los diagramas de tensión-deformación en función de la geometría de las probetas refleja un descenso en los valores de densidad de energía E_{cr} en un 90% cuando se ensayan probetas de 160x40x40 mm, en un 60% si las probetas son de 100x100x100 mm y en un 75% si su geometría es de Ø100x200 mm, con respecto a las probetas de 40x40x40 mm. Mientras que los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} son inferiores en un 73% y 91%, 64% y 63% y 86% y 82% para las geometrías de probetas aludidas inicialmente.

Figura 5.41. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica con adición de fibras mixtas.

La Tabla 5.7 muestra los resultados del análisis de los diagramas de tensión deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica.

Probeta (mm)	Designación	E_{cr} (MPa)	ϵ_{max}	$E_{c1,125}$ (MPa)	E_{cu} (MPa)	ϵ_u
40x40x40	MCa-R	0,03091	0,01665	0,05922	0,12278	0,06263
	MCa-FV-1	0,08930	0,02955	0,08441	0,39292	0,15790
	MCa-FC-1	0,07356	0,02720	0,07659	0,38524	0,17465
	MCa-FB-1	0,08840	0,03103	0,07803	0,36487	0,15705
	MCa-FM-1	0,07241	0,02540	0,08228	0,42437	0,18958
160x40x40	MCa-R	0,00401	0,00226		0,00853	0,00483
	MCa-FV-1	0,00753	0,00283	0,02071	0,02162	0,00772
	MCa-FC-1	0,00652	0,00296	0,01972	0,03754	0,01643
	MCa-FB-1	0,00694	0,00247	0,02295	0,03837	0,01432
	MCa-FM-1	0,00703	0,00259	0,02237	0,03762	0,01461
100x100x100	MCa-R	0,00891	0,00341	0,02392	0,03461	0,01632
	MCa-FV-1	0,02353	0,00946	0,02904	0,09602	0,03691
	MCa-FC-1	0,02835	0,01105	0,02893	0,13713	0,05198
	MCa-FB-1	0,02134	0,00801	0,03132	0,09902	0,03692
	MCa-FM-1	0,02918	0,01084	0,02941	0,15601	0,04432
Ø100x200	MCa-R	0,00512	0,00335	0,00916	0,02865	0,01511
	MCa-FV-1	0,00990	0,00387	0,01548	0,06942	0,02682
	MCa-FC-1	0,02301	0,00981	0,01113	0,07721	0,03523
	MCa-FB-1	0,01740	0,00826	0,01114	0,06071	0,02832
	MCa-FM-1	0,01806	0,07887	0,01162	0,07801	0,03711

Tabla 5.7. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica en función del tipo de probeta.

La capacidad de absorción de energía de los morteros de cal hidráulica reforzados con fibras es superior en todos los casos a la registrada por el mortero de referencia. Así pues, cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas se produce un incremento medio de la densidad de energía E_{cr} en un 133%, 192%, 159% y 172%, respectivamente. También se observa incrementos de los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ en un 130%, 111%, 425% y 132% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, mientras que los valores de densidad de energía E_{cu} aumentan en un 138%, 255%, 212% y 278%.

Confrontando los valores obtenidos por los morteros de cal hidráulica con adición de fibras con los obtenidos por los morteros convencionales, se observa un aumento de la densidad de energía hasta tensión de rotura de los morteros con fibras, en un 162% cuando se utilizan probetas de 40x40x40 mm, en un 74% si las probetas empleadas son de 160x40x40 mm, en un 187% cuando se trata de probetas de 100x100x100 mm, y en un 235% cuando la probeta ensayada es cilíndrica. Mientras que los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} son superiores 36% y 219% cuando se utilizan probetas de 40x40x40 mm, en un 435% y 297% si las probetas empleadas son de 160x40x40 mm, en un 24% y 253% cuando se trata de probetas de 100x100x100 mm, y en un 35% y 149% cuando la probeta ensayada es cilíndrica.

Mientras que si cotejamos los valores obtenidos tras el ensayo sobre la probeta de 40x40x40 mm -la designada por la normativa- con resultados derivados del ensayo en las otras geometrías de probetas planteadas, se observa, de media, un descenso de la densidad de energía E_{cr} en un 91% cuando se ensayan probetas de 160x40x40 mm, en un 68% si la probeta es de 100x100x100 mm y en un 79% cuando se ensayan probetas de Ø100x200 mm. Mientras que los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} son inferiores en un 77% y 92%, 62% y 70% y 85% y 83% para las geometrías de probetas mencionadas anteriormente. Por tanto, el comportamiento postfisuración es similar al de los morteros de cemento con fibras, mostrando una mayor capacidad de absorción de energía cuanto menor tamaño y mayor esbeltez de probeta.

Los morteros de cal hidráulica con adición de fibra de basalto presentan valores de densidad de energía E_{cr} superiores en un 3% sobre los morteros con fibra de vidrio, en un 2% sobre los de carbono y en un 6% sobre los morteros con fibras mixtas. Si comparamos los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$, son los morteros con adición de fibras de vidrio los que presentan los mejores resultados, un 10% superiores sobre morteros con fibras de carbono, un 6% sobre los de basalto y un 3% sobre los que llevan fibras mixtas. Mientras que los morteros con fibras mixtas son los que presentan los valores de densidad de energía E_{cu} más altos, un 29% sobre los morteros con fibras de vidrio, un 9% sobre los de carbono y un 24% sobre los morteros con fibras mixtas.

5.2.5 Módulo de Young

En el ámbito de los trabajos de restauración de edificaciones, resulta interesante conocer el comportamiento a deformación bajo tensión de los morteros. Por ejemplo, determinados morteros hacen rígidos en exceso determinados elementos constructivos y, en consecuencia, varían el comportamiento estructural del conjunto.

Polo y Cantalapiedra [253] afirman que *“el módulo de Young es uno de los parámetros fundamentales en la resistencia de materiales y especialmente entre los materiales de construcción”*. Se obtiene a partir del cociente que relaciona la tensión unitaria aplicada y la deformación unitaria obtenida en su tramo elástico-lineal, en un proceso de variación de estado tensional.

El módulo de Young se determina según establece la norma UNE-EN 13412 [254]. Los especímenes a ensayar son probetas prismáticas de dimensiones 40x40x160 mm. Mediante dos sensores, se montan dos extensómetros sobre la superficie de la probeta de ensayo, fijados a 180º entre sí. Una vez alineados ambos sensores se introduce la probeta entre los dos platos en posición vertical. La máquina realiza seis ciclos de carga en los que aplica una fuerza del 30% de la carga de rotura, previamente calculada mediante el ensayo de compresión (Figura 5.42).

Figura 5.42. Determinación del módulo de Young.

El módulo de Young, E , de cada probeta se calcula por medio de la siguiente expresión (5.1):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5.1)$$

Siendo:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad ; \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (5.2) ; (5.3)$$

Donde,

- E Módulo de Young en MPa
 σ Carga máxima aplicada a la probeta en MPa
 ε Deformación

5.2.5.a Resultados

Para cada dosificación de mortero se han ensayado tres probetas a 28 días. Los resultados medios de los ensayos de módulo de Young son los que aparecen en la Tabla 5.8.

Designación	Módulo de Young (MPa)		Aumento/reducción respecto a la referencia (%)	
	M. Cemento	M. Cal hidráulica	M. Cemento	M. Cal hidráulica
M-R	6500	1200	0	0
M-FV-1	2500	1200	-62	0
M-FC-1	2800	1000	-57	-17
M-FB-1	2700	2000	-58	67
M-FM-1	2600	1100	-60	-8

Tabla 5.8. Módulo de Young para los distintos tipos de mortero.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede afirmar que la incorporación de altos volúmenes de fibras (1%) a los morteros de cemento genera el descenso del módulo de Young a más de la mitad. Mientras que para los morteros de cal hidráulica el módulo de Young ofrece un comportamiento dispar. Lo mismo ocurre si comparamos los valores obtenidos mediante este ensayo con los hallados mediante la interpretación de los diagramas.

Sin embargo y como se puede observar en las Figuras 5.43 y 5.44, existe una correlación entre el módulo de Young y la resistencia a compresión de los morteros. Se aprecia como ésta es mayor para los morteros de cemento siendo de 0,94, mientras que la correlación existente en los morteros de cal hidráulica es de 0,92.

Figura 5.43. Correlación entre el módulo de Young y la resistencia a compresión de los morteros de cemento.

Figura 5.44. Correlación entre el módulo de Young y la resistencia a compresión de los morteros de cal hidráulica.

5.2.6 Velocidad de impulsos ultrasónicos

La velocidad de transmisión de un frente de ondas ultrasónicas en un material depende de la densidad y de las propiedades elásticas de dicho material, y éstas, a su vez, están directamente relacionadas con la calidad y la resistencia del mismo. Por tanto, midiendo el tiempo que las ondas ultrasónicas tardan en atravesar una distancia conocida a través del material a estudiar, podemos conocer la velocidad de paso de las ondas que varían en función de que el material sea más o menos denso o en función de los posibles defectos internos que encuentre el frente y ondas a su paso.

Como no existe norma UNE sobre el método de ensayo para morteros, ha sido necesario adaptar la norma UNE-EN 12504-4 [255], donde se describe el procedimiento para la determinación de la velocidad de impulsos ultrasónicos en el hormigón. La analogía entre el comportamiento y la composición de los hormigones y de los morteros se considera justificación suficiente para utilizar este método.

El equipo empleado ha sido Ultrasonic Tester E 46 de la marca IEP Control S.A, que consta de un generador de impulsos eléctricos, un transductor emisor, un transductor receptor, un amplificador y un circuito electrónico de medida del tiempo.

Cuando el transductor emisor recibe el impulso del generador, se excita y oscila. Durante este proceso la superficie del emisor realiza unos movimientos en forma de pistón golpeando, a modo de martillo, la probeta a ensayar, así se genera el impulso de ondas ultrasónicas que atraviesa la probeta y llega al transductor receptor, en el que se genera una oscilación del mismo tipo que la del emisor, transformándose en una señal eléctrica que se amplifica en el aparato. El tiempo que tarda el impulso en recorrer el espacio entre los dos transductores aparece reflejado en la pantalla del equipo expresado en microsegundos.

El ensayo se ha realizado por transmisión directa, de manera que los dos transductores se colocan en las caras opuestas de la probeta, perfectamente enfrentados uno con otro (Figura 5.45).

Figura 5.45. Ensayo de ultrasonidos.

Conocida la longitud recorrida y el tiempo empleado, se puede hallar con precisión la velocidad de propagación al paso de los impulsos ultrasónicos.

Se calcula la velocidad, en km/s con la siguiente ecuación (5.4):

$$V = \frac{L}{t} \quad (5.4)$$

Donde,

- V Velocidad de propagación en km/s
 L Longitud en kilómetros
 t Tiempo de propagación en segundos

5.2.6.a Resultados

Para cada dosificación de mortero se han ensayado tres probetas. Los valores de la Tabla 5.9 son el resultado de la media aritmética de los valores individuales.

Designación	Velocidad (km/s)		Reducción respecto a la referencia (%)	
	M. Cemento	M. Cal hidráulica	M. Cemento	M. Cal hidráulica
MC-R	3,85	2,42	0	0
MC-FV-1	3,56	2,51	7	4
MC-FC-1	3,61	2,49	6	3
MC-FB-1	3,62	2,63	6	9
MC-FM-1	3,60	2,57	6	6

Tabla 5.9. Resultados de la medida de la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos para las distintas mezclas.

Los resultados alcanzados tras la realización de los ensayos de propagación de impulsos ultrasónicos muestran un comportamiento opuesto entre los morteros de cemento y los de cal hidráulica cuando se les añaden fibras. Para morteros de cemento, la velocidad de propagación disminuye con la adición de fibras, lo que concuerda con los resultados obtenidos las pruebas de aire ocluido en estado fresco y densidad en estado endurecido, que presuponen un aumento de la porosidad. En cambio, en los morteros de cal hidráulica, la velocidad de propagación aumenta con la adición de fibras a pesar de tener una porosidad mayor.

En las Figuras 5.46 y 5.47 se puede ver la correlación entre la propagación de impulsos ultrasónicos con la resistencia a compresión de los morteros. El coeficiente de correlación en los morteros de cemento (0,94) indica la relación lineal existente entre la resistencia a compresión y la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos. Sin embargo, el coeficiente de correlación en los morteros de cal hidráulica (0,78) unido a la dispersión de los resultados indica que no existe una relación lineal evidente entre las resistencias a compresión y la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos.

Figura 5.46. Correlación entre la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos y la resistencia a compresión de los morteros de cemento.

Figura 5.47. Correlación entre la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos y la resistencia a compresión de los morteros de cal hidráulica.

5.2.7 Resistencia a tracción indirecta

El ensayo consiste en ejercer una fuerza de compresión sobre una banda estrecha en toda su longitud de la probeta, originado una fuerza de tracción ortogonal resultante que rompe el espécimen por tracción.

Como no existe norma UNE sobre el método de este ensayo para morteros, ha sido necesario adaptar la norma UNE-EN 12390-6 [256], donde se describe el procedimiento para la determinación de la resistencia a tracción indirecta del hormigón. La analogía entre el comportamiento y la composición de los hormigones y de los morteros se considera justificación suficiente para utilizar este método.

El equipo empleado ha sido la maquina universal Ibertest modelo MIB-60/AM con control de carga por carrera, realizando el ensayo con una velocidad de carga de 1 mm/min.

La dimensión de la probeta a ensayar es la siguiente: Ø100x200 mm. Las probetas se colocan centradas en la prensa, situando la banda de carga a lo largo de la parte superior del plano de carga de la probeta, y se le aplica la carga con una velocidad uniforme hasta que se produce la rotura (Figura 5.48).

Figura 5.48. Determinación de la resistencia a tracción indirecta.

La resistencia a tracción indirecta, f_{ct} , de cada probeta se calcula por medio de la siguiente expresión (5.5):

$$f_{ct} = \frac{2 * F}{\pi * L * d} \quad (5.5)$$

Donde,

- f_{ct} Resistencia a tracción indirecta en MPa
- F Carga máxima aplicada a la probeta en N
- L Longitud de la línea en contacto con la probeta en mm
- d Dimensión de la sección transversal en mm

También se ha calculado la densidad de energía absorbida antes de la rotura (E_{br}), determinada como la energía que es necesaria comunicar a la probeta en el ensayo brasileño para que ésta alcance la resistencia máxima.

5.2.7.a Resultados

Los diagramas de tensión-deformación tras el ensayo brasileño se muestran en las Figuras 5.49 y 5.50. El comportamiento a tracción indirecta es semejante al de compresión en el periodo elástico. Hasta alcanzar una tensión aproximadamente la mitad de la alcanzada en el ensayo, el comportamiento es lineal (etapa I), perdiendo rigidez, a partir de este punto, debido a la microfisuración (etapa II). Una vez alcanzada la resistencia máxima el comportamiento es poco predecible.

Figura 5.49. Diagrama de tensión-deformación a tracción indirecta de mortero de cemento.

Figura 5.50. Diagrama de tensión-deformación a tracción indirecta de mortero de cal hidráulica.

Varios autores han empleado este ensayo para determinar la capacidad de absorción de energía de hormigones [257-259], concluyendo que el comportamiento post-fisuración obtenido no representa fielmente el efecto de las fibras. Según Carmona et al. [260] este ensayo es inapropiado por las siguientes razones:

- “El área de carga para grandes deformaciones, como sucede en el estado de post - fisuración, aumenta continuamente conduciendo a un incremento en la carga incluso después de la fisuración de la matriz”.
- “El ensayo es inestable bajo el control de desplazamiento”.

Por lo descrito, de los diagramas de tensión-deformación, solo se han extraído los valores de resistencia a tracción indirecta y absorción de energía hasta la rotura y la deformación a la que se produce. En las Tablas 5.10 y 5.11 aparecen los valores obtenidos, para los morteros de cemento y de cal hidráulica respectivamente.

Designación	Resistencia (MPa)	E_{br} (MPa)	ϵ_{max} (mm)	Aumento respecto a la referencia (%)		
MC-R	0,78	0,00194	0,00427	0	0	0
MC-FV-1	1,52	0,00825	0,01094	95	326	156
MC-FC-1	1,74	0,01128	0,01094	123	482	156
MC-FB-1	1,48	0,00862	0,01129	90	345	164
MC-FM-1	1,57	0,00885	0,01077	101	357	152

Tabla 5.10. Resultados del ensayo a tracción indirecta para los morteros de cemento.

Se puede apreciar que la incorporación de fibras en morteros de cemento genera un incremento significativo, tanto de la resistencia a la tracción indirecta como de la energía absorbida antes de la rotura, independientemente de la naturaleza de la fibra. Consecuentemente, la resistencia a tracción indirecta de los morteros con fibras aumenta, de media, un 102% con respecto a los morteros convencionales, mientras que la energía absorbida antes de la rotura aumenta un 378%. En cuanto al tipo de fibra, la de carbono es la que ofrece los mejores resultados, siendo los morteros que llevan adicionada fibra de basalto los que ofrecen los peores resultados.

Por otro lado, es bien conocido que los resultados de los “ensayos brasileños” pueden sobrevalorar la resistencia a tracción en los hormigones de densidad ordinaria, en tanto que la infravaloran cuando se trata de probetas de mortero [261]. Esto sucede para materiales de base cementicia, desconociéndose su comportamiento cuando el conglomerante es cal hidráulica.

En la Figura 5.51 se muestra comparativamente los resultados de la resistencia a la tracción indirecta y de la energía absorbida antes de la rotura, para los distintos tipos de mortero de cemento.

Figura 5.51. Comparación de resultados del ensayo a tracción indirecta para los morteros de cemento.

En la Tabla 5.11 aparecen los valores de resistencia a tracción indirecta y absorción de energía hasta la rotura y la deformación a la que se produce.

Designación	Resistencia (MPa)	E_{br} (MPa)	ϵ_{max} (mm)	Aumento respecto a la referencia (%)		
MCa-R	0,22	0,00058	0,00515	0	0	0
MCa-FV-1	0,42	0,00272	0,01134	91	370	120
MCa-FC-1	0,46	0,00372	0,01347	109	543	162
MCa-FB-1	0,38	0,00229	0,01042	73	296	102
MCa-FM-1	0,43	0,00322	0,01255	95	457	144

Tabla 5.11. Resultados del ensayo a tracción indirecta para los morteros de cal hidráulica.

La incorporación de fibras en morteros de cal hidráulica genera un incremento significativo de los valores de resistencia a la tracción indirecta y energía absorbida. De media, la resistencia a tracción indirecta de los morteros con fibras aumenta un 92% con respecto a los morteros de referencia, mientras que la energía absorbida antes de la rotura aumenta, un 417%. En cuanto al tipo de fibra, la de carbono es la que ofrece los mejores resultados, tanto de resistencia como de absorción de energía, siendo los morteros con fibra de basalto los que ofrecen los peores resultados.

En la Figura 5.52 se muestra comparativamente los resultados del ensayo a tracción indirecta para los distintos tipos de mortero de cal hidráulica.

Figura 5.52. Comparación de resultados del ensayo a tracción indirecta para los morteros de cal hidráulica.

5.2.8 Resistencia a impacto

Los ensayos dinámicos son realizados para valorar la capacidad de resistencia a cargas de impacto y determinar la tendencia a la rotura frágil del material. La velocidad

de deformación en ensayos dinámicos supera en varios órdenes a la velocidad de deformación en ensayos estáticos.

En la literatura aparecen una serie de ensayos para determinar la resistencia al impacto de materiales de base cementicia, entre los que se encuentran los ensayos de caída de bola, impacto de proyectiles a alta velocidad y el ensayo realizado con la barra de Hopkinson modificada [39-43, 85]. De los tres ensayos descritos anteriormente, el primero no aporta un valor de energía absorbida, simplemente el número de golpes antes de fisurarse y romperse.

La búsqueda en la presente investigación del valor de energía absorbida por los diferentes morteros condujo a la adaptación de la norma UNE-EN ISO 148-1 [262], donde se describe el procedimiento para la determinación de la resistencia a impacto de los metales, tradicionalmente conocido como ensayo del péndulo de Charpy.

Para la realización de dicho ensayo se tuvo que construir un “péndulo de Charpy” adaptado a las necesidades de nuestras probetas. En la Figura 5.53 se pueden ver el péndulo según norma y el utilizado en los ensayos

Figura 5.53. a) Péndulo Charpy según norma. b) Péndulo empleado para los ensayos.

La probeta se coloca horizontalmente sobre las sujeciones del péndulo. El impacto es aplicado en el plano perpendicular al eje longitudinal de la muestra. El péndulo se fija en la posición superior inicial (h_α de 0,70 m), o lo que es lo mismo $\alpha=90^\circ$, lo que corresponde a una velocidad del cuchillo del péndulo de 5,6m/s, en el momento del impacto. A continuación, se suelta el péndulo que cae libremente por gravedad sobre la probeta, absorbiendo esta parte de la energía y elevándose en relación con el eje vertical del péndulo en un ángulo β . Por medio de la escala, se mide el ángulo de elevación del péndulo.

Se calcula la energía, E_r , en Julios con la siguiente ecuación (5.6):

$$E_r = E_i - E_f - E_k \quad (5.6)$$

Siendo:

$$E = E_i = m * g * R * (\cos \beta - \cos \alpha) \quad (5.7)$$

$$E_k = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (5.8)$$

Donde,

- E_r Energía absorbida en J
- E_i Energía disipada por la probeta en J
- E_f Energía disipada por fricciones en J
- E_k Energía cinética necesaria para el desplazamiento hasta rotura en J
- m Masa en kg
- g Gravedad en m/s^2
- R Radio en m
- $\cos \alpha$ Angulo inicial con respecto a la vertical en rad
- $\cos \beta$ Angulo final con respecto a la vertical en rad
- v Velocidad en m/s

5.2.8.a Resultados

Para cada dosificación de mortero se han ensayado seis probetas, tres de 50x50x500 mm y otras tres de 100x30x500 mm. Los valores de la Tabla 5.12 y 5.13 son el resultado de la media aritmética de los valores individuales.

Designación	Energía absorbida (J)		Aumento respecto a la referencia (%)	
	500x50x50	500x100x30	500x50x50	500x100x30
MC-R	8,17	8,30	0	0
MC-FV-1	10,03	11,24	23	35
MC-FC-1	10,57	11,39	29	37
MC-FB-1	9,91	10,86	21	31
MC-FM-1	10,24	11,32	25	36

Tabla 5.12. Energía absorbida en función del tipo de probeta para los morteros de cemento.

Como se observa en la Tabla 5.12, la energía absorbida a impacto por los morteros de cemento depende: de la geometría de la probeta, presentando incrementos de energía absorbida a impacto del orden del 10% en probetas de 500x100x30 mm debido a la sección superior de esta y del tipo de fibra adicionada, presentando las mayores absorciones de energía los morteros con adición de fibra de carbono, siendo los morteros con fibra de basalto los que ofrecen los peores resultados.

Designación	Energía absorbida (J)		Aumento respecto a la referencia (%)	
	500x50x50	500x100x30	500x50x50	500x100x30
MCa-R	5,30	5,96	0	0
MCa-FV-1	6,93	8,29	31	39
MCa-FC-1	7,42	9,23	40	55
MCa-FB-1	6,70	8,08	26	36
MCa-FM-1	7,06	8,47	33	42

Tabla 5.13. Energía absorbida en función del tipo de probeta para los morteros de cal hidráulica.

En los morteros de cal hidráulica, Tabla 5.13, al igual que ocurre con los morteros de cemento, la energía absorbida depende de la geometría de la probeta y del tipo de fibra adicionada. Las probetas de 500x100x30 mm absorben un 21% más energía a impacto, ofreciendo los morteros con fibras de carbono los mejores resultados.

La energía absorbida también depende del tipo de conglomerante utilizado, así pues, los morteros de cemento absorben en torno a un 47% más de energía a impacto que los morteros de cal hidráulica cuando la probeta es de 500x50x50 mm, y sobre un 33% más cuando la probeta es de 500x100x30 mm.

Para los morteros ensayados, la adición de fibras supone un incremento de la capacidad de absorción de energía a impacto. Analizándolos conjuntamente con los resultados de absorción de energía tras los ensayos estáticos, se puede afirmar que la adición de fibras aumenta la ductilidad de los morteros.

5.2.9 Resistencia a la adhesión

La adherencia puede definirse como la capacidad del mortero de absorber tensiones normales o tangenciales a la superficie del soporte. Las variaciones dimensionales del mortero debidas a contracciones y dilataciones resultado de la acción de los agentes externos (lluvia, hielo, frío-calor, etc.) y los movimientos del soporte, tienden a que el mortero se despegue del soporte. Es, posiblemente, una de las principales propiedades que se debe exigir a un mortero.

En el sistema constructivo de las fábricas de ladrillo es también una de las propiedades más importantes de los morteros, y depende de numerosas variables, algunas complejas, por lo que es difícil de predecir su comportamiento. El mortero debe ser capaz de absorber los esfuerzos sirviendo de ligante entre las piezas para que no se separen y no se produzca fisuración.

La unión entre el mortero y el soporte o entre el mortero y las piezas de albañilería se realizan en las siguientes fases [263]:

- Succión del agua desde el mortero al soporte o a las piezas de albañilería que se inicia inmediatamente al contactar y dura minutos o incluso horas.
- Transporte del cemento por el agua succionada e introducción en los poros del soporte y de las piezas.
- Hidratación y cristalización del conglomerante en los poros colmatados provocando los anclajes entre la pasta y las piezas.

La tensión adherente alcanzada en la interfase mortero-soporte o mortero-piezas, depende del anclaje de los cristales del conglomerante del mortero en los poros del soporte o de las piezas. En este proceso intervienen la cantidad, el grado de penetración y la hidratación del conglomerante en dichos poros. Cuanto mayor sea el área de contacto eficaz entre la pasta de mortero y el soporte mayor número de anclajes se extenderán y mayor adherencia final poseerá el conjunto.

La determinación de la resistencia a la adhesión se determina con la norma UNE-EN 1015-12 [264]. El objeto del ensayo es conocer la resistencia de unión entre un mortero y un soporte.

Para la preparación de las probetas, se emplea un anillo troncocónico de acero inoxidable de canto vivo, como el de la Figura 5.54.

Figura 5.54. Anillo troncocónico.

Después de aplicar el mortero fresco sobre el soporte y con posterioridad al fraguado inicial, se coloca en anillo troncocónico, que presionando y girando sobre si mismo aísla el cilindro de mortero del resto de la masa, tal y como se aprecia en la Figura 5.55.

Figura 5.55. Marcado del mortero con anillo troncocónico.

Una vez que la mezcla se ha endurecido, se pega una pastilla de tracción a la superficie circular del cilindro de mortero. La pastilla de acero inoxidable tiene forma cilíndrica de diámetro 50 mm y espesor mínimo de 10 mm, y está provista de un dispositivo de fijación al equipo de tracción directa.

A continuación, se coloca el mecanismo en la pastilla de tracción y se actúa con el equipo de arrancamiento por tracción hasta producirse el despegue (Figura 5.56).

Figura 5.56. Equipo de arrancamiento de pastillas por tracción.

La resistencia a la adhesión se calcula con la siguiente ecuación (5.9):

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (5.9)$$

Donde,

- f_u Resistencia a la adhesión en MPa
- F_u Carga de rotura a tracción en N
- A Área de la superficie de ensayo en mm

Los tipos de rotura fiables son los que aparecen representados en la Figura 5.57. Cuando se tienen tipos de rotura como los de las Figuras 5.58 y 5.59, es decir sin rotura de interfase mortero-soporte, los resultados correspondientes se deben considerar como valores en el límite superior.

Figura 5.57. Tipo de rotura a – Rotura adhesiva – rotura en la interfase entre el mortero y el soporte. El valor del ensayo es igual a la resistencia a la adhesión.

Figura 5.58. Tipo de rotura b – Rotura cohesiva – rotura en el mortero. El valor del ensayo es mayor que el valor del ensayo.

Figura 5.59. Tipo de rotura c – Rotura cohesiva – rotura en el soporte. El valor del ensayo es mayor que el valor del ensayo.

5.2.9.a Resultados

De cada serie se han realizado cinco ensayos de adherencia. En las Tablas 5.14 y 5.15 se muestran los distintos valores de adherencia para cada uno de los conglomerantes utilizados.

Designación	Resistencia a la adhesión (MPa)					Media
	1	2	3	4	5	
MC-R	0,69	0,71	0,76	0,74	0,64	0,71
MC-FV-1	0,69	0,99	0,66	0,64	0,69	0,73
MC-FC-1	1,02	0,64	0,71	0,76	0,69	0,76
MC-FB-1	0,99	0,69	0,74	0,64	0,74	0,76
MC-FM-1	0,74	0,97	0,84	0,69	0,66	0,78

Tabla 5.14. Resultados ensayo de resistencia a la adhesión en mortero de cemento.

Designación	Resistencia a la adhesión (MPa)					Media
	1	2	3	4	5	
MCa-R	0,38	0,41	0,36	0,28	0,31	0,35
MCa-FV-1	0,38	0,31	0,36	0,23	0,51	0,36
MCa-FC-1	0,46	0,33	0,54	0,36	0,38	0,41
MCa-FB-1	0,48	0,38	0,33	0,36	0,33	0,38
MCa-FM-1	0,33	0,28	0,31	0,36	0,54	0,36

Tabla 5.15. Resultados ensayo de resistencia a la adhesión en mortero de cal hidráulica.

El tipo de rotura en todos los casos es “adhesiva”. La norma indica que el valor numérico de la resistencia a la adhesión debe alcanzar un requerimiento mínimo de 0,1 MPa. Este valor se supera en todas las mezclas lo que significa que la adherencia del mortero al soporte es suficiente y adecuada.

La resistencia a la adhesión de los morteros con fibras es ligeramente superior a la obtenida en morteros de referencia, presentando valores un 6% superiores cuando el conglomerante es cemento y un 8% cuando es cal hidráulica.

5.2.10 Retracción

La retracción consiste en una deformación volumétrica de contracción, como consecuencia del movimiento de humedad dentro del material cuando existe un gradiente de humedad relativa entre el medio ambiente y la estructura. Ramírez de Arellano [250] describe la retracción como *“un fenómeno complejo, influenciado por una multitud de parámetros, y aunque siempre ha estado directamente asociada a la patología de las fisuras, también puede desarrollar otros efectos, como la reducción de volumen, que tiene lugar durante el secado de los morteros”*.

Como no existe norma UNE sobre el método de este ensayo para morteros, ha sido necesario adaptar la norma UNE 80-112 [265], donde se describe el procedimiento para la determinación de la retracción por secado del cemento.

El ensayo consiste en medir la variación de longitud de probetas de dimensiones especiales (25x25x287 mm). Los pernos calibradores insertados en la probeta nos van a permitir efectuar las medidas en un comparador de longitudes a lo largo del proceso de curado (Figura 5.60). Los datos se tomarán a las 24, 48 horas, 7, 14 y 28 días.

Figura 5.60. Medición de la retracción por secado.

La retracción o cambio de longitud de la probeta, L , de cada probeta se calcula por medio de la siguiente expresión (5.10):

$$\Delta L = \frac{L_x * L_i}{G} \times 100 \quad (5.10)$$

Donde,

ΔL	Variación de longitud en (%)
L_x	Diferencia entre las lecturas de la probeta y de la barra patrón en mm
L_i	Diferencia entre la lectura de la barra patrón L_p y de la probeta L_o en mm
G	Longitud efectiva de medida de 0,285 mm

5.2.10.a Resultados

Para cada dosificación de mortero se han ensayado dos probetas. En las Tablas 5.16 y 5.17 aparecen los valores obtenidos, correspondientes a la media aritmética de los valores individuales.

Designación	Variación de la longitud (%)						
	1 día	2 días	7 días	14 días	21 días	28 días	90 días
MC-R	0,0301	-0,0404	-0,0789	-0,1140	-0,1316	-0,1491	-0,2018
MC-FV-1	0,0022	0,0035	0,0000	-0,0035	-0,0070	-0,0140	-0,0351
MC-FC-1	0,0172	0,0281	-0,0035	-0,0105	-0,0140	-0,0175	-0,0386
MC-FB-1	0,0102	0,0140	-0,0175	-0,0246	-0,0351	-0,0456	-0,0632
MC-FM-1	0,0151	0,0211	0,0000	-0,0070	-0,0140	-0,0175	-0,0456

Tabla 5.16. Variación de la longitud para los morteros de cemento.

Designación	Variación de la longitud (%)						
	1 día	2 días	7 días	14 días	21 días	28 días	90 días
MCa-R	0,0175	-0,0211	-0,1263	-0,1439	-0,2105	-0,2281	-0,3018
MCa-FV-1	0,0029	-0,0035	-0,0035	-0,0175	-0,0281	-0,0421	-0,0667
MCa-FC-1	0,0074	0,0105	-0,0035	-0,0105	-0,0105	-0,0175	-0,0667
MCa-FB-1	0,0028	0,0035	-0,0070	-0,0246	-0,0281	-0,0386	-0,0768
MCa-FM-1	0,0049	-0,0070	-0,0105	-0,0211	-0,0421	-0,0596	-0,1018

Tabla 5.17. Variación de la longitud para los morteros de cal hidráulica.

En las Tablas 5.16 y 5.17 se refleja la variación de la longitud de la probeta en función del tiempo, expresándose como valores positivos la expansión del mortero y como valores negativos la retracción. Dichos resultados muestran que los valores de las mezclas con adición de fibras presentan, además de unos valores de retracción inferiores, una estabilidad dimensional superior, independientemente del tipo de fibra adicionada. Este comportamiento se puede observar claramente en las Figuras 5.61 y 5.62.

Figura 5.61. Variación de la longitud en función del tiempo para los morteros de cemento.

Independientemente del tipo de fibra adicionada y del conglomerante utilizado, las mezclas tienen un comportamiento similar. El mortero con fibras sufre una ligera expansión los primeros días, para posteriormente retraer con el paso del tiempo. Sin embargo, el mortero de referencia retrae constantemente a partir de las primeras 24 horas. La retracción de los morteros de cemento con adición de fibras es inferior a los morteros convencionales en un 83% cuando se adiciona fibra de vidrio, en un 81% cuando se añade fibra de carbono, en un 69% cuando se agrega fibra de basalto y en un 77% cuando las fibras son mixtas. Mientras que, para los morteros de cal hidráulica, la retracción descende con la incorporación fibras en un 77%, 78%, 75% y 66% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente

Figura 5.62. Variación de la longitud en función del tiempo para los morteros de cal hidráulica.

5.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Esta técnica se utiliza para examinar la estructura microscópica de las mezclas de morteros. El equipo empleado, que aparece en la Figura 5.63, ha sido un microscopio electrónico de barrido SEM Jeol JSM-820 con el software de análisis EDX Oxford ISIS-Link.

Figura 5.63. Microscopio electrónico de barrido.

El microscopio electrónico de barrido permite obtener:

- La composición elemental de la muestra observada mediante un detector de rayos X.
- Fotografías de hasta 300.000 aumentos.

Para la preparación de la metalización de las muestras se ha utilizado un equipo Cressington 108 Auto/SE Sputter Coater como el que se muestra en la Figura 5.64.

Figura 5.64. Equipo de preparación de muestras.

En la Figura 5.65 se observan varias muestras de mortero recubiertas con oro antes de su ensayo para hacer conductora su superficie y que los electrones que inciden sobre la muestra sean capaces de moverse por la superficie y generar su imagen.

Figura 5.65. Detalle de la muestra con recubrimiento de oro.

Las muestras se colocan en una precámara de vacío antes de introducirlas en la cámara y ser barridas con un haz de electrones acelerados que viajan a través del cañón. Un detector mide la cantidad de electrones enviados que arroja la intensidad de la superficie de la muestra, siendo capaz de mostrar imágenes en tres dimensiones, proyectados en una imagen digital.

La microscopia electrónica de barrido se ha realizado sobre la superficie de fractura de las probetas que incorporan un 1% de fibras después de la realización de ensayos mecánicos.

Para cada uno de los morteros estudiados; cemento y cal hidráulica; y cada una de las fibras; vidrio, carbono, basalto y mixtas; se realizaron tomas de imágenes con diferentes aumentos con el objetivo de estudiar completamente la microestructura de los morteros.

La Figura 5.66 muestra la superficie de fractura de los morteros de cemento con las cuatro tipologías de fibras, obtenidas mediante microscopia electrónica de barrido (BSE a 50 aumentos), mientras que la Figura 5.67 muestra la estructura interna de los morteros de cal hidráulica con fibras. Estas fotografías permiten explicar parte del comportamiento del mortero.

Tanto en morteros de cemento como en los de cal hidráulica se observa que, aunque las fibras están orientadas al azar en todas direcciones, dentro de la masa del mortero siempre hay algunas fibras que actúan de “puente” o “ganchos” entre los lados de una fisura, pudiendo transmitir los esfuerzos con ángulos muy variables de acuerdo con la orientación que posean con respecto al plano de fisura, lo que conduce a un mejor comportamiento post-fisuración. No obstante, la gran cantidad de fibras introducidas en el mortero dan lugar a formación de cúmulos, especialmente cuando la fibra es de carbono, ocasionando problemas de trabajabilidad [266].

También se aprecia la elevada cantidad de poros existentes en el mortero con fibras, lo que confirma el exceso de aire ocluido que ocasiona la inclusión de fibras en la matriz

[85,247]. Los poros, de tamaño variable, son más comunes en morteros de cemento que en los de cal hidráulica confirmando los resultados obtenidos tras el ensayo de aire ocluido.

Figura 5.66. Imagen de electrones retrodispersados (BSE) a 50 aumentos de los morteros de cemento: a) fibras de vidrio, b) fibras de carbono, c) fibras de basalto, d) fibras mixtas.

Figura 5.67. Imagen de electrones retrodispersados (BSE) a 50 aumentos de los morteros de cal hidráulica: a) fibras de vidrio, b) fibras de carbono, c) fibras de basalto, d) fibras mixtas.

La Figura 5.68 muestra la superficie de fractura de los morteros de cemento con las cuatro tipologías de fibras, obtenidas mediante microscopia electrónica de barrido (BSE a 250 aumentos), mientras que en la Figura 5.69 se muestra la estructura interna de los morteros de cal hidráulica con fibras. Estas fotografías permiten explicar parte del comportamiento del mortero.

Se aprecia una matriz uniforme y compacta, aunque aparecen algunas grietas entre los áridos y el conglomerante más visibles para en los morteros de cemento. También se puede observar el diámetro variable de las fibras, teniendo las de vidrio y basalto un diámetro similar, mientras que las de carbono poseen un diámetro inferior.

Se observa que las fibras no rompen por el esfuerzo de tracción, sino que deslizan por pérdida de adherencia. Este efecto, es comúnmente denominado “pull-out”, es común para todos los morteros con adición de fibras cortas. Debido a la alta resistencia de las fibras combinado con la baja adherencia con las matrices sería necesario una gran longitud de empotramiento para que las fibras rompieran por tracción.

Figura 5.68. Imagen de electrones retrodispersados (BSE) a 250 aumentos de los morteros de cemento: a) fibras de vidrio, b) fibras de carbono, c) fibras de basalto, d) fibras mixtas.

Figura 5.69. Imagen de electrones retrodispersados (BSE) a 250 aumentos de los morteros de cal hidráulica: a) fibras de vidrio, b) fibras de carbono, c) fibras de basalto, d) fibras mixtas.

La Figura 5.70 muestra la superficie de fractura de los morteros de cemento con las cuatro tipologías de fibras obtenidas mediante microscopia electrónica de barrido (BSE a 1000 aumentos), mientras que la Figura 5.71 muestra la estructura interna de los morteros de cal hidráulica con fibras. Se observa cómo las superficies de las fibras adicionadas al mortero de cemento quedan parcialmente cubiertas por la matriz. Esto indica que, aunque existe unión entre la pasta de cemento y las fibras, ésta no es óptima. La interfaz entre las fibras y la matriz de cal hidráulica es más continua, presentando una gran cantidad de pasta adherida sobre su superficie que la envuelve prácticamente en su totalidad, indicando la excelente unión entre las fibras y la matriz de cal hidráulica. Esta observación es similar a la encontrada en referencias a estudios anteriores [67,84]. Como consecuencia, es necesaria una mayor cantidad de energía para que se produzca la extracción de la fibra, favoreciendo el aumento de la ductilidad.

La mejor interacción entre las fibras y la matriz de cal hidráulica explicaría por qué la tenacidad aumenta casi el doble en morteros de cal hidráulica con fibras en comparación con sus homólogos de cemento.

Figura 5.70. Imagen de electrones retrodispersados (BSE) a 1000 aumentos de los morteros de cemento: a) fibras de vidrio. b) fibras de carbono. c) fibras de basalto. d) fibras mixtas.

Figura 5.71. Imagen de electrones retrodispersados (BSE) a 1000 aumentos de los morteros de cal hidráulica: a) fibras de vidrio. b) fibras de carbono. c) fibras de basalto. d) fibras mixtas.

5.4 Recopilación de la discusión de resultados del capítulo

A continuación, se muestra la discusión de los resultados obtenidos tras la realización de los distintos ensayos descritos en el capítulo.

- La geometría de la probeta influye en los valores de resistencia y capacidad de absorción de energía, tanto a flexión como a compresión, independientemente del tipo de mortero y de fibra adicionada.
- Los morteros de cemento con fibras presentan valores de resistencia a flexión y compresión inferiores a los morteros de referencia, independientemente de la geometría de la probeta. Los valores de resistencia a flexión y compresión obtenidos en las probetas designadas por la normativa son superiores a los obtenidos cuando se ensayan las otras geometrías planteadas.
- La escasa resistencia a flexión de los morteros de cal hidráulica no permitió la realización del ensayo en las distintas geometrías planteadas. Los valores de resistencia a compresión aumentan con respecto a la referencia

independientemente de la geometría de la probeta. La resistencia a compresión obtenida tras los ensayos realizados con las probetas designadas por la normativa es igual o superior a la obtenida cuando se ensayan las otras geometrías planteadas.

- La capacidad de absorción de energía a flexión de los morteros de cemento con adición de fibras siempre es superior a la obtenida en morteros de referencia, independientemente del tipo de fibra y la geometría de la probeta. Mientras que los valores de densidad de energía obtenidos tras el ensayo sobre la probeta normalizada son inferiores a los obtenidos cuando se ensayan las otras geometrías planteadas.
- La relación ancho-canto de las probetas es un factor determinante en la capacidad de absorción de energía a flexión. Probetas con una mayor relación ancho-canto presentan los resultados más altos debido a que las fibras se orientan preferentemente en dos direcciones elevando el número de éstas que atraviesan la zona de fractura.
- Los morteros con fibras son entre cuatro y siete veces más dúctiles que sus homólogos de referencia, independientemente del tipo de fibra y de la geometría de la probeta, siendo los adicionados con fibras de carbono los que presentan una mayor capacidad de absorción de energía.
- La capacidad de absorción de energía a compresión de los morteros de cemento y de cal hidráulica con adición de fibras siempre es superior a la obtenida en el mortero de referencia, independientemente del tipo de fibra y la geometría de la probeta. Los valores obtenidos cuando se ensaya el mortero en la probeta normalizada son bastante inferiores a los obtenidos cuando se ensayan las otras geometrías planteadas.
- La esbeltez y el tamaño de la probeta influyen en el comportamiento post-fisuración a compresión. A menor tamaño de probeta mayor capacidad de absorción de energía, debido a que se acentúa un alineamiento preferente de las fibras. Mientras que las probetas con mayor esbeltez presentan respuestas menos dúctiles.
- El módulo de Young decrece a más de la mitad en morteros de cemento con la incorporación de altos volúmenes de fibras, obteniéndose así un material menos rígido. Los resultados obtenidos en morteros de cal hidráulica no son concluyentes, presentando un comportamiento dispar.
- La velocidad de impulsos ultrasónicos en morteros de cemento disminuye con la adición de fibras, lo que concuerda con los resultados obtenidos tras los ensayos de densidad y aire ocluido. En cambio, en morteros de cal

hidráulica, la velocidad de propagación aumenta con la adición de fibras a pesar de tener una porosidad mayor.

- La adición de fibras aumenta la resistencia a tracción indirecta y absorción de energía pre-rotura, independientemente del tipo de conglomerante, siendo la fibra de carbono la que ofrece los mejores resultados.
- La energía absorbida a impacto, tanto por los morteros de cemento como por los de cal hidráulica, mejora en todos los casos con la adición de fibras. Ésta depende; del tipo de probeta, presentando mejores resultados en probetas con mayor canto; y del tipo de fibra adicionada, presentando los mejores resultados los morteros con adición de fibra de carbono.
- Si bien la resistencia a la adherencia aumenta ligeramente con la incorporación de fibras, se puede afirmar que la adición de fibras no influye de manera significativa.
- Los morteros con adición de fibras tienen un comportamiento frente a la retracción similar, presentando una estabilidad dimensional superior a sus homólogos de referencia, independientemente del tipo de fibra adicionada y del conglomerante utilizado.
- Las micrográficas muestran una fuerte adhesión entre la matriz de cal hidráulica y las fibras, sin separación de fases evidente. Para morteros de cemento, la interacción entre las fibras y la matriz no es óptima. La mejor interacción entre las fibras y la matriz de cal hidráulica explica el mejor comportamiento de estos morteros en comparación con sus homólogos de cemento.
- El análisis de las superficies de fractura permitió constatar los siguientes comportamientos o tendencias:
 - La adición de fibras trae consigo el aumento del número de poros, especialmente los de gran tamaño.
 - Las altas cantidades de fibras provocan problemas de dispersión que traen consigo la formación de cúmulos de fibras.
 - Las fibras no rompen por el esfuerzo de tracción, sino que deslizan por pérdida de adherencia con la matriz, fenómeno conocido como “pull out”.

6

DURABILIDAD DE LOS MORTEROS

Uno de los objetivos perseguidos cuando se fabrican morteros con propiedades mejoradas, consiste en estudiar su viabilidad a largo plazo. Por eso, el análisis y la evolución de las propiedades mecánicas mediante ensayos de durabilidad resultan de especial relevancia.

La durabilidad del mortero es su capacidad para soportar, durante su vida útil para la que ha sido proyectado, las condiciones físicas y químicas a las que va a ser expuesto y que podrían llegar a provocar su degradación.

En este sentido, el estudio de las propiedades y el análisis de la durabilidad resultan fundamentales para comprobar el comportamiento que tendrán estos morteros a lo largo del tiempo.

El estudio de la durabilidad de morteros y hormigones con incorporación de fibras en su matriz es un tema ampliamente estudiado cuando se trata de la adición de fibras de vidrio [267-269]. También aparecen aportaciones cuando se adiciona al mortero u hormigón fibras de acero [270,271], fibras de polipropileno [272,273], fibras acrílicas [239] y fibras naturales (sisal [274], coco [275] o palmera [276]). Sin embargo, no se han encontrado estudios específicos que aborden la durabilidad de morteros de cemento u hormigones con incorporación de fibras de carbono y basalto.

Cuando se trata de morteros de cal hidráulica con fibras, el número de artículos que estudian su durabilidad es mucho menor, siendo las fibras de polipropileno [83] y las naturales [277] las únicas estudiadas.

En este capítulo se va a estudiar la durabilidad de los morteros con adición de fibras mediante diversos ensayos de envejecimiento acelerado, de acuerdo con la normativa.

Los ensayos empleados para evaluar la durabilidad de las mezclas de morteros han sido los siguientes:

- Resistencia a la heladicidad
- Resistencia a la cristalización de sales
- Resistencia al choque térmico

Siguiendo los mismos criterios que en el capítulo anterior, se han seleccionado, para la realización de los ensayos de durabilidad, los morteros con una cantidad de fibras del 1%. Se ha decidido estudiar estas dosificaciones por ser las que mejoran en mayor medida la capacidad de absorción de energía del material.

6.1 Heladicidad

El ensayo de comportamiento frente a ciclos de hielo-deshielo evalúa la resistencia de los morteros que van a ser empleados como materiales de exterior, además de

indicar parámetros del grado de cohesión interna de las partículas que componen el mortero.

Este análisis se basa en la intermitencia de la formación de hielo y deshielo dentro de las probetas y del cambio de volumen que eso conlleva, lo que provoca un cuadro característico de rotura final del material conocido como heladicidad. Este factor depende del grado de entrada de agua que puede alcanzar en función del sistema de poros que existen en el material (poros abiertos, cerrados, capilares, intercomunicados, etc.) que facilitan o dificultan la entrada del agua al interior.

Como no existe ninguna norma UNE para realizar el ensayo de hielo-deshielo en morteros, se ha adaptado la norma UNE-EN 12371 [278], que describe el procedimiento para evaluar el comportamiento de la piedra natural sometida a ciclos de hielo-deshielo. La analogía entre el comportamiento de la piedra natural y el mortero se considera justificación suficiente para utilizar este método.

Para la realización de la prueba se han utilizado tres probetas, de cada dosificación de mortero con un 1% de adición de fibras, de forma prismática y dimensiones de 160x40x40 mm.

Las probetas previamente saturadas se someten a 25 ciclos de hielo-deshielo: 6 horas de congelación al aire saturadas a -12 °C, seguido de descongelación de 18 horas, sumergidas en agua a 20 °C de temperatura (Figura 6.1).

Figura 6.1. Congelación de probetas previamente saturadas.

La toma de datos para determinar el resultado de este ensayo se determina mediante:

- Pérdida de masa por efecto de los ciclos de hielo-deshielo.
- Análisis de las resistencias, a flexión y compresión, de las probetas sometidas a ensayo, en comparación con las probetas no ensayadas. Los datos de las resistencias mecánicas se recogen en el apartado 6.2.4, donde se muestra una comparativa entre todas las resistencias mecánicas obtenidas después de los diferentes ensayos de envejecimiento.

6.1.a Resultados

En la Figura 6.2 se muestra el deterioro sufrido por las probetas después de la realización de los ciclos de hielo y deshielo.

Figura 6.2. Deterioro de las probetas tras el ensayo de heladicidad: a) morteros de cemento, b) morteros de cal hidráulica.

La pérdida de masa resultante del ensayo de heladicidad se recoge en la Tabla 6.1. El valor final es el resultado de la media aritmética de los valores tres individuales.

Designación	Pérdida de masa (g)		Reducción respecto a la referencia (%)	
	M. Cemento	M. Cal hidráulica	M. Cemento	M. Cal hidráulica
M-R	14,8	69,6	3,0	14,9
M-FV-1	12,7	3,0	2,6	0,7
M-FC-1	10,0	5,1	2,1	1,2
M-FB-1	10,1	4,0	2,2	0,9
M-FM-1	7,0	4,1	1,4	0,9

Tabla 6.1. Pérdida de masa tras la realización del ensayo de heladicidad.

Los resultados muestran una mayor degradación de los morteros de referencia en comparación con los morteros adicionados, independientemente de la naturaleza de la fibra y del tipo de conglomerante. Por tanto, las fibras son útiles para prevenir la aparición de microfisuras que facilitan la penetración de agua, acelerando la degradación del material.

Resulta llamativo que los morteros de cal hidráulica tengan una menor degradación, excepto el de referencia, a la sufrida por los de cemento, teniendo en cuenta que la capacidad de absorber agua de estos morteros es bastante superior a la de los elaborados con cemento.

6.2 Cristalización de sales

Los morteros son materiales susceptibles de padecer eflorescencias cuando soportan elevados contenidos de humedad. Debido a su naturaleza porosa, son capaces de albergar las sustancias que transitan hacia su cara exterior. Las sales alcalinas son las que con más frecuencia producen este tipo de alteraciones.

Las eflorescencias son sales solubles que cristalizan en forma de manchas blancas sobre la superficie del mortero (eflorescencias, efecto estético) o en el interior (criptoeflorescencias, defecto estructural).

La cristalización de sales es uno de los mecanismos de alteración más importantes y agresivos que puede sufrir un material, especialmente si es poroso. Aunque no existe norma específica para determinar la expansión de morteros debido a la presencia de sales solubles, se ha adaptado la norma UNE-EN 12370 [279] de aplicación a la piedra natural.

En el proceso operatorio, se secan 3 probetas de cada dosificación de mortero con un 1% de fibras, de dimensiones 160x40x40 mm y se introducen en una disolución de sulfato sódico decahidratado ($\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{H}_2\text{O})_{10}$) saturada al 14% y así se mantiene durante 2 horas (Figura 6.3). A continuación, se secan en la estufa a 105 °C durante 16 horas, para posteriormente dejar enfriar a temperatura ambiente durante 6 horas. Cada ciclo completo se repite 15 veces.

Figura 6.3. Saturación de probetas en la disolución de sulfato sódico decahidratado.

Este ensayo es altamente agresivo, ya que una vez que el agua se evapora, la sal que queda en el mortero cristaliza y ocupa unas 17 veces más que en disolución.

Si durante el ensayo se ha producido una degradación excesiva, se detiene el análisis y se registra el número de ciclos efectuados. La resistencia a la cristalización de sales solubles se calcula mediante:

- Pérdida de masa por efecto de la cristalización.

- Análisis de las resistencias, a flexión y compresión, de las probetas sometidas a ensayo, en comparación con las probetas no ensayadas. Los datos de las resistencias mecánicas se recogen en el apartado 6.2.4, donde se muestra una comparativa entre todas las resistencias mecánicas obtenidas después de los diferentes ensayos de envejecimiento.

6.2.a Resultados

En la Figura 6.4 se muestra el deterioro sufrido por las probetas después de la realización del ensayo de cristalización de sales.

Figura 6.4. Deterioro de las probetas tras el ensayo de cristalización de sales: a) morteros de cemento, b) morteros de cal hidráulica.

La pérdida de masa resultante del ensayo de cristalización de sales se recoge en la Tabla 6.2. El valor final es el resultado de la media aritmética de los tres valores.

Designación	Pérdida de masa (g)		Reducción respecto a la referencia (%)	
	M. Cemento	M. Cal hidráulica	M. Cemento	M. Cal hidráulica
M-R	6,6	1,3	9,4	2,0
M-FV-1	28,3	5,9	13,2	3,1
M-FC-1	8,1	1,6	10,8	2,4
M-FB-1	34,3	7,3	21,9	4,9
M-FM-1	8,9	1,8	11,9	2,7

Tabla 6.2. Pérdida de masa tras la realización del ensayo de cristalización de sales.

Los resultados obtenidos tras los ensayos de cristalización de sales no reflejan fielmente el daño estructural sufrido por las probetas. La formación de cristales en el interior de mortero (Figura 6.5) desvirtúa completamente los resultados, permitiendo una subestimación de estos. No obstante, los valores muestran una mayor degradación de los morteros con fibras en comparación a los morteros de referencia.

Figura 6.5. Cristalización de sales en el interior del mortero.

6.3 Choque térmico

La variación dimensional por cambios de temperatura depende, por una parte, de los coeficientes de dilatación de los materiales que constituyen la capa de acabado y por otra, de la situación climática, la orientación y la exposición de la fachada o de los materiales.

Los cambios de temperatura provocan dilataciones y contracciones según el coeficiente de dilatación térmica del material. Ello puede provocar roturas en el momento de la contracción como consecuencia de las retenciones que supone la unión del acabado al soporte.

Para realizar el ensayo de resistencia al choque térmico se ha trabajado con la norma UNE-EN 14066 [280] de aplicación a la piedra natural, puesto que no existe norma UNE que indique el procedimiento para la realización de los ensayos en los morteros.

El ensayo consiste en someter probetas de dimensiones 160x40x40 mm a cambios de temperatura siguiendo el siguiente procedimiento: 18 horas en una estufa ventilada a 70 °C (Figura 6.6), seguidas de 6 horas sumergidas en agua a temperatura de 20 °C. Tanto en estufa como en el depósito de agua, las probetas se colocan sobre los apoyos, separadas entre sí y de la pared un mínimo de 50 mm. El ciclo completo se repite 20 veces.

Figura 6.6. Secado de probetas en la estufa.

Se ha evaluado la resistencia al envejecimiento por choque térmico por la variación de masa en porcentaje de las probetas después de realizado el ensayo, y mediante el análisis de las resistencias mecánicas a flexión y compresión. Dichas resistencias se recogen en el apartado 6.2.4 en una comparativa con todos los ciclos de envejecimiento acelerado.

6.3.a Resultados

En la Figura 6.7 se muestra el deterioro sufrido por las probetas después de la consecución de los ciclos de choque térmico.

Figura 6.7. Deterioro de las probetas tras el ensayo de choque térmico: a) morteros de cemento, b) morteros de cal hidráulica.

Las pérdidas de masa resultante del ensayo de choque térmico se recogen en la Tabla 6.3. El valor final es el resultado de la media aritmética de los tres valores individuales.

Designación	Pérdida de masa (g)		Reducción respecto a la referencia (%)	
	M. Cemento	M. Cal hidráulica	M. Cemento	M. Cal hidráulica
M-R	9,0	5,3	1,7	1,1
M-FV-1	3,3	1,3	0,7	0,3
M-FC-1	4,3	0,9	0,9	0,2
M-FB-1	0,6	1,7	0,1	0,4
M-FM-1	4,5	2,6	0,9	0,6

Tabla 6.3. Pérdida de masa tras la realización del ensayo de choque térmico.

Se observa la escasa influencia de los ciclos de choque térmico sobre los morteros, no produciéndose en ningún mortero pérdidas significativas. No obstante, los resultados muestran una mayor degradación de los morteros de referencia en comparación con los morteros con fibras, independientemente de la naturaleza de la fibra y del tipo de conglomerante.

6.4 Propiedades mecánicas después de los ensayos de envejecimiento acelerado

Con posterioridad a las pruebas de envejecimiento acelerado, además de examinar tanto visualmente como la variación de peso de las probetas para comprobar el grado de deterioro, se ha llevado a cabo un estudio comparativo del efecto que estos ensayos tienen sobre las propiedades mecánicas a flexión y a compresión; acorde a la norma UNE-EN 1015-1; y sobre los parámetros de ductilidad, acorde a las normas UNE 83510:2004 y ASTM C 1018-97.

Cada uno de los datos representa la media de las medidas tomadas para tres probetas de una misma dosificación a flexión, y seis a compresión. Todos los ensayos se llevaron a cabo en condiciones de laboratorio.

6.4.1 Resistencia a flexión

En la Tabla 6.4 aparecen los resultados de la resistencia a flexión para las diferentes mezclas de cemento después de la realización de los ensayos de envejecimiento acelerado.

Designación	Resistencia a flexión (MPa)			Reducción respecto a la referencia (%)		
	Heladicidad	C. Sales	C. Térmico	Heladicidad	C. Sales	C. Térmico
MC-R	8,2	6,3	8,6	0	0	0
MC-FV-1	7,4	4,1	6,7	10	35	22
MC-FC-1	8,1	5,8	7,7	1	8	10
MC-FB-1	7,1	3,2	6,5	13	48	25
MC-FM-1	7,3	4,5	7,9	11	28	9

Tabla 6.4. Resistencia a flexión de los morteros de cemento tras los ensayos de envejecimiento acelerado.

La resistencia a flexión de los morteros de cemento con adición de fibras es inferior a la obtenida en los de referencia tras la realización de los ensayos de durabilidad. Los ciclos de cristalización de sales son los que afectan en mayor medida a los morteros produciendo una merma, de media, del 30% entre las distintas fibras con respecto a la referencia. Mientras que los ciclos de hielo-deshielo y choque térmico suponen una pérdida del 9% y del 17% respectivamente.

Si se comparan estos resultados con la pérdida de masa, es llamativo que, aunque los ciclos de hielo-deshielo suponen un mayor deterioro que los ciclos de choque térmico, se obtienen resultados superiores tras el ensayo de heladicidad. Esto puede atribuirse a un mejor curado del mortero, por estar gran parte del ensayo de heladicidad sumergidos en agua. Por lo tanto, se puede afirmar que, en las resistencias obtenidas tras los ensayos de durabilidad, tanto para los morteros de cemento como para los de cal hidráulica, influyen de manera notoria otras variables como es la diferencia de curado entre los diferentes ensayos. Este comportamiento ya fue descrito por Toledo et al. [274].

En la Figura 6.8 se aprecia lo descrito anteriormente. Es evidente la pérdida de resistencias de todos los morteros tras el ensayo de cristalización de sales, debido a que es un ensayo muy agresivo. Sin embargo, tanto los morteros sometidos a ciclos de hielo-deshielo como al choque térmico presentan unas resistencias superiores a las obtenidas por los morteros ensayados en condiciones de laboratorio a 28 días, debido a la influencia del curado en agua y a unas edades de ensayo superiores.

La mejora de resistencias mecánicas de materiales de base cementicia por curado en agua es un tema ampliamente conocido [281-283]

Figura 6.8. Resistencia a flexión de los morteros de cemento tras los ensayos de envejecimiento acelerado.

En la Tabla 6.5 aparecen los resultados de la resistencia a flexión para los morteros de cal hidráulica después de la realización de los ensayos de envejecimiento acelerado.

Designación	Resistencia a flexión (MPa)			Aumento respecto a la referencia (%)		
	Heladicidad	C. Sales	C. Térmico	Heladicidad	C. Sales	C. Térmico
MCa-R	1,1	2,1	2,4	0	0	0
MCa-FV-1	2,8	3,4	3,6	144	62	50
MCa-FC-1	3,6	3,4	4,0	216	62	67
MCa-FB-1	2,9	3,2	3,4	154	52	42
MCa-FM-1	3,2	2,9	3,2	181	38	33

Tabla 6.5. Resistencia a flexión de los morteros de cal hidráulica tras los ensayos de envejecimiento acelerado.

Los morteros de cal hidráulica con adición de fibras presentan resistencias a flexión superiores a la registrada por el mortero de convencional tras la realización de los ensayos de durabilidad. Los ciclos de hielo-deshielo son los que provocan las resistencias más bajas excepto en los morteros con fibras de carbono. No obstante, si comparamos los morteros con fibras respecto a la referencia después de los ensayos de durabilidad, el de heladicidad supone, de media, una mejora del 174% entre las distintas fibras. Siendo esta mejora del 54% y del 48% tras los ensayos de cristalización de sales y choque térmico.

En la Figura 6.9 se aprecia el incremento de las resistencias a flexión de los morteros de cal hidráulica tras de la realización de los ensayos de envejecimiento acelerado con respecto a los morteros ensayados a 28 días. La ganancia de resistencias mecánicas de los morteros de cal hidráulica a pesar de estar sometidos a

ciclos de envejecimiento se debe a la edad de ensayo y al curado diferencial en agua al que están sometidas las probetas en dichos ensayos. Sepulcre [8] reportó aumentos en la resistencia (más del doble) en probetas curadas en agua con respecto a las curadas al aire.

Figura 6.9. Resistencia a flexión de los morteros de cal hidráulica tras los ensayos de envejecimiento acelerado.

Es llamativo que el ensayo de cristalización de sales no produzca mermas en las resistencias a flexión de los morteros de cal hidráulica, a pesar de los importantes daños causados en la probeta, tal y como se aprecia en la Figura 6.10. Esto puede deberse a que la gran cantidad de sal cristalizada en el interior del mortero suponga morteros más compactos.

Figura 6.10. Probeta de cal hidráulica con fibra de carbono tras ensayo de cristalización de sales.

6.4.2 Capacidad de absorción de energía a flexión

Para analizar la capacidad de absorción de energía a flexión de los morteros con fibras después de los ensayos de envejecimiento acelerado, al igual que en el capítulo 4, se han examinado los diagramas de tensión-desplazamiento utilizando los siguientes parámetros:

G_{fr}	Energía absorbida a flexión hasta tensión de rotura en N/mm
δ_{max}	Desplazamiento máximo a flexión en mm
$G_{fL/150}$	Energía absorbida a flexión en N/mm
G_{fu}	Energía absorbida a flexión hasta colapso en N/mm
δ_u	Desplazamiento último a flexión en mm
$I_{5, 10, 20, 30}$	Índices de tenacidad
I_u	Índice de tenacidad último

Para estudiar el aumento de la fragilidad de los morteros con fibras o “proceso de fatiga estática” [49], se comparan los diagramas de tensión-desplazamiento a flexión obtenidos tras realizar los ensayos de envejecimiento acelerado con los derivados de los ensayados a 28 días (Figuras 6.11, 6.12 y 6.13 para los de cemento y Figuras 6.15, 6.16 y 6.17 para los de cal hidráulica). De esta comparación, son relevantes las flechas últimas que soportan las probetas de morteros antes del colapso, ya que los valores de absorción de energía dependen de la resistencia máxima. Una vez analizados los datos de cada ensayo, se presenta la Tabla 6.6 que recoge los todos los resultados del estudio realizado.

En la Figura 6.11 se muestra el diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento tras el ensayo de heladicidad. La energía absorbida a flexión hasta rotura mejora, de media, un 15% con la adición de fibras. La energía absorbida $G_{fL/150}$ es superior a la marcada por los morteros de referencia en un 89%, 248%, 94% y 259% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente, mientras que los valores de absorción de energía G_{fu} son superiores en un 89%, 294%, 94% y 338%.

Los desplazamientos últimos alcanzados por las probetas de mortero tras los ciclos de hielo-deshielo son inferiores en un 69%, 65%, 53% y 34% cuando se comparan con los morteros con fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, ensayados a 28 días.

Figura 6.11. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento tras el ensayo de heladicidad.

Cuando se somete al mortero de cemento a ciclos de cristalización de sales, Figura 6.12, el análisis de las curvas refleja, de media, un aumento de la energía absorbida G_{fr} en un 90% cuando se adicionan fibras. La energía absorbida $G_{fl/150}$ aumenta en un 132%, 375%, 101% y 284% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente. Mientras que los valores de absorción de energía G_{fu} , aumentan en torno al 146%, 513%, 153% y 633% cuando se añaden las fibras anteriormente mencionadas.

Cuando se comparan los desplazamientos últimos alcanzados por las probetas de mortero sometidas a ciclos de cristalización de sales con los obtenidos tras los ensayos a 28 días, estos son inferiores en un 50%, 58%, 13% y 24% para los morteros con adición de fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente.

Se observa un cambio importante en el comportamiento de los morteros tras el ensayo de cristalización de sales. Los morteros pierden rigidez debido a las microfisuras producidas por las sales cristalizadas en su interior.

Figura 6.12. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento tras el ensayo de cristalización de sales.

En la Figura 6.13 se muestra el diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento tras el ensayo de choque térmico. La energía absorbida a flexión G_{fr} de los morteros con fibras mejora, de media, un 12%. La energía absorbida $G_{fr/150}$ es superior en un 112%, 294%, 48% y 277% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente, mientras que los valores de absorción de energía G_{fu} son superiores en un 112%, 575%, 48% y 353%.

Los desplazamientos últimos alcanzados por las probetas de mortero tras los ciclos térmicos son inferiores en un 61%, 23%, 65% y 37% cuando se comparan con los morteros con adición de fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, ensayados a 28 días.

Figura 6.13. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento tras el ensayo de choque térmico.

La Tabla 6.6 muestra los resultados del análisis de los diagramas de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento tras los distintos ensayos de envejecimiento acelerado.

Ensayo	Designación	G_{fr} (MPa)	δ_{max} (mm)	$G_{fL/150}$ (MPa)	G_{fu} (MPa)	δ_u (mm)	I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}	I_u
A 28 días	MC-R	0,595	0,195	0,595	0,595	0,195					1,00
	MC-FV-1	0,569	0,180	1,746	2,363	1,616	3,35	5,24	7,79		8,38
	MC-FC-1	0,522	0,175	2,130	3,770	2,816	2,77	4,58	8,27	10,86	15,49
	MC-FB-1	0,633	0,186	1,433	1,725	1,393	3,03	4,91	6,89		7,95
	MC-FM-1	0,557	0,170	1,747	2,397	1,784	2,25	4,49	7,45		8,98
Tras ensayo de heladicidad	MC-R	0,755	0,158	0,755	0,755	0,158					1,00
	MC-FV-1	0,869	0,213	1,425	1,425	0,504	2,77				3,55
	MC-FC-1	1,085	0,240	2,625	2,972	0,975	3,05	4,09			4,32
	MC-FB-1	0,665	0,173	1,464	1,464	0,654	2,29				2,33
	MC-FM-1	0,845	0,216	2,711	3,310	1,179	3,12	4,09			4,10
Tras ensayo de cristalización de sales	MC-R	0,453	0,166	0,453	0,453	0,166					1,00
	MC-FV-1	0,604	0,304	1,052	1,116	0,809					1,40
	MC-FC-1	1,180	0,434	2,150	2,778	1,184	2,73				3,48
	MC-FB-1	0,498	0,313	0,912	1,146	1,214					1,62
	MC-FM-1	1,152	0,501	1,740	3,321	2,209	2,65				3,18
Tras ensayo de choque térmico	MC-R	0,680	0,219	0,680	0,680	0,219					1,00
	MC-FV-1	0,785	0,230	1,442	1,442	0,631					2,08
	MC-FC-1	0,821	0,215	2,676	4,585	2,161	2,80				3,43
	MC-FB-1	0,613	0,190	1,003	1,003	0,482					1,85
	MC-FM-1	0,814	0,212	2,563	3,078	1,120	2,73				3,27

Tabla 6.6. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento tras los ensayos de envejecimiento acelerado.

Analizando globalmente los resultados obtenidos por los morteros de cemento cuando se someten a ensayos de envejecimiento acelerado, se observa como la energía absorbida a flexión G_{fr} aumenta un 21%, 75%, 1% y 62% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente. Mientras que los valores de absorción de energía $G_{fL/150}$ y G_{fu} son superiores en un 111% y 116% cuando se añaden fibras de vidrio, en un 305% y 460% cuando se añaden fibras de carbono, en un 81% y 98% cuando se añaden fibras de basalto y en un 273% y 441% cuando se añaden fibras mixtas.

Independientemente del tipo de ensayo realizado, la capacidad de absorción de energía a flexión de los morteros de cemento aumenta en mayor medida cuando la fibra adicionada es de carbono. Los valores de absorción de energía G_{fr} , $G_{fL/150}$ y G_{fu} son superiores en un 37%, 93% y 159% sobre la fibra de vidrio, en un 74%, 123% y 186% sobre la fibra de basalto y en un 10%, 8% y 6% sobre las mixtas.

Aunque la capacidad de absorción de energía de los morteros de cemento con fibras sea superior a la exhibida por el mortero de referencia, se produce una disminución de la capacidad de deformación en comparación con la de los morteros ensayados a 28 días. De media, los δ_u son inferiores en un 60%, 49%, 44% y 16% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente. Esto supone una pérdida de ductilidad de los morteros con fibras, como indican los índices de tenacidad últimos mostrados en la Figura 6.14. De media, caen un 57%, 51%, 25% y 18% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente.

Figura 6.14. Índices de tenacidad últimos de los morteros de cemento tras los ensayos de envejecimiento acelerado.

En la Figura 6.15 se muestra el diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cal hidráulica tras el ensayo de heladicidad. La energía absorbida a flexión hasta rotura mejora, de media, un 510% con la adición de fibras. La energía absorbida $G_{fL/150}$ es superior a la marcada por los morteros de referencia en un 1586%, 2552%, 911% y 1966% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente, mientras que los valores de absorción de energía G_{fu} son superiores en un 1838%, 3501%, 911% y 2464%.

Los desplazamientos últimos alcanzados por las probetas de mortero tras los ciclos de hielo-deshielo, comparados con los ensayados a 28 días, son inferiores en un 35%, 59%, 66% y 7% cuando se comparan con los morteros con de fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas.

Figura 6.15. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cal hidráulica tras el ensayo de heladicidad.

Cuando se somete al mortero de cal hidráulica a ciclos de cristalización de sales, Figura 6.16, el análisis de las curvas muestra, de media, un aumento de la energía absorbida hasta la fractura G_{fr} en un 90% cuando se adicionan fibras. La energía absorbida $G_{fL/150}$ aumenta en un 123%, 571%, 112% y 385% sobre el mortero de referencia cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas. Mientras que los valores de absorción de energía G_{fu} , aumentan en torno al 123%, 845%, 112% y 447%.

Cuando se comparan los desplazamientos últimos alcanzados por las probetas de mortero sometidos a ciclos de cristalización de sales con los obtenidos tras los ensayos a 28 días, estos son inferiores en un 79%, 57%, 77% y 15% para morteros con adición de fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas.

Figura 6.16. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cal hidráulica tras el ensayo de cristalización de sales.

En la Figura 6.17 se muestra el diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cal hidráulica tras el ensayo de choque térmico. La energía absorbida a flexión G_{fr} de los morteros con fibras mejora, de media, un 64%. La energía absorbida $G_{fl/150}$ es superior a la marcada por los morteros de referencia en un 243%, 543%, 90% y 477% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente, mientras que los valores de absorción de energía G_{fu} son superiores en un 243%, 585%, 90% y 517%.

Los desplazamientos últimos alcanzados por las probetas de mortero tras los ciclos térmicos son inferiores en un 72%, 76%, 80% y 34% cuando se comparan con los morteros con adición de fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, ensayados a 28 días.

Figura 6.17. Diagrama de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cal hidráulica tras el ensayo de choque térmico.

La Tabla 6.7 muestra los resultados del análisis de los diagramas de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cal hidráulica tras los distintos ensayos de envejecimiento acelerado.

Ensayo	Designación	G_{fr} (MPa)	δ_{max} (mm)	$G_{fL/150}$ (MPa)	G_{fu} (MPa)	δ_u (mm)	I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}	I_u
A 28 días	MCa-R	0,016	0,034	0,016	0,016	0,060					1,00
	MCa-FV-1	0,109	0,107	0,580	0,912	1,439	3,35	5,24	7,79		8,38
	MCa-FC-1	0,129	0,134	0,542	1,996	3,250	2,77	4,58	8,27	10,86	15,49
	MCa-FB-1	0,126	0,130	0,585	0,997	1,389	3,03	4,91	6,89		7,95
	MCa-FM-1	0,077	0,082	0,482	0,694	1,178	2,25	4,49	7,45		8,98
Tras ensayo de heladicidad	MCa-R	0,054	0,081	0,054	0,054	0,081					1,00
	MCa-FV-1	0,295	0,179	0,910	1,046	0,930	2,77				3,55
	MCa-FC-1	0,450	0,210	1,431	1,943	1,332	3,05	4,09			4,32
	MCa-FB-1	0,234	0,152	0,545	0,545	0,475	2,29				2,33
	MCa-FM-1	0,337	0,187	1,115	1,384	1,094	3,12	4,09			4,10
Tras ensayo de cristalización de sales	MCa-R	0,190	0,176	0,190	0,190	0,176					1,00
	MCa-FV-1	0,303	0,181	0,425	0,425	0,299					1,40
	MCa-FC-1	0,518	0,269	1,279	1,800	1,391	2,73				3,48
	MCa-FB-1	0,249	0,148	0,404	0,404	0,320					1,62
	MCa-FM-1	0,328	0,212	0,848	1,042	1,007	2,65				3,18
Tras ensayo de choque térmico	MCa-R	0,182	0,146	0,182	0,182	0,146					1,00
	MCa-FV-1	0,300	0,159	0,623	0,623	0,399					2,08
	MCa-FC-1	0,363	0,162	1,168	1,245	0,778	2,80				3,43
	MCa-FB-1	0,187	0,111	0,346	0,346	0,272					1,85
	MCa-FM-1	0,343	0,173	1,049	1,121	0,782	2,73				3,27

Tabla 6.7. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cal hidráulica tras los ensayos de envejecimiento acelerado.

Analizando globalmente los resultados obtenidos por los morteros de cal hidráulica cuando se someten a ensayos de durabilidad, se observa como la capacidad de absorción de energía a flexión G_{fr} aumenta un 190%, 335%, 123% y 229% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente. Mientras que los valores de absorción de energía $G_{fL/150}$ y G_{fu} son superiores en un 651% y 735% cuando se añaden fibras de vidrio, en un 1222% y 1644% cuando se añaden fibras de carbono, en un 371% y 371% cuando se añaden fibras de basalto y en un 930% y 1143% cuando se añaden fibras mixtas.

Independientemente del tipo de ensayo realizado, la energía absorbida a flexión por los morteros de cal hidráulica aumenta en mayor medida cuando la fibra adicionada es de carbono. Los valores de absorción de energía G_{fr} , $G_{fL/150}$ y G_{fu} son superiores en un 48%, 98% y 138% sobre la fibra de vidrio, en un 99%, 199% y 285% sobre la fibra de basalto y en un 32%, 34% y 41% sobre las mixtas.

Aunque la capacidad de absorción de energía de los morteros de cal hidráulica con fibras sea superior a la exhibida por el mortero de referencia, se produce una disminución de la capacidad de deformación en comparación con los morteros ensayados a 28 días. De media, la δ_u es inferior en un 62%, 64%, 74% y 18% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente. Esto supone

una pérdida de ductilidad de los morteros con fibras, como muestran los índices de tenacidad últimos mostrados en la Figura 6.18. De media, los índices últimos caen un 72%, 76%, 76% y 61% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas.

Figura 6.18. Índices de tenacidad últimos de los morteros de cal hidráulica tras los ensayos de envejecimiento acelerado.

6.4.3 Resistencia a compresión

En la Tabla 6.8 aparece los valores obtenidos de las resistencias a compresión para los morteros de cemento después de la realización de los ensayos de envejecimiento acelerado.

Designación	Resistencia a compresión (MPa)			Reducción respecto a la referencia (%)		
	Heladicidad	C. Sales	C. Térmico	Heladicidad	C. Sales	C. Térmico
MC-R	31,7	23,7	31,0	0	0	0
MC-FV-1	30,4	14,2	28,9	4	40	7
MC-FC-1	27,6	19,2	27,4	13	19	12
MC-FB-1	26,1	14,7	29,0	18	38	6
MC-FM-1	30,0	17,5	27,6	5	26	11

Tabla 6.8. Resistencia a compresión de los morteros de cemento tras los ensayos de envejecimiento acelerado.

Los morteros de cemento con adición de fibras presentan unas resistencias a compresión inferiores a la de los morteros de referencia tras la realización de los ensayos de durabilidad. Los ciclos de cristalización de sales son los que afectan en mayor medida a los morteros produciendo una merma, de media, del 31 % entre las distintas fibras con respecto a la referencia. Mientras que los ciclos de hielo-deshielo y choque térmico suponen una pérdida del 10% y del 9% respectivamente.

Al igual que ocurría con la resistencia a flexión, los morteros sometidos a ciclos de hielo-deshielo como al choque térmico presentan unas resistencias superiores a las obtenidas por los morteros ensayados en condiciones de laboratorio a 28 días, pero inferiores a los ensayados a 120 días, como se muestra en la Figura 6.19. Esto confirma la escasa incidencia de dichos ensayos en las resistencias de los morteros, teniendo más importancia las condiciones de curado y la edad del mortero.

No obstante, la acusada pérdida de resistencias cuando los morteros están sometidos a ciclos de cristalización de sales pone de manifiesto la agresividad del ensayo, afectando en mayor medida a los morteros con fibras.

Figura 6.19. Resistencia a compresión de los morteros de cemento tras los ensayos de envejecimiento acelerado.

En la Tabla 6.9 aparecen los resultados de la resistencia a compresión para los morteros de cal hidráulica después de la realización de los ensayos de envejecimiento acelerado.

Designación	Resistencia a compresión (MPa)			Aumento respecto a la referencia (%)		
	Heladicidad	C. Sales	C. Térmico	Heladicidad	C. Sales	C. Térmico
MCa-R	5,3	7,8	9,1	0	0	0
MCa-FV-1	9,5	9,6	10,8	79	24	19
MCa-FC-1	10,1	8,2	12,5	91	5	37
MCa-FB-1	9,4	8,9	10,7	77	14	18
MCa-FM-1	9,3	9,5	11,4	75	22	25

Tabla 6.9. Resistencia a compresión de los morteros de cal hidráulica tras los ensayos de envejecimiento acelerado.

Los morteros de cal hidráulica con adición de fibras presentan unas resistencias a compresión superiores a la registrada por los morteros de convencionales tras la

realización de los ensayos de envejecimiento acelerado. En términos de mejora de resistencias respecto a la referencia, los morteros con fibras, de media, después del ensayo de heladicidad poseen una resistencia un 81% superior. Cuando se someten a ciclos de cristalización de sales y choque térmico, los morteros con fibras presentan resistencias superiores en un 16% y un 25% respecto de sus homólogos de referencia.

Al igual que ocurría para las resistencias a flexión, el ensayo de cristalización de sales no produce mermas en las resistencias a compresión de los morteros de cal hidráulica, a pesar de los importantes daños causados en la probeta.

En la Figura 6.20 se aprecia como todos los morteros sometidos a ciclos de envejecimiento acelerado presentan resistencias a compresión superiores, tanto a los morteros ensayados a 28 como a 120 días, excepto el mortero de referencia del ensayo de heladicidad. Este comportamiento confirma que el curado de los morteros de cal hidráulica en presencia de agua es más influyente en las resistencias que los daños micro y macroestructurales que sufren los morteros por la acción de los ensayos de durabilidad.

Figura 6.20. Resistencia a compresión de los morteros de cal hidráulica tras los ensayos de envejecimiento acelerado.

6.4.4 Capacidad de absorción de energía a compresión

Para analizar la capacidad de absorción de energía a compresión de los morteros con fibras después de los ensayos de envejecimiento acelerado, al igual que en el capítulo 4, se han examinado los diagramas de tensión-deformación utilizando los siguientes parámetros:

E_{cr}	Densidad de energía de deformación a compresión hasta tensión de rotura en MPa
ϵ_{max}	Deformación máxima a compresión en %

$E_{c1,125}$	Densidad de energía de deformación a compresión en MPa
E_{cu}	Densidad de energía de deformación a compresión hasta tensión última en MPa
ϵ_u	Deformación última a compresión en %.

Para estudiar la fragilización de los morteros con fibras se comparan los diagramas de tensión-deformación a compresión obtenidos tras realizar los ensayos de envejecimiento acelerado con los derivados de los ensayos a 120 días (Figuras 6.21, 6.22 y 6.23 para los de cemento y Figuras 6.24, 6.25 y 6.26 para los de cal hidráulica). De esta comparación, son interesantes los valores de densidad de energía y de deformación última que soportan los morteros, ya que los valores de densidad de energía de deformación dependen de la resistencia máxima. Una vez analizados los datos de cada ensayo, se presenta la Tabla 6.10 que recoge los todos los resultados del estudio realizado.

En la Figura 6.21 se muestra el diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento tras el ensayo de heladicidad. La densidad de energía hasta tensión de rotura empeora, de media, un 6% con respecto al mortero de referencia. La densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} de los morteros con fibras es superior a la marcada por el de referencia en un 2% y 22% cuando es de vidrio, en un 8% y 57% cuando se adicionan fibras de carbono y en un 11% y 46% si las fibras son mixtas. Mientras que si las fibras son de basalto empeoran en un 13% y 10% con respecto a la referencia.

Las deformaciones últimas de las mezclas tras el ensayo de heladicidad son inferiores en un 36% cuando se trata del mortero de referencia y en un 37%, 36%, 45% y 39% cuando se ensayan los morteros con adición de fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente.

Figura 6.21. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento tras el ensayo de heladicidad.

Cuando se somete al mortero de cemento a ciclos de cristalización de sales, Figura 6.22, el análisis de las curvas refleja, de media, un aumento de la densidad de energía, E_{cr} , en un 49% de los morteros con fibra con respecto a los morteros convencionales. La densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} de los morteros con fibras es superior a la marcada por los morteros de referencia en un 12% y 80% cuando se adicionan fibras de carbono y en un 1% y 28% si las fibras son mixtas. Mientras que los valores de densidad de energía en morteros fibras de vidrio y basalto empeoran en un 26% y 16% y en un 36% y 29%, respectivamente.

Cuando se compara las deformaciones últimas entre los morteros ensayados a 120 días y tras el ensayo de cristalización de sales, los valores obtenidos por los segundos son inferiores en un 43%, 42%, 30%, 41% y 44% para los morteros de referencia y con adición de fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente.

Figura 6.22. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento tras el ensayo de cristalización de sales.

En la Figura 6.23 se muestra el diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento tras el ensayo de heladicidad. La densidad de energía de deformación hasta tensión de rotura mejora, de media, un 49% con respecto al mortero de referencia. La densidad de energía, $E_{c1,125}$, de los morteros con fibras es superior a la obtenida en morteros de referencia en un 18%, 41%, 11% y 2% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente. Mientras que la densidad de energía, E_{cu} , presenta valores superiores en un 1%, 51% y 32% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono y mixtas, dando resultados inferiores en un 10% cuando la fibra añadida es de basalto.

Los valores de deformación últimos obtenidos tras los ciclos térmicos son inferiores en un 34% 42%, 39%, 44% y 42% cuando se comparan con los morteros de referencia y con adición de fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, ensayados a 120 días.

Figura 6.23. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento tras el ensayo de choque térmico.

La Tabla 6.10 muestra los resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento.

Ensayo	Designación	E_{cr} (MPa)	ϵ_{max}	$E_{c1,125}$ (MPa)	E_{cu} (MPa)	ϵ_u
A 120 días	MC-R	0,38211	0,01655	0,61101	0,95133	0,04263
	MC-FV-1	0,23323	0,01253	0,58272	0,95992	0,05322
	MC-FC-1	0,25182	0,01276	0,62141	1,27471	0,06821
	MC-FB-1	0,19671	0,01087	0,59262	0,94384	0,05154
	MC-FM-1	0,22892	0,01214	0,63033	1,20232	0,06656
Tras ensayo de heladicidad	MC-R	0,22834	0,01329	0,52034	0,51036	0,02718
	MC-FV-1	0,20862	0,01182	0,53246	0,62342	0,03353
	MC-FC-1	0,23831	0,01391	0,56348	0,80014	0,04394
	MC-FB-1	0,16523	0,01143	0,45455	0,46009	0,02862
	MC-FM-1	0,22956	0,01346	0,57614	0,74395	0,04079
Tras ensayo de cristalización de sales	MC-R	0,11964	0,00941	0,34319	0,34312	0,02418
	MC-FV-1	0,17776	0,02239	0,25406	0,28663	0,03105
	MC-FC-1	0,22368	0,01932	0,38533	0,61594	0,04784
	MC-FB-1	0,15842	0,02372	0,22041	0,24338	0,03022
	MC-FM-1	0,15511	0,01664	0,34492	0,43926	0,03723
Tras ensayo de choque térmico	MC-R	0,15136	0,00888	0,41885	0,51883	0,02811
	MC-FV-1	0,19712	0,01232	0,49412	0,52301	0,03083
	MC-FC-1	0,20504	0,01172	0,59171	0,78132	0,04136
	MC-FB-1	0,17126	0,01112	0,46497	0,46494	0,02905
	MC-FM-1	0,19952	0,01263	0,42783	0,68582	0,03864

Tabla 6.10. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento tras los ensayos de envejecimiento acelerado.

Analizando globalmente los resultados obtenidos por los morteros de cemento cuando se someten a ensayos de envejecimiento acelerado, se observa como la densidad de energía de deformación a compresión E_{cr} aumenta un 23%, 42%, 9% y 21% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente. Mientras que los valores de densidad de energía $E_{c1,1125}$ y E_{cu} son superiores en un 1% y 2% cuando se añaden fibras de vidrio, en un 21% y 62% cuando se añaden fibras de carbono y en un 4% y 35% cuando se añaden fibras mixtas, siendo inferiores en un 21% y 62% cuando se añaden fibras de basalto.

Independientemente del tipo de ensayo realizado, la densidad de energía de deformación a compresión de los morteros de cemento aumenta en mayor medida cuando la fibra adicionada es de carbono. Los valores de densidad E_{cu} , $E_{c1,1125}$ y E_{cu} son superiores en un 14%, 20% y 53% sobre la fibra de vidrio, en un 30%, 35% y 88% sobre la fibra de basalto y en un 14%, 14% y 18% sobre las mixtas.

Aunque la capacidad de absorción de energía de los morteros de cemento con fibras sea superior a la exhibida por el mortero de referencia, se produce una disminución de las deformaciones últimas en comparación con los morteros ensayados a 120 días. De media entre los ensayos de durabilidad, la ϵ_u es inferior en un 40%, 35%, 43% y 42% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente. La disminución es del 38% cuando se trata de morteros de referencia.

En la Figura 6.24 se muestra el diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica tras el ensayo de heladicidad. La densidad de energía hasta tensión de rotura mejora, de media, sobre un 133% con respecto al mortero de referencia. La densidad de energía $E_{c1,125}$ de los morteros con fibras es superior a la marcada por los morteros de referencia en un 79%, 94%, 68% y 85% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente, mientras que los valores de densidad de energía hasta deformaciones últimas son superiores en un 134%, 288%, 75% y 197%.

Los valores de deformación últimos de los morteros obtenidos tras los ciclos de hielo-deshielo son inferiores en un 44%, 47%, 27%, 46% y 31% cuando se comparan con el mortero de referencia y los adicionados con de fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, ensayados a 120 días.

Figura 6.24. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica tras el ensayo de heladicidad.

Cuando se somete al mortero de cal hidráulica a ciclos de cristalización de sales, Figura 6.25, el análisis de las curvas refleja, de media, un aumento de la densidad de energía de rotura en un 145% de los morteros con fibra con respecto a los morteros convencionales. La densidad de energía $E_{c1,125}$ aumenta un 31%, 14%, 17% y 37% sobre el mortero convencional cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas. Mientras que los valores de densidad de energía hasta deformación última aumentan en un 77%, 232%, 72% y 173% cuando se adicionan las fibras citadas.

Cuando se compara los resultados de deformación últimos de los morteros sometidos a ciclos de cristalización de sales con los obtenidos tras los ensayos a 120 días, estos son inferiores en un 79%, 57%, 77% y 15% para morteros con adición de fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente.

Figura 6.25. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica tras el ensayo de cristalización de sales.

En la Figura 6.26 se muestra el diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica tras el ensayo de choque térmico. La densidad de energía hasta tensión máxima mejora, de media, un 123% con respecto al mortero de referencia. Las densidades de energía de deformación $E_{c1,125}$ y E_{cu} de los morteros con fibras es superior a la marcada por los morteros de referencia en un 3% y 3% cuando las fibras son de vidrio, en un 45% y 177% cuando son de carbono y en un 17% y 70% si son mixtas. Mientras que los morteros con fibras de basalto presentan valores un 3% y 13% inferiores a la referencia.

Los valores de deformación últimos de los morteros obtenidos tras los ciclos térmicos son inferiores en un 25%, 70%, 27%, 61% y 45% cuando se comparan con los morteros de referencia y adicionados con fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, ensayados a 120 días.

Figura 6.26. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica tras el ensayo de choque térmico.

La Tabla 6.11 muestra los resultados del análisis de los diagramas de tensión deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica tras los distintos ensayos de envejecimiento acelerado.

Ensayo	Designación	E_{cr} (MPa)	ϵ_{max}	$E_{c1,125}$ (MPa)	E_{cu} (MPa)	ϵ_u
A 120 días	MCa-R	0,04712	0,01086	0,11165	0,21191	0,04483
	MCa-FV-1	0,12973	0,02085	0,18846	0,56966	0,09602
	MCa-FC-1	0,14244	0,02739	0,15253	0,53928	0,10184
	MCa-FB-1	0,09899	0,01812	0,16702	0,38932	0,07095
	MCa-FM-1	0,10125	0,01804	0,17837	0,49812	0,08756
Tras ensayo de heladicidad	MCa-R	0,04642	0,01383	0,11579	0,13580	0,03389
	MCa-FV-1	0,07991	0,01235	0,20755	0,31757	0,05082
	MCa-FC-1	0,14212	0,01996	0,22494	0,52616	0,07431
	MCa-FB-1	0,08113	0,01377	0,19492	0,23774	0,03831
	MCa-FM-1	0,12938	0,01871	0,21405	0,40282	0,06033
Tras ensayo de cristalización de sales	MCa-R	0,03083	0,00763	0,14696	0,17729	0,03675
	MCa-FV-1	0,05784	0,01104	0,19262	0,31404	0,05593
	MCa-FC-1	0,12608	0,02552	0,16761	0,58821	0,11496
	MCa-FB-1	0,04876	0,01069	0,17258	0,30566	0,05912
	MCa-FM-1	0,06954	0,01236	0,20142	0,48322	0,08792
Tras ensayo de choque térmico	MCa-R	0,06355	0,01204	0,18466	0,20668	0,03371
	MCa-FV-1	0,06736	0,01102	0,21309	0,19395	0,02937
	MCa-FC-1	0,18459	0,14964	0,26694	0,57145	0,07462
	MCa-FB-1	0,04694	0,00829	0,17989	0,17993	0,02743
	MCa-FM-1	0,09292	0,01312	0,21582	0,35052	0,04801

Tabla 6.11. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica tras los ensayos de envejecimiento acelerado.

Analizando globalmente los resultados obtenidos por los morteros de cal hidráulica cuando se someten a ensayos de durabilidad, se observa como la densidad de energía de deformación a compresión hasta rotura aumenta un 55%, 235%, 36% y 117% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente. Mientras que los valores de densidad de energía $E_{c1,125}$ y E_{cu} son superiores en un 38% y 71% cuando se añaden fibras de vidrio, en un 51% y 232% cuando se añaden fibras de carbono, en un 28% y 45% cuando se añaden fibras de basalto y en un 46% y 146% cuando se añaden fibras mixtas.

Independientemente del tipo de ensayo realizado, la densidad de energía de deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica aumenta en mayor medida cuando la fibra adicionada es de carbono. Los valores de densidad de energía E_{cr} , $E_{c1,125}$ y E_{cu} son superiores en un 121%, 12% y 100% sobre la fibra de vidrio, en un 156%, 21% y 133% sobre la fibra de basalto y en un 55%, 4% y 36% sobre las mixtas.

Aunque los valores de densidad de energía de deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica con fibras sean superiores a la exhibida por el mortero de

referencia, se produce una disminución de las deformaciones últimas en comparación con los morteros ensayados a 120 días. De media entre los ensayos de durabilidad, la ϵ_u es inferior en un 53%, 14%, 41% y 25% cuando se adicionan fibras de vidrio, carbono, basalto y mixtas, respectivamente. La disminución es del 22% cuando se trata de morteros de referencia. Tanto los morteros con fibras como los de referencia pierden capacidad de deformación cuando se les somete a ensayos de durabilidad, siendo más acusada en morteros con fibras de vidrio y carbono.

6.5 Recopilación de la discusión de resultados del capítulo

A continuación, se muestra la discusión de los resultados obtenidos tras la realización de los distintos ensayos descritos en el capítulo.

- La pérdida de masa tras el ensayo de heladicidad muestra una mayor degradación de los morteros de referencia en comparación con los morteros con fibras, independientemente del tipo de fibra y de conglomerante. Mientras que el choque térmico no tiene apenas influencia sobre los morteros, en lo relativo a la pérdida de masa.
- La cristalización de sales en el interior del mortero en el interior de mortero desvirtúa los resultados de pérdida de masa. Se produce un importante daño macroestructural con el paso de los ciclos con independencia del tipo de mortero ensayado.
- Los morteros con fibras, tanto los de cemento como los de cal hidráulica, tienen un mejor comportamiento frente a la heladicidad y al choque térmico que los morteros sin adicionar, mientras que la cristalización de sales les afecta más.
- La edad y el curado diferencial en agua al que fueron sometidas las probetas derivado de la realización de los ensayos, influyen en mayor medida sobre las resistencias mecánicas que los ciclos de durabilidad.
- Los morteros de cemento con adición de fibras presentan unas resistencias a flexión y compresión inferiores a la de los morteros de referencia tras la realización de los ensayos de durabilidad, independientemente del tipo de fibra.
- Los morteros de cal hidráulica con adición de fibras presentan unas resistencias a flexión y compresión superiores a la registrada por los morteros de convencionales tras la realización de los ensayos de envejecimiento acelerado, independientemente del tipo de fibra.
- La capacidad de absorción de energía a flexión de los morteros reforzados con fibras tras los ensayos de envejecimiento acelerado es superior a los

morteros de referencia, independientemente del tipo de ensayo, fibra y conglomerante, presentando los mejores resultados cuando se adicionan fibras de carbono.

- El descenso de la capacidad de deformación a flexión, tras los ensayos de envejecimiento acelerado, supone un aumento de la fragilidad de los morteros, tanto si su matriz es de cemento o de cal hidráulica. La ductilidad se reduce casi a la mitad en morteros de cemento y más de la mitad en morteros de cal hidráulica, siendo esta pérdida más acusada en morteros con fibras de vidrio y carbono.
- La capacidad de absorción de energía a compresión de los morteros de cemento reforzados con fibras tras los ensayos de envejecimiento es superior a los morteros de referencia a excepción de los morteros con fibras de basalto, siendo superior en todos los casos para morteros de cal hidráulica. Las fibras de carbono presentan los mejores resultados.
- La capacidad de deformación a compresión de los morteros con fibras tras los ensayos de durabilidad es ligeramente inferior al reportado por el mortero de referencia, tanto para morteros de cemento como de cal hidráulica. Este descenso de la capacidad de deformación es más acusado en morteros con fibras de vidrio y basalto.

7

MORTEROS COMO REFUERZO DE MUROS DE FÁBRICA DE LADRILLO

Las estructuras de fábrica de ladrillo constituyen actualmente una gran parte del total de los edificios construidos a nivel mundial. Además, el patrimonio histórico y artístico, así como los edificios residenciales en las zonas antiguas de las ciudades y zonas rurales están constituidos generalmente por muros de mampostería, presentando, a menudo, importantes problemas estructurales, tanto frente a acciones estáticas como sísmicas.

Los recientes terremotos registrados en el Sur de Europa (Lorca, 2011; Ban, 2011; Emilia, 2012; Amatrice, 2016) han puesto de manifiesto la alta vulnerabilidad de las estructuras de fábrica existentes, ya que estos edificios fueron diseñados y construidos sin tener en cuenta una posible acción sísmica. Las primeras directrices para construcciones sismorresistentes se publicaron en la década de los 70, citando algunos, España (1974) o Italia (1974).

En consecuencia, en las últimas décadas ha surgido un interés creciente en el desarrollo de técnicas eficientes de reforzar muros de fábrica. Como se ha desarrollado en el Capítulo 2 “Estado del conocimiento”, existen numerosas técnicas, entre las que destacan, la aplicación de laminados de FRP (vidrio y carbono), refuerzo exterior mediante placas o tubos de acero, empleo de tendones postensados, inyección de morteros de resina, el confinamiento de muros y el tratamiento de superficies mediante hormigones y morteros mejorados con mallas y fibras de acero.

Sin embargo, la aplicación de mortero de cemento sobre fábricas de antiguas supone una serie de incompatibilidades debido a su excesiva resistencia y rigidez, baja permeabilidad y la liberación de sales solubles [284]. La importancia de utilizar materiales compatibles con los antiguos es bien conocida [285] y tiene como objetivo mantener tanto como sea posible las propiedades (composición química, porosidad, gravedad específica aparente, características mecánicas y comportamiento elástico) antes y después de la intervención.

Los morteros a base de cal se han utilizado cada vez más para con el fin de lograr la compatibilidad requerida con los materiales antiguos. Por este motivo, en los últimos años han surgido varios artículos sobre las ventajas de los morteros a base de cal para su uso en restauración como alternativa a los morteros de cemento [286-288]. Sin embargo, estos morteros presentan baja resistencia a edades tempranas y un largo tiempo de endurecimiento.

En este contexto, tanto los morteros de cal hidráulica como los morteros mixtos (mezcla de cal aérea y cemento) pueden ser una alternativa interesante ya que son capaces de combinar las ventajas de los dos materiales: la cal aérea puede contribuir a la trabajabilidad de los morteros, retención de agua y permeabilidad, garantizando la compatibilidad con los morteros antiguos, mientras que el cemento puede contribuir aportando una resistencia considerable a edades tempranas y un tiempo de fraguado más rápido que facilite su aplicación.

Estudios recientes sobre morteros a base cal hidráulica han confirmado que permite reducir el riesgo de incompatibilidades con materiales antiguos [183,185]. No obstante, la cal hidráulica natural tiene una disponibilidad reducida en comparación con el cemento Portland en muchos países [284]. En este contexto, Silva et al. [289] concluyeron que los morteros mixtos de cal aérea y cemento presentan un alto potencial para sustituir a los morteros hidráulicos en obras de restauración. Sin embargo, el contenido de cemento debe ser mayor al 25% para que aumente las resistencias a edades tempranas e inferior al 50% para minimizar los riesgos de incompatibilidad.

En este capítulo se van a estudiar morteros de recubrimientos como refuerzo de fábrica de ladrillo de arcilla macizos y mortero de baja resistencia semejante a la que se podría encontrar en edificios antiguos. Se plantea un recubrimiento de 15 mm de espesor por ambas caras del muro, de mortero mixto con y sin fibras de vidrio. También se reforzaron muros con morteros de cemento con y sin fibras de a modo de comparación con las técnicas de “shotcreting” utilizadas en los últimos años.

Para valorar los resultados estructurales proporcionados por esta técnica de refuerzo, se llevó a cabo un programa experimental basado en ensayos de compresión diagonal de muros de fábrica realizados en los Laboratorio de la Vilnius Gediminas Technical University. El rendimiento de la fábrica reforzada se evaluó en términos de resistencia a corte -aplicando la formulación disponible en la literatura- y de capacidad de deformación.

Para la elaboración de los revestimientos de refuerzo se emplearon dos tipologías de mortero, de cemento y mixto, con adición de fibras de vidrio. También se estudiaron los mismos morteros sin adición para poder evaluar el efecto de las fibras. Se realizaron pruebas preliminares con el fin de encontrar la consistencia y trabajabilidad óptima para el uso del mortero como revestimiento, siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 4.2.

En la Tabla 7.1 se muestran las diferentes dosificaciones de los morteros.

Designación	Cemento (kg/m ³)	Cal (kg/m ³)	Arena (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	Cantidad de fibras		Consistencia (mm)
					(kg/m ³)	(%)	
MC-R	400		1800	342	0	0	180
MC-FV	400		1800	342	13,4	0,5	165
MM-R	200	250	1800	393	0	0	180
MM-FV	200	250	1800	393	13,4	0,5	160

Tabla 7.1. Dosificaciones de las mezclas utilizadas en el estudio.

7.1 Elaboración de los especímenes de ensayo

Con la finalidad de realizar una amplia campaña experimental, se realizaron muros a pequeña escala. Los muros ensayados están constituidos por siete hiladas de dos ladrillos cada una, tienen unas dimensiones de 560x520 mm y un espesor de muro de 120 mm. Las juntas horizontales y verticales tienen un espesor de 15mm.

En total, se ensayaron veinte muros de ladrillo de hoja única, divididos en cinco grupos como se describe en la Tabla 7.2. De cada grupo de cuatro, un espécimen (W1) fue ensayado a 7 días, mientras que los tres restantes (W2, W3 y W4) se ensayaron a 28 días.

Denominación	Nº de muros	Tipo	Descripción
W-REF	4	Sin reforzar	Muro de fábrica son revestir
W-RMC	4	Reforzado	Muro de fábrica reforzado con un revestimiento de 15 mm de mortero de cemento
W-RMCFV	4	Reforzado	Muro de fábrica reforzado con un revestimiento de 15 mm de mortero de cemento con 0,5% de fibras de vidrio
W-RMM	4	Reforzado	Muro de fábrica reforzado con un revestimiento de 15 mm de mortero mixto
W-RMMFV	4	Reforzado	Muro de fábrica reforzado con un revestimiento de 15 mm de mortero mixto con 0,5% de fibras de vidrio

Tabla 7.2. Resumen del programa experimental (muestra, Nº de muros, tipo, descripción).

7.1.1 Amasado

El protocolo de amasado fue el indicado en el apartado 4.2.3 basado en la norma UNE-EN 196-1 [226]. Debido a que la cantidad de mortero necesario superaba el máximo volumen de la amasadora normalizada (5 litros), se utilizó una mezcladora industrial BT-MX 1400 y un cubo como recipiente. En la Figura 7.1 se puede ver la mezcladora y el proceso de amasado.

Figura 7.1. Amasado de los morteros.

7.1.2 Fabricación de los muros

Los muros se elaboraron sobre tableros de madera a modo de durmientes encima de los cuales se colocaban dos maderos verticales nivelados que servían como guía. Se usaban dos listones que imitaban la junta y servían para asegurar que estas fueran del mismo tamaño y que la cantidad de mortero por junta era similar. Todas las hiladas de ladrillo eran niveladas y aplomadas (Figura 7.2).

Con anterioridad a la elaboración del muro, los ladrillos fueron sumergidos y luego escurridos hasta presentar el aspecto de saturación con superficie seca, con el objeto de evitar el empobrecimiento del mortero por la succión excesiva de los mismos

Figura 7.2. Proceso de elaboración de los muros.

7.1.3 Aplicación del revestimiento

El procedimiento de aplicación del revestimiento fue similar en todos los casos, independientemente de la composición de éste.

- Se rasparon las juntas para que todas tuvieran un grosor similar de 1 cm. Esto permite mejorar el efecto del refuerzo, evitando una rotura en la interfase fábrica-revestimiento.
- Se cepilló la superficie de los muros para eliminar las partículas sueltas de mortero, así como el polvo para mejorar adherencia del revestimiento.
- Se aplicó una capa de mortero (~ 15 mm) a cada lado del muro, manteniendo la superficie húmeda mediante la aplicación de agua pulverizada. El material se aplica en capas consecutivas de unos 5 o 6 mm cada una para evitar el desprendimiento del mortero.
- Finalmente, con el fin de mitigar las grietas de retracción, la superficie del revestimiento se mantuvo húmeda los primeros tres días después de la realización del ensayo. El resto de los días, hasta la fecha de ensayo, los muros se humedecían una vez al día.

En la Figura 7.3 se puede ver el proceso de aplicación del revestimiento.

Figura 7.3. Aplicación del revestimiento en los muros.

7.2 Ensayos preliminares sobre materiales

7.2.1 Ladrillos

Los ensayos sobre ladrillos se presentan en el apartado 3.10. La resistencia a la compresión se determinó de acuerdo con la norma UNE-EN 772-1. Los resultados proporcionaron una resistencia a la compresión media de 45 MPa. Se midió la absorción y succión de agua de los ladrillos, de acuerdo con UNE-EN 772-11, presentando estos unos valores de 20% y de 1,7 Kg/(m²·min), respectivamente.

7.2.2 Mortero

7.2.2.1 Resistencia a flexión y compresión

Para la determinación de la resistencia a flexión y compresión de los morteros se han seguido los procedimientos descritos en los apartados 4.4.3.1 y 4.4.3.3 respectivamente. Se ha utilizado un equipo Walter + bai ag modelo LFM 100 que permite controlar la carga por deformación (0,4 mm/min). Se muestra en la Figura 7.4.

Figura 7.4. Determinación de la resistencia a flexión y compresión.

Para cada dosificación de mortero se han ensayado seis probetas a 7 y 28 días. En la Tabla 7.3 aparecen los resultados de la resistencia a flexión y compresión de los diferentes morteros empleados.

Designación	Resistencia a flexión (MPa)		Resistencia a compresión (MPa)		Aumento con el transcurso de los días (%)	
	7 días	28 días	7 días	28 días	Flexión	Compresión
MC-R	2,2	2,6	8,5	13,4	18	58
MC-FV	2,4	3,2	8,6	14,4	33	67
MM-R	0,8	1,1	2,6	3,1	41	21
MM-FV	0,8	1,2	2,7	3,3	46	23

Tabla 7.3. Resistencia a flexión y compresión para los distintos morteros.

La incorporación de fibras de vidrio al mortero de cemento supone un aumento de la resistencia a flexión de un 9% y un 23% con respecto a los morteros de referencia cuando se ensayan a 7 y 28 días, respectivamente. Mientras que la resistencia a compresión aumenta un 1% y un 8% para dichos periodos.

Cuando las fibras se adicionan a los morteros mixtos los valores de resistencia a flexión y compresión aumentan un 3% y un 4%, cuando se ensayan a 7 días, y en un 6% y 6% cuando se ensayan a 28 días, con respecto a sus homólogos de referencia.

7.2.2.2 Energía de fractura

Para la caracterización de la respuesta mecánica post-fisuración del mortero, se determinó la energía de fractura adaptando el proceso experimental dispuesto en la RILEM 50-FMC [290]. Las curvas de carga-desplazamiento, obtenidas tras los ensayos de flexión, se utilizaron para obtener el parámetro de energía de fractura. Este procedimiento ha sido empleado por varios autores [291,292].

La energía de fractura se calcula con la siguiente ecuación (7.1):

$$G_f = \frac{W_f}{A} \quad (7.1)$$

Donde,

G_f Energía de fractura en N/mm

W_f Trabajo de fractura representado por el área bajo la curva en N·mm

A Sección de la probeta en mm²

Para cada dosificación de mortero se han ensayado seis probetas a 7 y 28 días. En la Tabla 7.4 aparecen los resultados de la energía de fractura de los diferentes morteros empleados.

Designación	Energía de fractura (N/m)		Aumento con el transcurso de los días (%)
	7 días	28 días	
MC-R	35,1	41,5	18
MC-FV	158,1	195,9	24
MM-R	9,5	13,3	40
MM-FV	31,2	47,2	51

Tabla 7.4. Resistencia a la adhesión de los distintos morteros.

La adición de fibras de vidrio a morteros de cemento supone un aumento de los valores de energía de fractura en un 391% y en un 372% cuando se ensayan a 7 y 28 días respectivamente. Mientras que su incorporación a morteros mixtos reporta valores un 228% y un 256% superiores a sus homólogos de referencia.

7.2.2.3 Resistencia a la adhesión

Para la determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros se ha seguido el procedimiento descrito en el apartado 5.3.9.1. Se ha utilizado un equipo Walter + bai ag modelo LFM 100. La velocidad de carga fue 10 N/s. Se fabricaron las probetas de ensayo en las mismas condiciones que los muros para que los resultados fueran lo más representativos posibles. En la Figura 7.5 se pueden observar la máquina de ensayo y las probetas.

Figura 7.5. Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros.

Para cada dosificación de mortero se han ensayado tres probetas a 7 y 28 días. En la Tabla 7.5 aparecen los resultados de la resistencia a la adhesión de los diferentes morteros empleados.

Designación	Resistencia a la adhesión (MPa)		Aumento con el transcurso de los días (%)
	7 días	28 días	
MC-R	0,87	1,09	26
MC-FV	1,23	1,51	22
MM-R	0,31	0,39	25
MM-FV	0,47	0,54	14

Tabla 7.5. Resistencia a la adhesión de los distintos morteros.

Las fibras de vidrio añadidas al mortero de cemento mejoran la resistencia a la adhesión en un 41% y un 38% con respecto a los morteros de referencia cuando se ensayan a 7 y 28 días, respectivamente. Mientras que si se adicionan a morteros mixtos aumenta su resistencia en un 52% y en un 38%.

7.2.3 Fábrica de ladrillo

7.2.3.1 Resistencia a compresión uniaxial y módulo de Young

La resistencia a compresión uniaxial y el módulo de Young se determinaron según lo establecido en la norma UNE-EN 1052-1 [293]. Se ensayaron probetas de fábrica de ladrillo de dimensiones 560x520x120 mm. Para la realización de los ensayos a compresión uniaxial se utilizó una maquina Walter+bai ag modelo PAC-V-10. Los muros se refrentaban mediante yeso de alta resistencia para asegurar que toda la superficie de la probeta estaba en contacto con la máquina, colocándose entre las células de carga (Figura 7.6).

La carga se aplicaba en tres etapas hasta alcanzar la mitad de la carga máxima probable. Tras cada etapa, la carga se mantenía constante durante 2 ± 1 min para determinar variaciones de altura. Después de realizar las medidas de la última etapa, se aumentaba a velocidad constante hasta rotura. La velocidad de carga entre las diferentes etapas se fijó en 700 N/s. Para determinar las deformaciones, se colocaron dos transductores lineales de desplazamiento variable (LVDT) en cada cara del muro, paralelos a la dirección de la carga.

Figura 7.6. Ensayo a compresión axial sobre probetas de 560x520x120 mm.

La resistencia a compresión uniaxial, F , de cada probeta se calcula por medio de la siguiente expresión (7.2):

$$f_{c,t} = \frac{F}{A} \quad (7.2)$$

El módulo de Young, $E_{m,f}$, de cada probeta se calcula por medio de la siguiente expresión (7.3):

$$E_{m,f} = \frac{F}{3 \cdot e_i \cdot A} \quad (7.3)$$

Donde,

- $f_{c,t}$ Resistencia a compresión uniaxial en MPa
- F Carga máxima aplicada a la probeta en N
- A Sección transversal de la probeta de albañilería en mm
- $E_{m,f}$ Módulo de Young en MPa
- e_i Deformación media de la probeta de fábrica al tercio de la resistencia máxima

Para determinar la influencia de la esbeltez, se ensayaron probetas formadas por tres ladrillos unidos por la tabla con mortero de espesor igual al empleado en los muros y con dimensiones de 250x225x120 mm. Para la realización del ensayo se utilizó una maquina Walter+bai ag modelo DV 2000 (Figura 7.7). La velocidad de carga se fijó a 1 kN/s. Las muestras se prepararon según lo indicado en el apartado 3.10.2.

Figura 7.7. Ensayo a compresión sobre fábricas de albañilería.

Se han ensayado tres probetas de cada tipo a 28 días. En la Tabla 7.6 aparecen los valores obtenidos, correspondientes a la media aritmética de los valores individuales.

Tipo de probeta	Resistencia a compresión uniaxial (MPa)
560x520x120 mm	10,7
250x225x120 mm	20,5

Tabla 7.6. Resistencia a la compresión uniaxial.

La influencia de la esbeltez en la resistencia a compresión queda patente tras la realización de los ensayos. Las probetas formadas por tres hiladas de ladrillo tienen una resistencia un 90% superior a las probetas de 560x520x120 mm. Por tanto, la esbeltez del muro es un parámetro fundamental para definir la resistencia a compresión de las fábricas.

El módulo de Young de la fábrica de albañilería es de 6700 MPa.

7.2.3.2 Resistencia al corte

La resistencia al corte uniaxial en el plano de juntas de las fábricas se evaluó de acuerdo con el procedimiento estándar UNE-EN 1052-3 [294]. Las probetas estaban formadas por tres ladrillos ligados mediante mortero. El procedimiento de ensayo consiste en aplicar carga (50 N/s) sobre la testa del ladrillo central, mientras las testas de los ladrillos laterales descansan sobre cilindros de apoyo (Figura. 7.8a).

Figura 7.8. a) Ensayo uniaxial a cortante. b) Fallo de probeta por pérdida de adherencia.

La resistencia al corte, f_{vko} , de cada probeta se calcula por medio de la siguiente expresión (7.4):

$$f_{vko} = \frac{F}{2 \cdot A} \quad (7.4)$$

Donde,

- f_{vko} Resistencia a compresión uniaxial en MPa
- F Carga máxima aplicada a la probeta en N
- A Sección transversal de la unidad en contacto con el mortero en mm

Se han ensayado tres probetas de cada tipo a 28 días. La resistencia uniaxial a cortante es igual a 0,23 MPa.

El fallo por cizallamiento se produjo a lo largo de las interfaces unidad-mortero (Figura. 7.8.b), con el mortero separado del ladrillo interior o exterior y sin daños en las

superficies del ladrillo. Tampoco el mortero mostraba ningún tipo de daño. En consecuencia, la resistencia al corte depende casi exclusivamente del comportamiento de fricción entre ambos materiales.

7.2.4 Resumen de resultados de los ensayos previos

En la Tabla 7.7 se presentan, a modo de resumen, los resultados de los ensayos sobre los materiales.

Material	Propiedad		Unidad	Valor medio
Ladrillos	Resistencia a compresión	$f_{c,b}$	MPa	45
	Absorción de agua	C	%	20
	Succión	$C_{w,i}$	Kg/(m ² ·min)	1,7
Mortero de juntas	Resistencia a compresión (7/21 días)	$f_{c,jm}$	MPa	4,3/5,2
	Resistencia a flexión (7/21 días)	$f_{t,jm}$	MPa	1,0/1,4
Mortero de recubrimiento	Resistencia a compresión MC	$f_{c,mc}$	MPa	8,5/13,4
	Resistencia a flexión MC	$f_{t,mc}$	MPa	2,2/2,6
	Energía de fractura MC	$G_{f,mc}$	N/m	41,5
	Resistencia a la adhesión MC	$f_{u,mc}$	MPa	1,09
	Resistencia a compresión MC-FV	$f_{c,mcfv}$	MPa	8,6/14,4
	Resistencia a flexión MC-FV	$f_{t,mcfv}$	MPa	2,4/3,2
	Energía de fractura MC-FV	$G_{f,mcfv}$	N/m	195,9
	Resistencia a la adhesión MC-FV	$f_{u,mcfv}$	MPa	1,51
	Resistencia a compresión MM	$f_{c,mm}$	MPa	2,6/3,1
	Resistencia a flexión MM	$f_{t,mm}$	MPa	0,8/1,1
	Energía de fractura MM	$G_{f,mm}$	N/m	13,3
	Resistencia a la adhesión MM	$f_{u,mm}$	MPa	0,39
	Resistencia a compresión MMFV	$f_{c,mmfv}$	MPa	2,7/3,3
	Resistencia a flexión MMFV	$f_{t,mmfv}$	MPa	0,8/1,2
	Energía de fractura MMFV	$G_{f,mmfv}$	N/m	47,2
	Resistencia a la adhesión MMFV	$f_{u,mmfv}$	MPa	0,54
Albañilería	Resistencia a compresión uniaxial	$f_{c,f}$	MPa	20,5
	Resistencia a compresión uniaxial	$f_{c,f}$	MPa	10,8
	Módulo de Young	$E_{m,f}$	MPa	6700
	Resistencia al corte	f_{vko}	MPa	0,23

Tabla 7.7. Resumen de los resultados de las pruebas de caracterización realizadas sobre los materiales empleados.

7.3 Condiciones del ensayo

Para la realización de los ensayos a compresión diagonal se utilizó una máquina Walter+bai ag modelo PAC-V-10. Los muros se colocaban entre las células de carga de la máquina, asegurando la colocación centrada y aplomada del panel mediante dos zapatas metálicas fabricadas para este fin (Figura 7.9). Estaban dispuestas en las dos esquinas de la diagonal coincidiendo con la dirección de la carga, una zapata sobre el bastidor metálico y la otra interpuesta entre la esquina superior del panel y la célula de carga. Los dispositivos metálicos tenían la función de distribuir la carga sobre una superficie mayor evitando la concentración de esfuerzos de compresión y, consecuentemente, fallas locales en las esquinas. La aplicación de la carga fue uniforme y se realizó mediante control por desplazamiento para describir todo el proceso de carga. La velocidad de desplazamiento se fijó en 0,005 mm/s hasta la rotura.

Figura 7.9. Zapata metálica.

Con el objeto de determinar la deformación de los muros, se registraron los valores de carga aplicada y los desplazamientos diagonales. Para ello se colocaron dos transductores lineales de desplazamiento variable (LVDT), con recorrido de ± 25 mm, en ambas caras laterales a lo largo de las direcciones de las dos diagonales (Figura 7.10). Se calibraban cada vez que se modificaba su instalación.

Figura 7.10. Posición de los captadores respecto al muro de fábrica.

7.4 Interpretación del ensayo de compresión diagonal

El ensayo de compresión diagonal fue diseñado para evaluar la resistencia a cortante y el módulo de elasticidad transversal de las fábricas. Las especificaciones del ensayo vienen dispuestas en la norma ASTM E519-2010 [295] y el documento RILEM LUMB6 [296]. Aparecen algunas diferencias tanto en la evaluación de las propiedades mecánicas de la prueba experimental como en la interpretación de resultados. De hecho, el documento RILEM proporciona información solamente sobre la resistencia a la tracción diagonal (σ_t), mientras que el estándar ASTM también da indicaciones sobre la evaluación del módulo de elasticidad transversal, G . La principal diferencia es la definición del campo de tensión dentro del panel, cuando éste es sometido a carga diagonal.

De acuerdo con estas normas, la resistencia al corte de una fábrica debe determinarse cargando un panel cuadrado en compresión a lo largo de la diagonal hasta la rotura. El fallo suele ocurrir con la división de la muestra separada en paralelo a la dirección de la carga. Las grietas se desarrollan a lo largo de las juntas de mortero y, en algunos casos, a través de los bloques.

De acuerdo con la norma ASTM, se supone que el estado de tensión en el centro del panel es de cortante puro y las direcciones principales coinciden con las dos diagonales de los paneles. Este estado de estrés está representado adecuadamente por el círculo de Mohr mostrado en la Figura. 7.11 a.

En estas condiciones la tensión de corte (τ_0), es igual a la tracción principal (σ_t) y se determinó usando la siguiente ecuación (7.5):

$$\tau_0 = \sigma_t = \frac{0.707 P_{ult}}{A_n} \quad (7.5)$$

En la que P_{ult} es la carga máxima que soporta en muro y A_n es la sección transversal neta del muro, determinada como la media de la anchura y altura de la muestra multiplicada por su espesor.

En el análisis experimental también se evaluó la deformación angular γ (7.6):

$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g} \quad (7.6)$$

Donde,

- ΔV acortamiento diagonal en mm²
- ΔH extensión diagonal en mm²
- g longitud de medida en mm²

El documento RILEM realiza una interpretación diferente de los resultados, considerando el muro de fábrica como si fuera un material isotrópico y homogéneo y

ejecutando un análisis elástico lineal: el estado de tensión en el centro del muro no es un estado de cizallamiento puro, sin embargo, las direcciones principales todavía coinciden con las dos diagonales de los paneles. El círculo Mohr relativo a este estado tensional se representa en la Figura. 7.11b.

Figura 7.11. Interpretación del ensayo de compresión diagonal por la representación del círculo de Mohr de acuerdo con: a) la norma ASTM. B) el documento RILEM.

Esta interpretación da los valores del estado de estrés principal localizado en el centro del panel como (7.7 y 7.8):

$$\sigma_I = 0.5 \frac{P}{A_n} ; \quad \sigma_{II} = -1.62 \frac{P}{A_n} \quad (7.7) ; (7.8)$$

Según esta interpretación, es posible evaluar la resistencia a la tracción (σ_t) de la fábrica mediante la siguiente ecuación (7.9):

$$\tau_0 = \sigma_t = \frac{0.5 P_{ult}}{A_n} \quad (7.9)$$

Mientras que usando la formulación de Turnšek y Cacovic [125], la resistencia al corte (τ_0) de una prueba de compresión diagonal viene dada por (7.10):

$$\tau_0 = \frac{\sigma_t}{1.5} = \frac{P_{ult}}{3A_n} \quad (7.10)$$

7.5 Resultados

La investigación experimental se llevó a cabo sobre muros de ladrillos macizos revestidos con diferentes tipologías de morteros sometidos a ensayos de compresión diagonal. Los resultados obtenidos tras las pruebas se analizaron utilizando las diferentes interpretaciones proporcionadas en la literatura (apartado 7.8.3), mostrando diferencias sustanciales entre los valores obtenidos.

En la Figura 7.12 se pueden ver los diagramas de carga desplazamiento de los muros ensayados a 7 días. La resistencia a cortante de los muros reforzados es

superior a los muros sin revestir en un 63% si el revestimiento es de morteros de cemento sin fibras y en un 86% si lleva fibras. Mientras que, si los muros son revestidos con mortero mixto, el aumento de la resistencia a cortante es superior en un 17% cuando no lleva fibras y en un 24% cuando las lleva. Por tanto, los muros revestidos con morteros con fibras presentan una resistencia a cortante superior a la mostrada por sus homólogos de referencia, en un 14% cuando se trata de morteros de cemento y en un 6% cuando son mixtos.

Figura 7.12. Diagramas de carga desplazamiento de los muros ensayados a 7 días: a) hasta carga máxima, b) hasta carga última.

Los valores de deformación angular máxima muestran un comportamiento similar, presentando los muros revestidos mayor capacidad de deformación sobre los muros sin revestir. No obstante, son los morteros mixtos los que presentan una capacidad de deformación superior a la exhibida por los morteros de cemento.

La deformación angular de los muros reforzados, a 7 días, es superior a los muros sin revestir en un 18% si el revestimiento es de morteros de cemento sin fibras y en un 87% si lleva fibras. Mientras que, si los muros son revestidos con mortero mixto, el aumento de la deformación angular es superior en un 41% cuando no lleva fibras y en un 92% cuando las lleva. Los muros reforzados con morteros con fibras muestran deformaciones angulares máximas superiores a la de sus homólogos de referencia, en un 59% cuando se trata de morteros de cemento y en un 36% cuando son mixtos.

A continuación, se presentan los diagramas de carga desplazamiento de todos los muros de fábrica ensayados a 28 días (Figuras 7.13, 7.14, 7.15, 7.16 y 7.17). Los valores de resistencia al corte de los muros presentan una desviación estándar del 7% cuando están sin revestir, del 7% cuando están revestidos con morteros de cemento sin fibras y del 6% cuando estos contienen fibras de vidrio. Mientras que la desviación estándar es del 2% cuando los revestimientos son de mortero mixto sin fibras y del 6% cuando estos llevan fibras. La escasa dispersión de los resultados en un material tan heterogéneo como las fábricas de ladrillo, indica un alto grado de homogenización en el proceso de elaboración de los muros.

Figura 7.13. Diagramas de carga-desplazamiento de los muros de referencia ensayados a 28 días: a) hasta carga máxima, b) hasta carga última.

Figura 7.14. Diagramas de carga-desplazamiento de los muros con revestimiento de morteros de cemento ensayados a 28 días: a) hasta carga máxima. b) hasta carga última.

Figura 7.15. Diagramas de carga-desplazamiento de los muros con revestimiento de morteros de cemento con fibras de vidrio ensayados a 28 días: a) hasta carga máxima, b) hasta carga última.

Figura 7.16. Diagramas de carga-desplazamiento de los muros con revestimiento de mortero mixto ensayados a 28 días: a) hasta carga máxima, b) hasta carga última.

Figura 7.17. Diagramas de carga-desplazamiento de los muros con revestimiento de mortero mixto con fibras de vidrio ensayados a 28 días: a) hasta carga máxima, b) hasta carga última.

Para los muros ensayados a 28 días, de media, la resistencia al corte es superior en un 133% y 163% cuando los revestimientos son de mortero de cemento sin adicionar y con fibras, respectivamente, mientras que si se trata de morteros mixtos es superior en un 111% y 159%. Los muros reforzados con morteros con fibras presentan unas resistencias superiores a sus homólogos de referencia en un 13% cuando se trata de morteros de cemento y en un 23% cuando son mixtos.

Por su parte, la deformación angular es, de media, superior en un 101% y 137% cuando los revestimientos son de mortero de cemento sin fibras y adicionados, respectivamente. Mientras que, si se trata de morteros mixtos la resistencia al corte es superior en un 171% y 218%. Los muros revestidos con morteros con fibras presentan deformaciones angulares máximas superiores a sus homólogos de referencia en un 18% cuando se trata de morteros de cemento y en un 17% cuando son mixtos.

En la Figura 7.18 se muestran los diagramas de carga desplazamiento del mejor muro de cada tipología.

Figura 7.18. Diagramas de carga desplazamiento de los mejores muros ensayados a 28 días:
a) hasta carga máxima, b) hasta carga última.

Cotejando los resultados obtenidos, a 7 y 28 días, se observa una evolución superior de los valores de resistencia a cortante y de deformación angular máxima en los morteros mixtos en comparación con los morteros de cemento, debido a que estos últimos son de alta resistencia inicial. Mientras que la evolución de estos valores en muros sin revestir es inferior a la sufrida por los muros reforzados, situándose por debajo del 10%.

Comparando los diagramas de carga-desplazamiento hasta carga última, se observa como los muros reforzados mediante morteros con fibras resisten cargas durante un periodo más prolongado, soportando mayores deformaciones que sus homólogos de referencia. Esto es debido a que las fibras actúan de puente entre las dos partes fisurada de la matriz retrasando la propagación de fisuras (Figura 7.19.a). Este efecto de cosido, además de aumentar la resistencia al corte evita desprendimientos en el recubrimiento mejorando la seguridad de uso de las edificaciones, como se muestra en la Figura 7.19.b.

Figura 7.19. a) Efecto de cosido de las fibras. b) W3-RMMFV fisurado y sin desprendimientos.

En la Tabla 7.8 se muestran los resultados del análisis de los diagramas.

Denominación	Carga máxima (N)	Desplazamiento (mm)		Resistencia al corte (MPa)			Deformación angular (mm)	Modo de fallo
		Horizontal	Vertical	(7.5)	(7.9)	(7.10)		
W1-REF	48950	0,084	-0,202	0,534	0,378	0,249	0,0029	ND
W1-RMC	101550	0,053	-0,115	0,871	0,616	0,406	0,0034	D
W1-RMCFV	114280	0,078	-0,190	0,993	0,702	0,463	0,0054	D
W1-RMM	71550	0,053	-0,148	0,625	0,442	0,292	0,0040	D
W1-RMMFV	76800	0,236	-0,181	0,664	0,470	0,310	0,0083	D
W2-REF	50970	0,054	-0,111	0,556	0,393	0,260	0,0033	ND
W3-REF	57870	0,054	-0,143	0,631	0,447	0,295	0,0040	ND
W4-REF	52240	0,021	-0,080	0,561	0,396	0,262	0,0020	ND
Media	53690	0,043	-0,112	0,583	0,412	0,272	0,0031	
W2-RMC	144970	0,171	-0,274	1,254	0,887	0,585	0,0089	D
W3-RMC	160920	0,032	-0,142	1,394	0,986	0,651	0,0035	D
W4-RMC	163940	0,085	-0,228	1,427	1,009	0,666	0,0063	D
Media	156610	0,096	-0,215	1,358	0,961	0,634	0,0062	
W2-RMCFV	177740	0,107	-0,321	1,537	1,087	0,717	0,0084	D
W3-RMCFV	186230	0,140	-0,249	1,611	1,139	0,752	0,0078	D
W4-RMCFV	166500	0,075	-0,215	1,447	1,023	0,675	0,0058	D
Media	176820	0,105	-0,262	1,531	1,083	0,715	0,0073	
W2-RMM	142380	0,059	-0,157	1,243	0,879	0,580	0,0043	D
W3-RMM	143360	0,082	-0,213	1,246	0,881	0,581	0,0059	D
W4-RMM	138000	0,103	-0,642	1,193	0,844	0,557	0,0149	D
Media	141250	0,082	-0,337	1,227	0,868	0,573	0,0084	
W2-RMMFV	171300	0,072	-0,223	1,481	1,048	0,691	0,0059	D
W3-RMMFV	165320	0,144	-0,243	1,436	1,016	0,670	0,0078	D
W4-RMMFV	186200	0,131	-0,662	1,610	1,139	0,752	0,0159	D
Media	174270	0,115	-0,376	1,509	1,067	0,705	0,0098	

Tabla 7.8. Resultados de los ensayos de compresión diagonal.

Cabe destacar que, para los muros sin revestir ensayados el valor de resistencia al corte empleando la formulación planteada por Turnšek y Cacovic, es el más próximo al calculado mediante el ensayo de trillizos y a los tabulados en el Eurocódigo 6, donde se estiman los valores de resistencia al corte (f_{vko}) en función del tipo de mortero y de la fábrica. Resultados similares fueron publicados por Alecci et al [297].

Los muros de fábrica de ladrillo sometidos a ensayo mostraron dos tipos distintos de rotura: grietas desarrolladas a lo largo de la dirección de la carga (denominado con “D”) (Figura. 7.20) y grietas desarrolladas a lo largo de una dirección no diagonal (denominado con “ND”) (Figura. 7.21). En este último caso, el fallo se produce debido

a que la carga excede la resistencia a tracción (adherencia) del mortero utilizado para realizar las juntas. Sin embargo, no se puede excluir que la distribución de tensiones antes del fallo corresponda al modelo descrito en el apartado 7.8.3.

Figura 7.20. Ensayo a compresión diagonal. Modo de fallo: D.

Figura 7.21. Ensayo a compresión diagonal. Modo de fallo: ND.

Se puede observar que el modo de fallo “ND” ha ocurrido exclusivamente en los muros de fábrica sin revestir (W-R). Este tipo de rotura muestra el comportamiento frágil de la fábrica, produciéndose una rotura brusca cuando se alcanza la resistencia máxima. Los valores máximos de carga registrados para este grupo de muros son significativamente inferiores a los registrados en muros revestidos, siendo también inferiores los valores de resistencia al corte.

Los resultados experimentales obtenidos demuestran que los valores de resistencia al corte de la fábrica dependen del tipo de revestimiento. El valor de la resistencia al corte de la albañilería revestida con mortero de cemento es superior a la revestida con mortero mixto, mientras que los valores obtenidos en los muros revestidos con morteros con fibras son superiores a sus homólogos sin fibras.

7.6 Recopilación de la discusión de resultados del capítulo

A continuación, se muestra la discusión de los resultados obtenidos tras la realización de los distintos ensayos descritos en el capítulo.

- La escasa dispersión de resultados, inferior al 7%, en un material tan heterogéneo como las fábricas de ladrillo, indica un alto grado de homogenización en el proceso de elaboración de los muros.
- Los valores de carga máxima, resistencia al corte y capacidad de deformación de los muros sin revestir son significativamente inferiores a los registrados en muros revestidos.
- La resistencia al corte de los muros de fábrica revestidos con mortero de cemento es superior a los revestidos con mortero mixto, mientras que las fábricas revestidas con morteros con fibras son superiores a sus homólogos sin fibras.
- La capacidad de deformación angular máxima de las fábricas revestidas con mortero mixto es superior a las registradas por los muros de fábrica revestidos con mortero de cemento. Igualmente, la capacidad de deformación de los muros revestidos con morteros con fibras es superior a la de sus homólogos sin fibras.
- La incorporación de fibras a los morteros de recubrimiento mejora la resistencia al corte en un 13% cuando se incorporan a los de cemento y en un 23% en los mixtos. Mientras que mejoran la capacidad de deformación máxima en un 18% y en un 17% para los morteros mencionados anteriormente.
- El revestimiento de mortero mixto con fibras resulta más efectivo que los morteros de cemento y casi tan efectivos que los morteros de cemento con fibras en términos de resistencia al corte, presentando mejores resultados que ambos en cuanto a capacidad de deformación.
- Los muros reforzados mediante recubrimientos de morteros muestran un comportamiento similar hasta la rotura, independientemente de la tipología de mortero empleado. No obstante, el comportamiento post-fisuración es de dispar, incluso entre muros con el mismo tipo de refuerzo, debido a la heterogeneidad de las fábricas de ladrillo.
- Para muros sin reforzar, el valor de la resistencia al corte calculado por el criterio de Turnšek y Cacovic es el más próximo al calculado mediante el ensayo de trillizos y a los tabulados en el Eurocódigo 6 para muros sin revestir.
- Las fábricas reforzadas con morteros con fibras resisten cargas durante un periodo de tiempo más prolongado debido a que las fibras retrasan la propagación de fisuras. Este comportamiento además de aumentar la capacidad de deformación de la fábrica retrasa los desprendimientos del recubrimiento mejorando la seguridad de uso de las edificaciones.

- Los muros de fábrica de ladrillo reforzados presentaron una rotura a lo largo de la dirección de la carga, mientras que en los muros sin revestir la rotura no seguía la dirección diagonal, presentando un fallo por pérdida de adherencia y un tipo de rotura frágil.

8

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

8.1 Conclusiones

Una vez efectuado el análisis e interpretación de los resultados obtenidos del trabajo experimental desarrollado en esta Tesis Doctoral, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

De la caracterización de los morteros,

- Las propiedades físicas de los morteros se ven modificadas por la adición de fibras en su matriz, independientemente del tipo de conglomerante y de fibra. El aumento progresivo de la cantidad de fibras añadidas implica un descenso de la consistencia, lo que repercute en la trabajabilidad de las mezclas. Se confirma la relación existente entre el contenido de aire ocluido y la densidad aparente en estado fresco, mientras que no se ha encontrado relación directa entre el aumento de aire ocluido y la absorción de agua por capilaridad.
- El mortero de cemento sufre una pérdida progresiva de resistencias mecánicas según aumenta en contenido de fibras, independientemente de la naturaleza de éstas, hasta llegar al 1,33% donde se producen las mayores mermas de resistencia. Por el contrario, los morteros de cal hidráulica experimentan un incremento de resistencias según se aumenta la cantidad de fibras hasta un 1%, obteniendo valores similares para adiciones del 1,33%.
- La capacidad de absorción de energía de los morteros, tanto a flexión como a compresión, aumenta considerablemente con la adición de fibras. Independientemente del tipo de conglomerante y de la naturaleza de la fibra empleada, los morteros con una cantidad de fibras del 1% obtienen los valores máximos, presentando las mezclas con 1,33% valores más cercanos al 0,66%. Por tanto, para una misma dosificación existe un porcentaje máximo de fibras a partir del cual la capacidad de absorción de energía del material no mejora.
- Los morteros con fibras de carbono son los que tienen una mayor capacidad de absorción de energía y de deformación, independientemente del tipo de conglomerante y del porcentaje de fibra.

De la caracterización de los morteros con mejores propiedades mecánicas,

- Las características mecánicas de los morteros varían en función de la geometría de la probeta ensayada, encontrándose las siguientes relaciones:
 - A menor tamaño de la probeta ensayada mayor capacidad de resistir cargas mecánicas.

- Las probetas con una mayor relación ancho-canto presentan una mayor capacidad de absorción de energía a flexión superiores y una menor rigidez.
 - A menor tamaño de la probeta mayor será su capacidad de absorción de energía a compresión, presentando, las probetas con mayor esbeltez, respuestas menos dúctiles.
- Los morteros con fibras presentan una capacidad de absorción de energía superior a los morteros de referencia, independientemente de la tipología de probeta utilizada. Estos morteros son entre cuatro y siete veces más dúctiles que sus homólogos de referencia, siendo la adición de fibras de carbono la que arroja los mejores resultados.
- Los morteros ensayados en las probetas designadas por la normativa presentan valores de absorción de energía a flexión inferiores a los ensayados en las otras tipologías planteadas. Mientras que los valores de absorción de energía a compresión son superiores si se ensaya en la probeta estandarizada.
- Los ensayos de resistencia a impacto y tracción indirecta ponen de manifiesto el aumento de la capacidad de absorción de energía de los morteros con fibras, independientemente del tipo de conglomerante y fibra empleada, siendo los morteros con fibra de carbono los que presentan mejores resultados.
- Los morteros con adición de fibras tienen un comportamiento frente a la retracción similar, presentando una estabilidad dimensional superior a sus homólogos de referencia, independientemente del tipo de fibra adicionada y del conglomerante utilizado. Mientras que las fibras no influyen de manera significativa en la resistencia a la adhesión de los morteros.
- Según se desprende de la observación realizada mediante microscopia, las fibras no rompen por el esfuerzo de tracción, sino que deslizan por pérdida de adherencia o “pull-out”. También se constata la buena adhesión existente entre la matriz y las fibras, sin separación de fases evidente. Ambos fenómenos están relacionados con el aumento de la ductilidad de este tipo de morteros.

Del estudio de la durabilidad de los morteros,

- Los morteros con adición de fibras muestran un buen comportamiento cuando se les somete a ensayos de envejecimiento acelerado, demostrando su viabilidad a largo plazo.
- La capacidad de absorción de energía a flexión y compresión de los morteros adicionados es superior a los de referencia tras la realización de los ensayos de envejecimiento acelerado, independientemente del tipo de

fibra y matriz. No obstante, se produce un descenso de la capacidad de deformación con el paso de los ciclos, lo que supone una fragilización de estos materiales.

De los morteros como refuerzo de muros de fábrica de ladrillo,

- El refuerzo de muros de fábrica mediante recubrimientos de morteros con fibras de vidrio resulta eficaz, debido a que mejoran la resistencia al corte, aumentan la capacidad de deformación y evitan la rotura frágil del muro impidiendo que se desprendan fragmentos.
- Los morteros mixtos con fibras pueden suponer una alternativa para reforzar fábricas antiguas ya que presentan unos resultados similares a los morteros de cemento con fibras y son más compatibles tanto física como mecánicamente.

8.2 Futuras líneas de investigación

A continuación, se proponen una serie de posibles líneas de investigación que no se han podido abordar con suficiente profundidad en esta tesis doctoral:

- Completar el estudio mediante la caracterización completa de todas las mezclas planteadas inicialmente.
- Estudiar distintas longitudes y combinaciones de fibras (fibras híbridas) e investigar distintos métodos de dispersión que permitan adicionar cantidades superiores de fibras.
- Ampliar la campaña experimental sobre la microestructura mediante ensayos de porosimetría por intrusión de mercurio y de tomografía axial computarizada. Asimismo, realizar ensayos de niebla salina, agua salina y comportamiento frente al dióxido de azufre, relativos a la durabilidad del material.
- Completar la investigación iniciada en la Vilnius Gediminas Technical University, ampliando la tipología de morteros estudiados. Sería de gran interés estudiar el comportamiento resistente de muros de fábrica, a escala real, reforzados mediante recubrimientos de mortero con fibras.
- Ejecución de un proyecto piloto donde puedan aplicarse in situ los diferentes morteros comprobando si las condiciones de amasado, puesta en obra y respuesta a largo plazo son adecuadas.

9

CONCLUSIONS AND FUTURE LINES OF RESEARCH

9.1 Conclusions

The analysis and interpretation of the results obtained in the experiments conducted in this doctoral dissertation have led us to the following conclusions:

The characterisation of mortars,

- The physical properties of mortars are altered by the addition of fibres to their matrix, irrespective of the type of conglomerant and fibre. The gradual increase in fibre content reduces the consistency of the mortar, which in turn affects the workability of the mixes. While the relationship between the content of air trapped in the mortar and apparent density when fresh has been confirmed, no direct relationship has been found to exist between the increase in trapped air and capillary water absorption.
- The cement mortar gradually loses mechanical resistance as its fibre content increases, irrespective of the nature of the fibre, until it reaches 1.33%, where the largest losses of resistance occur. On the other hand, the resistance of hydraulic lime mortars increases by up to 1% as their fibre content increases, reaching similar values for additions of 1.33%.
- The flexural and compression energy absorption capacity of mortars increases significantly when they are reinforced with fibres. Irrespective of the type of binder and of the nature of the fibre used, mortars with 1% fibre content score the highest, with mixes of 1.33% achieving scores closer to 0.66%. Therefore, for the same dose there is a maximum fibre content above which there is no improvement in the energy absorption capacity.
- Mortars that contain carbon fibres have greater energy absorption capacity and deformation capacity, irrespective of the type of binder and fibre content.

The characterisation of mortars with better mechanical properties,

- The mechanical characteristics of mortars vary depending on the geometry of the cylinder tested, as follows:
 - The smaller the cylinder tested, the greater its capacity to resist mechanical loads.
 - Cylinders with a higher width-edge length ratio have greater flexural energy absorption capacity and less rigidity.
 - The smaller the cylinder the greater its compression energy absorption capacity, with the most svelte cylinders responding in a less ductile manner.
- Fibre-reinforced mortars have an energy absorption capacity greater than the reference mortars (i.e. without fibres), irrespective of the type of cylinder used. These mortars are between four and six times more ductile than their

reference counterparts, with the addition of carbon fibres producing the best results.

- The mortars tested on the cylinders stipulated in regulations have lower flexural energy absorption values than those tested in other types used. Meanwhile, compression energy absorption values are greater when tested in the standardised cylinder.
- Impact and indirect traction resistance tests reveal the increase in the energy absorption capacity of fibre-reinforced mortars, irrespective of the type of binder and fibre used, with mortars that contain carbon fibres producing the best results.
- Fibre-reinforced mortars respond to retraction in a similar manner, with greater dimensional stability than their reference counterparts irrespective of the type of fibre added and the binder used. Meanwhile, fibres do not have a significant effect on mortars' adhesion-resistance.
- According to the observations made under a scanning electron microscope (SEM), fibres do not tear as a result of tensile stress but rather slide out as a result of the loss of adhesion ("pull-out"). Good adhesion has also been found to exist between the matrix and the fibres, with no evident separation of phases. Both phenomena are associated with the increase in the ductility of this type of mortars.

The study of the durability of mortars,

- Fibre-reinforced mortars respond well when subjected to accelerated ageing tests, demonstrating their viability in the long-term.
- The flexural and compression energy absorption capacity of reinforced mortars is superior to the reference ones following the accelerated ageing tests, irrespective of the type of fibre and matrix. However, there is a decline in its deformation capacity with each cycle, with the result that these materials become more brittle.

Mortars as reinforcement for brick masonry walls,

- The reinforcement of masonry walls using coating of glass fibre-reinforced mortars is effective, due to the fact that these mortars improve shear strength, increase deformation capacity and prevent the fragile break of the wall, thus preventing fragments from coming loose.
- Mixt mortars with fibres are one possible alternative to reinforce old masonries, as they present similar results to those of fibre-reinforced cement mortars and are more compatible, both physically and in mechanical terms.

9.2 Future lines of research

Below is a series of possible lines of research that have not been possible to address in sufficient depth in this doctoral dissertation:

- Complete the research via the complete characterisation of all the mixes initially proposed.
- Analyse different lengths and combinations of fibres (hybrid fibres) and investigate different dispersion methods that allow larger amounts of fibres to be added.
- Extend the series of experiments on the microstructure via mercury intrusion porosimetry tests and computerised axial tomography tests. In addition, conduct salt spray tests, salt water tests and tests to determine the behaviour in the event of exposure to sulphur dioxide (durability tests).
- Complete the research that began at Vilnius Gediminas Technical University, broadening the type of mortars studied. It would be of great interest to analyse the resistance of full-scale masonry walls, reinforced using coatings of fibre-reinforced mortars.
- The execution of a pilot project in which the various mortars can be applied in situ, testing whether the kneading conditions, its implementation and its long-term behaviour are adequate.

10

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hedo, E. B. (2012). Directiva 2012/27/UE del Parlamento europeo y del consejo de 25 de octubre de 2012 relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE, y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE (DO L 315 de 14 noviembre de 2012). *Actualidad Jurídica Ambiental*, (19), 30-32.
- [2] Ine.es. Instituto Nacional de Estadística. [Online]. Disponible en: <http://www.ine.es/> [Visitado 16 Feb. 2017].
- [3] De España, G. (1985). Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español. *Boletín Oficial del Estado*, 29, 20342-20352.
- [4] De Venecia, C. (1964). Carta Internacional sobre la Conservación y la Restauración de Monumentos y Sitios. In *II Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos*.
- [5] Ashurst, J. (1990). Mortars for stone buildings. In *Conservation of building and decorative Stone*. Butterworth-Heinemann. Reed Book Services Ltd, pp. 78-96.
- [6] Barberà, X. M. (2008). Estudio y caracterización de morteros compuestos, para su aplicación en intervenciones de sellados, reposiciones y réplicas, de elementos pétreos escultórico-ornamentales (Doctoral dissertation).
- [7] Bustos-Garcia, A., Cobo-Escamilla, A., Gonzalez-Yunta, F., Moreno-Fernandez, E. (2018). Influence of fibers addition on properties of hydraulic lime based mortars. *DYNA*, 94(2). 228-232.
- [8] Aguilar, A. S. (2005). Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid).
- [9] Arizzi, A., Viles, H., & Cultrone, G. (2012). Experimental testing of the durability of lime-based mortars used for rendering historic buildings. *Construction and Building Materials*, 28(1), 807-818.
- [10] Malinowski, R. (1982). Ancient mortars and concretes: Aspects of their durability. *History of Technology London*, 7, 89-100.
- [11] Reller, A., Wilde, P. M., Wiedemann, H. G., Hauptmann, H., & Bonani, G. (1992). Comparative studies of ancient mortars from Giza, Egypt, and Nevalı Çori, Turkey. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 267.
- [12] Frierman, J. D. (1971). Lime burning as the precursor of fired ceramics. *Israel Exploration Journal*, 212-216.
- [13] Gourdin, W. H., & Kingery, W. D. (1975). The beginnings of pyrotechnology: Neolithic and Egyptian lime plaster. *Journal of Field Archaeology*, 2(1-2), 133-150.
- [14] Furlan, V., & Bissegger, P. (1975). Les mortiers anciens. *Histoire et essais d'analyse scientifique*. na.
- [15] Martinet, G., Deloye, F. X., & Golvin, J. C. (1992). Caractérisation des mortiers pharaoniques du temple d'Amon à Karnak. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, (181), 39-45.

- [16] Ragai, J., Ghorab, H. Y., & Antar, A. (1987). Surface and bulk properties of ancient Egyptian mortars, part II: Adsorption and infrared studies. *Cement and Concrete Research*, 17(1), 12-21.
- [17] Ghorab, H. Y., Ragai, J., & Antar, A. (1986). Surface and bulk properties of ancient Egyptian mortars. Part I: X-ray diffraction studies. *Cement and Concrete Research*, 16(6), 813-822.
- [18] Frizot, M. (1975). *Mortiers et enduits peints antiques. Étude technique et archéologique* (No. 4). Centre de Recherches sur les Techniques Gréco-Romaines; Univ. de Dijon.
- [19] Malinowski, R., & Garfinkel, Y. (1991). Prehistory of concrete. *Concrete International*, 13(3).
- [20] Alvarez, J. I., Martín, A., & Casado, P. G. (1995). Historia de los morteros. *Boletín el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 13, 52-59.
- [21] Malinowski, R. (1979). Concretes and mortars in ancient aque-ducts. *Concrete International*, 1(01), 66-76.
- [22] Morgan, G. C. (1988). A survey of Romano-British wall-plaster. *Journal of the oil and color Chemists' Association*, 71(12), 417-418.
- [23] Rassineux, F., Petit, J. C., & Meunier, A. (1989). Ancient Analogues of Modern Cement: Calcium Hydrosilicates in Mortars and Concretes from Gallo-Roman Thermal Baths of Western France. *Journal of the American Ceramic Society*, 72(6), 1026-1032.
- [24] Santarelli, L. (1960). *Elementi di chimica del cemento*. Libreria Editrice Politecnica di Cesare Tamburini fu Camillo.
- [25] Morgan, G.C. (1992). Finds from the imperial west. The archeological inferences of wallplaster and mortar analysis. 1992, inédito.
- [26] Malinowski, R., Slatkine, A., & Ben Yair, M. (1961). Durability of roman mortars and concretes for hydraulic structures at cesarea and tiberias. In *Final report of the rilem international symposium 1961* (pp. 531-544). Chalmers tekniska hogskola.
- [27] Sickels, L. B. (1982). Organics vs. synthetics: their use as additives in mortars. In *Mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings. Symposium, Rome, 3-6 Nov.1981*. Mortiers, ciments et coulis utilises dans la conservation des batiments historiques. Symposium, Rome 3-6 Nov 1981, 25-52. Iccrom.
- [28] Ashurst, J. (1984). Mortars, plasters and renders in conservation. *Ecclesiastical architects' and surveyors' association*.
- [29] Pujadas Álvarez, P. (2013). Caracterización y diseño del homigón reforzado con fibras plásticas.
- [30] Romualdi, J.P.y Batson, G.B. (1963). Mechanics of cracks arrest in concrete. *Proceeding ASCE*, Vol.89, No. 3, pp. 147-168.

- [31] Romualdi, J. P., & Mandel, J. A. (1964). Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement. In *Journal Proceedings*, Vol. 61, No. 6, pp. 657-672.
- [32] Llerena, Á. B., Caballero, J. M., & Zaldo, V. (1981). Aplicaciones del cemento reforzado con fibra de vidrio (GRC). *Informes de la Construcción*, 33(333-334-335-336), 73-81.
- [33] Biryukovich, K.L, Biryukovich, Y.L, Biryukovich, D.L. (1964) Glass fibre Reinforced Cement. *Budivelnik*. Kiev.
- [34] Majumdar. A. J. (1980). Properties of GFRC. Fibrous Concrete. *Proc. Symp. The Concrete Society*. London., pp. 48-68.
- [35] Rodriguez, J. (1987). Morteros de cemento reforzados con fibra de vidrio. *Revista" BIA*, (1), 08.
- [36] Proctor, B. A. (1985). Alkali resistant glass fibres for reinforcement of cement. In *Glass... Current Issues* (pp. 555-573). Springer, Dordrecht.
- [37] Singh, B., & Majumdar, A. J. (1985). The effect of fibre length and content on the durability of glass reinforced cement—ten-year results. *Journal of materials science letters*, 4(8), 967-971.
- [38] Paradela, M. S., & Del Águila, A. (1992). El envejecimiento de las pastas de cemento reforzadas con fibras de vidrio. *Materiales de Construcción*, 42(226), 65-71.
- [39] Mobasher, B., & Shah, S. P. (1989). Test Parameters for Evaluating Toughness of Glass-Fiber. *ACI Materials Journal*, 86(5).
- [40] Glinicki, M. A., Vautrin, A., Soukatchoff, P., & Francois-Brazier, J. (1994). Plate impact testing method for GRC materials. *Cement and Concrete Composites*, 16(4), 241-251.
- [41] Enfedaque, A., Cendón, D., Gálvez, F., & Sánchez-Gálvez, V. (2011). Failure and impact behavior of facade panels made of glass fiber reinforced cement (GRC). *Engineering Failure Analysis*, 18(7), 1652-1663.
- [42] Sangeetha, P. (2011). Study on the compression and impact strength of GFRC with combination of admixtures. *Journal of Engineering Research and Studies E-ISSN*, 976, 7916.
- [43] Yildirim, S. T., Ekinci, C. E., & Findik, F. (2010). Properties of hybrid fiber reinforced concrete under repeated impact loads. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 46(7), 538-546.
- [44] ACI 544-2R-89 (1999). Measurement of roperties of fiber reinforced concrete.
- [45] Majumdar AJ. (1975). Fiber reinforced cement and concrete. *Construct Press*, 279–314.
- [46] Shah, S. P., Ludirdja, D., Daniel, J. I., & Mobasher, B. (1988). Toughness-durability of glass fiber reinforced concrete systems. *ACI Materials journal*, 85(5), 352-360.

- [47] Mobasher, B., & Shah, S. P. (1989). Test Parameters for Evaluating Toughness of Glass-Fiber. *ACI Materials Journal*, 86(5).
- [48] Majumdar AJ, Laws V. (1991). Glass fiber reinforced cement. Oxford: BSP Professional Books.
- [49] Purnell, P., Short, N. R., & Page, C. L. (2001). A static fatigue model for the durability of glass fibre reinforced cement. *Journal of Materials Science*, 36(22), 5385-5390.
- [50] Marikunte, S., Aldea, C., & Shah, S. P. (1997). Durability of glass fiber reinforced cement composites: Effect of silica fume and metakaolin. *Advanced Cement Based Materials*, 5(3-4), 100-108.
- [51] Ball, H., & Wackers, M. (2001). Long term durability of naturally aged GFRC mixes containing Forton polymer. *GRC Proceedings*.
- [52] Cian, D., & Della Bella, B. (2001). Structural applications of GRC for Precast floors. In *Proceedings of the 12th International Congress of the International Glassfibre Reinforced Concrete Association*, Dulin (pp. 41-52).
- [53] Chandramouli, K., Srinivasa, R. P., Pannirselvam, N., Seshadri, S. T., & Sravana, P. (2010). Strength properties of glass fiber concrete. *ARPJ journal of Engineering and Applied sciences*, 5(4), 1-6.
- [54] Tassew, S. T., & Lubell, A. S. (2014). Mechanical properties of glass fiber reinforced ceramic concrete. *Construction and Building Materials*, 51, 215-224.
- [55] Wei, B., Cao, H., & Song, S. (2010). Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment. *Materials & Design*, 31(9), 4244-4250.
- [56] Felicetti, R., Meyer, C., & Shimanovich, C. (2001). Basalt fiber reinforced oil well cement slurries. In *Proceedings of the 3rd international conference on concrete under severe conditions environment and loading CONSEC'01*, Vancouver, Canada, June 18-21, 2001 (pp. 1311-1318). University of British Columbia.
- [57] Sim, J., & Park, C. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, 36(6-7), 504-512.
- [58] Zhao, Q., Dong, J., Pan, H., & Hao, S. (2010). Impact behavior of basalt fiber reinforced concrete. *Fuhe Cailiao Xuebao (Acta Materiae Compositae Sinica)*, 27(6), 120-125.
- [59] Wojciech, K. (2013). Study on the properties of cement mortars with basalt fibres. In *Brittle Matrix Composites 10* (pp. 155-166).
- [60] Jiang, C., Fan, K., Wu, F., & Chen, D. (2014). Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. *Materials & Design*, 58, 187-193.
- [61] Kabay, N. (2014). Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber. *Construction and Building Materials*, 50, 95-101.

- [62] Ayub, T., Shafiq, N., & Nuruddin, M. F. (2014). Mechanical properties of high-performance concrete reinforced with basalt fibers. *Procedia Engineering*, 77, 131-139.
- [63] Ipbüker, C., Nulk, H., Gulik, V., Biland, A., & Tkaczyk, A. H. (2015). Radiation shielding properties of a novel cement-basalt mixture for nuclear energy applications. *Nuclear Engineering and Design*, 284, 27-37.
- [64] Lipatov, Y. V., Gutnikov, S. I., Manylov, M. S., Zhukovskaya, E. S., & Lazoryak, B. I. (2015). High alkali-resistant basalt fiber for reinforcing concrete. *Materials & Design*, 73, 60-66.
- [65] Kruszka, L., Moćko, W., Fenu, L., & Cadoni, E. (2015). Comparative experimental study of dynamic compressive strength of mortar with glass and basalt fibres. In *EPJ Web of Conferences* (Vol. 94, p. 05008). EDP Sciences.
- [66] Kizilkanat, A. B., Kabay, N., Akyüncü, V., Chowdhury, S., & Akça, A. H. (2015). Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 100, 218-224.
- [67] Fenu, L., Forni, D., & Cadoni, E. (2016). Dynamic behaviour of cement mortars reinforced with glass and basalt fibres. *Composites Part B: Engineering*, 92, 142-150.
- [68] Malo, Ó. G. (2012). Matrices cementicias multifuncionales mediante adición de nanofibras de carbono (Doctoral dissertation, Universitat d'Alacant-Universidad de Alicante).
- [69] Chung, D. D. L. (2000). Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material. *Composites Part B: Engineering*, 31(6-7), 511-526.
- [70] Chiou, J. M., Zheng, Q., & Chung, D. D. L. (1989). Electromagnetic interference shielding by carbon fibre reinforced cement. *Composites*, 20(4), 379-381.
- [71] Reza, F., Batson, G. B., Yamamuro, J. A., & Lee, J. S. (2001). Volume electrical resistivity of carbon fiber cement composites. *Materials Journal*, 98(1), 25-35.
- [72] Wang, S., Wen, S., & Chung, D. D. L. (2004). Resistance heating using electrically conductive cements. *Advances in cement research*, 16(4), 161-166.
- [73] Chung, D. D. L. (2004). Electrically conductive cement-based materials. *Advances in Cement Research*, 16(4), 167-176.
- [74] Park, S. B., Lee, B. I., & Lim, Y. S. (1991). Experimental study on the engineering properties of carbon fiber reinforced cement composites. *Cement and concrete research*, 21(4), 589-600.
- [75] Chen, P. W., & Chung, D. D. L. (1993). Concrete reinforced with up to 0.2 vol% of short carbon fibres. *Composites*, 24(1), 33-52.
- [76] Toutanji, H. A., El-Korchi, T., & Katz, R. N. (1994). Strength and reliability of carbon-fiber-reinforced cement composites. *Cement and concrete composites*, 16(1), 15-21.

- [77] Xu, Y., & Chung, D. D. L. (1999). Carbon fiber reinforced cement improved by using silane-treated carbon fibers. *Cement and concrete research*, 29(5), 773-776.
- [78] Wang, C., Li, K. Z., Li, H. J., Jiao, G. S., Lu, J., & Hou, D. S. (2008). Effect of carbon fiber dispersion on the mechanical properties of carbon fiber-reinforced cement-based composites. *Materials Science and Engineering: A*, 487(1-2), 52-57.
- [79] Graham, R. K., Huang, B., Shu, X., & Burdette, E. G. (2013). Laboratory evaluation of tensile strength and energy absorbing properties of cement mortar reinforced with micro-and meso-sized carbon fibers. *Construction and Building Materials*, 44, 751-756.
- [80] Shu, X., Graham, R. K., Huang, B., & Burdette, E. G. (2015). Hybrid effects of carbon fibers on mechanical properties of Portland cement mortar. *Materials & Design*, 65, 1222-1228.
- [81] Chan, R., & Bindiganavile, V. (2010). Toughness of fibre reinforced hydraulic lime mortar. Part-1: Quasi-static response. *Materials and structures*, 43(10), 1435-1444.
- [82] Chan, R., & Bindiganavile, V. (2010). Toughness of fibre reinforced hydraulic lime mortar. Part-2: Dynamic response. *Materials and structures*, 43(10), 1445-1455.
- [83] Izaguirre, A., Lanás, J., & Alvarez, J. I. (2011). Effect of a polypropylene fibre on the behaviour of aerial lime-based mortars. *Construction and Building Materials*, 25(2), 992-1000.
- [84] Lucolano, F., Liguori, B., & Colella, C. (2013). Fibre-reinforced lime-based mortars: A possible resource for ancient masonry restoration. *Construction and Building Materials*, 38, 785-789.
- [85] Asprone, D., Cadoni, E., Lucolano, F., & Prota, A. (2014). Analysis of the strain-rate behavior of a basalt fiber reinforced natural hydraulic mortar. *Cement and Concrete Composites*, 53, 52-58.
- [86] Santarelli, M. L., Sbardella, F., Zuená, M., Tirillò, J., & Sarasini, F. (2014). Basalt fiber reinforced natural hydraulic lime mortars: A potential bio-based material for restoration. *Materials & Design*, 63, 398-406.
- [87] Comisión Permanente del Hormigón. Anejo 14: Hormigón con fibras. Instrucción de Hormigón Estructural (EHE). 2008.
- [88] ACI 544.5R-10 Reported by ACI Committee 544 Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete
- [89] Stroeven, P., & Hu, J. (2006). Review paper—stereology: historical perspective and applicability to concrete technology. *Materials and structures*, 39(1), 127-135.
- [90] Soroushian, P., & Lee, C. D. (1990). Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete. *Materials Journal*, 87(5), 433-439.
- [91] Gettu, R., Ramos, G., Aguado, A., García, T., & Barragán, B. (2003). Análisis del uso de fibras metálicas como único refuerzo del hormigón de las dovelas del túnel de la línea 9 del Metro de Barcelona para UTE L9. Informe Final.

- [92] Tyson, B. M., Abu Al-Rub, R. K., Yazdanbakhsh, A., & Grasley, Z. (2011). Carbon nanotubes and carbon nanofibers for enhancing the mechanical properties of nanocomposite cementitious materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(7), 1028-1035.
- [93] Ramakrishnan, V., Tolmare, N. S., & Brik, V. B. (1998). Performance evaluation of 3-D basalt fiber reinforced concrete & basalt rod reinforced concrete (No. NCHRP-IDEA Project 45).
- [94] Felicetti, R., Meyer, C., & Shimanovich, C. (2001). Basalt fiber reinforced oil well cement slurries. In *Proceedings of the 3rd international conference on concrete under severe conditions environment and loading CONSEC'01*, Vancouver, Canada, June 18-21, 2001, pp. 1311-1318. University of British Columbia.
- [95] Lawrence, P. (1972). Some theoretical considerations of fibre pull-out from an elastic matrix. *Journal of Materials Science*, 7(1), 1-6.
- [96] Gopalaratnam, V. S., & Shah, S. P. (1986). Properties of steel fiber reinforced concrete subjected to impact loading. *Journal of the American Concrete Institute*, 83(1), 117-126.
- [97] Wang, Y., Li, V. C., & Backer, S. (1988). Modelling of fibre pull-out from a cement matrix. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 10(3), 143-149.
- [98] Li, V. C., Wang, Y., & Backer, S. (1990). Effect of inclining angle, bundling and surface treatment on synthetic fibre pull-out from a cement matrix. *Composites*, 21(2), 132-140.
- [99] Naaman, A. E. (2003). Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. *Journal of advanced concrete technology*, 1(3), 241-252.
- [100] Viviescas Jaimes, A. (2009). Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano. *Universitat Politècnica de Catalunya*.
- [101] Magdalena-Layos, F., García-Muñoz, J., & Mencías-Carrizosa, D. (2016). Estructuras de fábrica: enfoques «antiguos» y «modernos» para fenómenos muy locales. *Informes de la Construcción*, 68(542), 150.
- [102] Hilsdorf, H. K. (1969). Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression. *Designing, engineering and constructing with masonry products*, 34-41.
- [103] Van der Pluijm, H. Rutten, and M. Ceelen. (2000). Shear behaviour of bed joints. *12th International Brick/Block Masonry Conference*, pp. 1–14.
- [104] González Rodrigo, S. (2017). Comportamiento a arrancamiento de anclajes plásticos en muros de fábrica de ladrillo (Doctoral dissertation, Edificacion).
- [105] Dhanasekar, M., Page, A. W., & Kleeman, P. W. (1982). The elastic properties of brick masonry. *Int. J. Masonry Constr.*, 2(4), 155.
- [106] Hegemier, G. A., Nunn, R. O., & Arya, S. K. (1978). Behaviour of concrete masonry under biaxial stresses. In *Proceedings of the North American Masonry Conference* (pp. 1-1). University of Colorado Boulder, CO.

- [107] Khoo, C. L., & Hendry, A. W. (1973). Strength tests on brick and mortar under complex stresses for the development of a failure criterion for brickwork in compression. In Proc. British Ceramic Society (Vol. 21, pp. 51-66).
- [108] Grimm, C. T. (1975). Strength and Related Properties of Brick Masonry, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 101, No ST1, 1975, pp. 217-231.
- [109] Hendry, A. W. (1978). Strength of brickwork in combined racking shear and compression. In Proceedings of the British Ceramic society (No. 27, pp. 47-52).
- [110] Yokel, F. Y., & Fattal, S. G. (1976). Failure hypothesis for masonry shear walls. Journal of the Structural Division, 102(3), 515-532.
- [111] Grenley, D.G., Cattaneo, L.E. (1971). The effect of edge load on racking strength of clay masonry. Proc. 2ed International brick masonry conference, stoke-on-trent, 263 - 265.
- [112] Page, A. W. (1980). A biaxial failure criterion for brick masonry in the tension-tension range. Int. J. Masonry Constr., 1(1), 26.
- [113] Page, A. W. (1981). The biaxial compressive strength of brick masonry. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 71(3), 893-906.
- [114] Page, A. W. (1982). An experimental investigation of the biaxial strength of brick masonry. In Proc. Sixth Int. Brick Masonry Conf (pp. 3-15).
- [115] Page, A. W. (1983). The strength of brick masonry under biaxial tension-compression. International journal of masonry construction, 3(1), 26-31.
- [116] Dhanasekar, M., Kleeman, P. W., & Page, A. W. (1985). Biaxial stress-strain relations for brick masonry. Journal of structural Engineering, 111(5), 1085-1100.
- [117] Samarasinghe, W., A. W. Hendry. (1980). The Strength of Brickwork under Biaxial Tension-Compression. Proc. 7th Int. Symp. on Load Bearing Brickwork, London.
- [118] Hamid, A. A., & Drysdale, R. G. (1981). Proposed failure criteria for concrete block masonry under biaxial stresses. Journal of the Structural Division, 107(8), 1675-1687.
- [119] Drysdale, R. G., A. A. Hamid, A. C. Heidebrecht. (1979). Tensile Strength of Concrete Masonry. Journal of the Structural Div., Proc. ASCE, Vol. 105, No ST7, pp. 1261-1275.
- [120] Ganz, H. R., & Thürlimann, B. (1983, November). Strength of brick walls under normal force and shear. In Proceedings of the 8th International Symposium on Load Bearing Brickwork (Vol. 27, p. 29).
- [121] Lourenço, P. B., Rots, J. G., & Blaauwendraad, J. (1998). Continuum model for masonry: parameter estimation and validation. Journal of structural engineering, 124(6), 642-652.
- [122] Lourenço, P. B., & Rots, J. G. (2000). An anisotropic failure criterion for masonry suitable for numerical implementation. TMS J, 18(1), 11-18.

- [123] Asteris, P.G, A. D. Tzamtzis. (2002). Non-linear FE Analysis of Masonry Shear Walls. Proceedings, Sixth International Masonry Conference, London.
- [124] Naraine, K., S. N. Sinha. (1988). Test of Brick Masonry Models Under Cyclic Compressive Loading. Proc. 8th Int. Brick Masonry Conf., Dublin, Ireland, Vol. 1, pp. 395-405.
- [125] Naraine, K., & Sinha, S. (1989). Behavior of brick masonry under cyclic compressive loading. Journal of Structural Engineering, 115(6), 1432-1445.
- [126] Naraine, K., & Sinha, S. (1989). Loading and unloading stress-strain curves for brick masonry. Journal of Structural engineering, 115(10), 2631-2644.
- [127] Atkinson, R. H., Amadei, B. P., Saeb, S., & Sture, S. (1989). Response of masonry bed joints in direct shear. Journal of Structural Engineering, 115(9), 2276-2296.
- [128] Priestley, M. J. N. (1985). Seismic Behavior of Unreinforced Masonry Walls", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Voi. 18, No 2, pp. 191-205.
- [129] Mayes 1976: Mayes, R. L., Y. Omote, R. W. Clough. (1976). Cyclic Shear Tests of Masonry Piers, Voi. I -Test Results. EERC Report No. 76/8, University of California, Berkeley, California.
- [130] Mayes, R. L., Y. Omote, R. W. Clough. (1976). Cyclic Shear Tests of Masonry Piers, Vol. II -Analysis of Test Results. EERC Report No. 76/16, University of California, Berkeley, California.
- [131] Hidalgo, P. A., Mayes, R. L., McNiven, H. D., & Clough, R. W. (1978). Cyclic loading tests of masonry single piers, volume 1: height to width ratio of 2 (p. 140). Earthquake Engineering Research Center.
- [132] Hidalgo, P. A. (1979). Cyclic Loading Tests on Masonry Piers. Vol. I-II-Height to Width Ratio of 0.5. EERC Report.
- [133] Gulkan, P., R. L. Mayes, R. W. Clough. (1979). Shaking Table Study of SingleStory Masonry Houses. Voi. I-Test Structures 1 and 2", EERC Report No. 79/23, University of California, Berkeley, California.
- [134] Gulkan, P., R. L. Mayes, R. W. Clough. (1979). Shaking Table Study of SingleStory Masonry Houses. Vol. II-Test Structures 3 and 4", EERC Report No. 79/24, University of California, Berkeley, California.
- [135] Kariotis, J. C., Ewing, R. D., Johnson, A. W., & Adham, S. A. (1985). Methodology for mitigation of earthquake hazards in unreinforced brick masonry buildings. In Proceedings of the 7th International Brick Masonry Conference (pp. 1339-50).
- [136] Kariotis, J. C., Ewing, R. D., & Johnson, A. W. (1985). Predictions of stability for unreinforced brick masonry walls shaken by earthquakes. In Proceedings of the 7th International Brick Masonry Conference.
- [137] Kariotis, J. C., R. D. Ewing, A. W. Johnson. (1985). Strength Determination and Shear Failure Modes of Unreinforced Brick Masonry with Low Strength Mortar. Proc. 7th Int. Brick Masonry Conference, Melbourne, Australia.

- [138] Button, M. R., & Mayes, R. L. (1992). Out-of-plane seismic response of reinforced masonry walls. *Journal of Structural Engineering*, 118(9), 2495-2513.
- [139] Blondet, J. M., Mayes, R. L., & Kelly, T. E. (1990). Out-of-Plane Testing of Slender Hollow Clay Masonry Block Walls. In *Proc. 5th North American Masonry Conference*.
- [140] Adham, S. A., Agbabian, M., Avanesian, V., Masri, S. F., & Traina, I. (1990). Out-of-plane dynamic testing of concrete masonry walls. In *Proc. 5th North American Masonry Conference*.
- [141] Sucuoğlu, H., McNiven, H. D., & Mengi, Y. (1982). A Mathematical Model for the Response of Masonry Walls to Dynamic Excitations. *Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California*.
- [142] Mengi, Y., Sucuoğlu, H., & McNiven, H. D. (1984). A linear mathematical model for the seismic inplane behaviour of brick masonry walls part 1: Theoretical considerations. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 12(3), 313-326.
- [143] Mengi, Y., & McNiven, H. D. A Mathematical Model of Masonry for Predicting the Nonlinear Response of Unreinforced Masonry Walls to In-Plane Earthquake Excitations (No. 86/07). *EERC Report*.
- [144] Matthys, H., & Noland, L. (1989). *Proceedings of an international seminar on evaluation, strengthening and retrofitting masonry buildings*. TMS, Colorado, USA.
- [145] MSJC. (1999) Building code requirements for masonry structures, *Masonry Stand. J. Committee Nuti, C., Vanzi, I., 2003, To retrofit or not to retrofit, J. Eng. Struc., 25, 701-711*.
- [146] Calvi, G. M., & Magenes, G. (1994). Experimental results on unreinforced masonry shear walls damaged and repaired. In *Proceedings of the 10th International brick masonry conference*, Vol. 2, pp. 509-518.
- [147] Schuller, M. P., Atkinson, R. H., & Borgsmiller, J. T. (1994). Injection grouting for repair and retrofit of unreinforced masonry. In *Proceedings of the 10th International Brick and Block Masonry Conference*.
- [148] Sheppard, P., & Tercelj, S. (1980). The effect of repair and strengthening methods for masonry walls. In *7th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 6, pp. 255-262.
- [149] Hamid, A., El-Sayed, T., & Salama, A. (1999). Seismic retrofit of historic multiwythe stone masonry walls, *8th NAMC*. Austin, Texas, USA.
- [150] Rai, D. C., & Goel, S. C. (1996). Seismic strengthening of unreinforced masonry piers with steel elements. *Earthquake spectra*, 12(4), 845-862.
- [151] Taghdi, M., Bruneau, M., & Saatcioglu, M. (2000). Seismic retrofitting of low-rise masonry and concrete walls using steel strips. *Journal of Structural Engineering*, 126(9), 1017-1025.
- [152] Ehsani, M. R., Saadatmanesh, H., & Al-Saidy, A. (1997). Shear behavior of URM retrofitted with FRP overlays. *Journal of composites for construction*, 1(1), 17-25.

- [153] Albert, M. L., Elwi, A. E., & Cheng, J. R. (2001). Strengthening of unreinforced masonry walls using FRPs. *Journal of Composites for Construction*, 5(2), 76-84.
- [154] Hamoush, S. A., McGinley, M. W., Mlakar, P., Scott, D., & Murray, K. (2001). Out-of-plane strengthening of masonry walls with reinforced composites. *Journal of Composites for Construction*, 5(3), 139-145.
- [155] Foster, P. B., Gergely, J., Young, D. T., McGinley, W. M., & Corzo, A. (2005). FRP Repair Methods for FRP Repair Methods for Unreinforced Masonry Buildings Subject to Cyclic Loading. Special Publication, 230, 289-306.
- [156] Valluzzi, M. R., Tinazzi, D., & Modena, C. (2002). Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates. *Construction and Building materials*, 16(7), 409-416.
- [157] Chuxian, S., Guiqui, L., & Wenchao, W. (1997). The design of Brick masonry structure with concrete column, 11th IB2MaC. Shanghai, China, 626-633.
- [158] Zezhen, N., Qi, D., Jianyou, C., & Runtao, Y. (1984). A study of aseismic strengthening for multi-story brick building by additional R. C columns. 8th WCEE, USA, 591-598.
- [159] Shrestha, K. C., Araki, Y., Nagae, T., Omori, T., Sutou, Y., Kainuma, R., & Ishida, K. (2013). Effectiveness of superelastic bars for seismic rehabilitation of clay-unit masonry walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(5), 725-741.
- [160] Foti, D., & Monaco, P. (2000). Post-tensioned masonry: state of the art. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2(3), 311-318.
- [161] Lissel, S. L., & Shrive, N. G. (2003). Construction of diaphragm walls post-tensioned with carbon fiber reinforced polymer tendons. In *Proc., 9th North American Masonry Conf.(9NAMC)* (pp. 192-203).
- [162] Mojsilovic, N., & Marti, P. (1996). Load tests on post-tensioned masonry walls. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH-Hönggerberg.
- [163] Al-Manaseer, A. A., & Neis, W. V. (1987). Load tests on post-tensioned masonry wall panels. *Structural Journal*, 84(6), 467-472.
- [164] Rosenboom, O., & Kowalsky, M. (2003). Investigation of alternative details for seismic design of post-tensioned clay masonry walls. 9th NAMC, USA, 475-485.
- [165] Karantoni, F. V., & Fardis, M. N. (1992). Effectiveness of seismic strengthening techniques for masonry buildings. *Journal of Structural Engineering*, 118(7), 1884-1902.
- [166] Plecnik, J., Cousins, T., & O'Conner, E. (1986). Strengthening of unreinforced masonry buildings. *Journal of Structural Engineering*, 112(5), 1070-1087.
- [167] Abrams, D. P., & Lynch, J. M. (2001). Flexural behavior of retrofitted masonry piers. In *KEERC-MAE joint seminar on risk mitigation for regions of moderate seismicity* (pp. 234-243).
- [168] Jabarov, M., Kozharinov, S., & Lunyov, A. (1980). Strengthening of damaged masonry by reinforced mortar layers. *Proceedings of the 7th WCEE, Istanbul, Turkey*, 4, 73-80.

- [169] Kahn, L. (1984). Shotcrete retrofit for unreinforced brick masonry. In 8th WCEE (Vol. 583, p. 590).
- [170] Hutchison, D., Yong, P., & McKenzie, G. (1984). Laboratory testing of a variety of strengthening solutions for brick masonry wall panels, 8th WCEE. San Francisco, USA, 575-582.
- [171] Sevil, T., Baran, M., Bilir, T., & Canbay, E. (2011). Use of steel fiber reinforced mortar for seismic strengthening. *Construction and Building Materials*, 25(2), 892-899.
- [172] Facconi, L., Conforti, A., Minelli, F., & Plizzari, G. A. (2015). Improving shear strength of unreinforced masonry walls by nano-reinforced fibrous mortar coating. *Materials and structures*, 48(8), 2557-2574.
- [173] Instrucción para recepción de cementos RC-08. 2008. Ministerio de Fomento. España.
- [174] Norma Española UNE-EN 1504-3. Diciembre 2006. 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.
- [175] Código Técnico de la Edificación (CTE). 2006. Ministerio de Fomento.
- [176] Norma Española UNE-EN 480-13. Septiembre 2015. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 13: Mortero de referencia para albañilería para ensayos de aditivos para morteros.
- [177] Norma Española UNE 80103. Septiembre 2013. Métodos de ensayo de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la densidad real.
- [178] Norma Española UNE-EN 197-1. Diciembre 2011. Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.
- [179] Cazalla Vázquez, O. (2002). Morteros de cal: aplicación en el patrimonio histórico.
- [180] Ramírez, M. D. S. M. (1995). Desarrollo de nuevos morteros de reparación resistentes al ataque biológico: empleo de la sepiolita como material soporte de los biocidas (Doctoral dissertation, Universidad Complutense de Madrid).
- [181] Norma Española UNE-EN 459-1. Septiembre 2011. Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.
- [182] Sabbioni, C., Bonazza, A., & Zappia, G. (2002). Damage on hydraulic mortars: the Venice Arsenal. *Journal of cultural Heritage*, 3(1), 83-88.
- [183] Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I., & Kilikoglou, V. (2005). Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1577-1586.
- [184] Arandigoyen, M., & Alvarez, J. I. (2007). Pore structure and mechanical properties of cement-lime mortars. *Cement and concrete research*, 37(5), 767-775.

- [185] Silva, B. A., Pinto, A. F., & Gomes, A. (2014). Influence of natural hydraulic lime content on the properties of aerial lime-based mortars. *Construction and Building Materials*, 72, 208-218.
- [186] Norma Española UNE-EN 459-2. Noviembre 2011. Cales para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.
- [187] Norma Española UNE 146901. Enero 2008. Áridos. Designación
- [188] Norma Española UNE-EN 13139. Marzo 2003. Áridos para morteros
- [189] Norma Española UNE-EN 13139/AC. Octubre 2004. Áridos para morteros
- [190] Norma Española UNE-EN 933-2- 1ª modificación. Febrero 1999. Ensayo para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas
- [191] Norma Española UNE-EN 933-1. Julio 2012. Ensayo para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.
- [192] Norma Española UNE-EN 933-8. Julio 2012. Ensayos para determinar las Propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.
- [193] Norma Española UNE-EN 933-8+A1. Septiembre 2015. Ensayos para determinar las Propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.
- [194] Norma Española UNE-EN 1097-3. Junio 1999. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad.
- [195] Norma Española UNE-EN 1097-6. Junio 2014. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua
- [196] Norma Española UNE-EN 1744-1+A1. Abril 2013. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico.
- [197] Garcés, P., Fraile, J., Vilaplana-Ortego, E., Cazorla-Amorós, D., Alcocel, E. G., & Andión, L. G. (2005). Effect of carbon fibres on the mechanical properties and corrosion levels of reinforced portland cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 35(2), 324-331.
- [198] Fitzer, E. (1990). Carbon fibres—present state and future expectations. In *Carbon Fibers Filaments and Composites* (pp. 3-41). Springer, Dordrecht.
- [199] Huang, X. (2009). Fabrication and properties of carbon fibers. *Materials*, 2(4), 2369-2403.
- [200] Llano Uribe, C. (2011). Fibra de carbono. Presente y futuro de un material revolucionario. *Revista metal actual*.

- [201] Chen, B., Wu, K., & Yao, W. (2004). Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 291-297.
- [202] Fiore, V., Di Bella, G., & Valenza, A. (2011). Glass–basalt/epoxy hybrid composites for marine applications. *Materials & Design*, 32(4), 2091-2099.
- [203] Banibayat, P., & Patnaik, A. (2014). Variability of mechanical properties of basalt fiber reinforced polymer bars manufactured by wet-layup method. *Materials & Design*, 56, 898-906.
- [204] Carmisciano, S., De Rosa, I. M., Sarasini, F., Tamburrano, A., & Valente, M. (2011). Basalt woven fiber reinforced vinylester composites: Flexural and electrical properties. *Materials & Design*, 32(1), 337-342.
- [205] Dhand, V., Mittal, G., Rhee, K. Y., Park, S. J., & Hui, D. (2015). A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 73, 166-180.
- [206] Militký, J., Kovačič, V., & Rubnerova, J. (2002). Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt fibers. *Engineering Fracture Mechanics*, 69(9), 1025-1033.
- [207] Deák, T., & Czigány, T. (2009). Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: a comparison. *Textile Research Journal*, 79(7), 645-651.
- [208] basf.com. [Online]. Disponible en: <http://www.basf.com/> [Visitado 21 Feb. 2017].
- [209] Olcina Santos, J.J. (2014). Evolución de los aditivos en el hormigón. Conferencia. Universidad Católica San Antonio de Murcia.
- [210] Norma UNE-EN 934-3:2010+A1. Diciembre 2012. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 3: Aditivos para morteros para albañilería. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado.
- [211] Instituto Eduardo Torroja. (1971). Obras de fábrica: prescripciones del Instituto Eduardo Torroja. IET.
- [212] Norma Española UNE-EN 771-1. Diciembre 2011. Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Piezas de arcilla cocida.
- [213] Norma Española UNE-EN 771-1+A1. Diciembre 2016. Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Piezas de arcilla cocida.
- [214] Norma Española UNE-EN 772-11. Septiembre 2011. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 11: Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería de hormigón, hormigón celular curado en autoclave, piedra artificial y piedra natural, y de la tasa de absorción de agua inicial de las piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería.
- [215] Norma Española UNE-EN 772-1. Septiembre 2011. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión.

- [216] Norma Española UNE-EN 772-1+A1. Junio 2016. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión.
- [217] Ohama Y. Concrete polymer composites. (2012). Proceedings of 7 Asian Symposium of Polimers in Concrete. Intanbul, Turkey.
- [218] Czarnecki, L. (2007). Concrete-polymer composites: trends shaping the future. International journal of the Society of Materials Engineering for Resources, 15(1), 1-5.
- [219] Norma Española UNE-EN 998-2. Mayo 2012. Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería
- [220] Norma Española UNE-EN 1504-4. Noviembre 2005. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Definiciones, requisitos, control de calidad y evaluación de la conformidad. Parte 4: Adhesión estructural.
- [221] Petrement, C. J. (2012). Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano: obtención, caracterización y puesta en obra (Doctoral dissertation, Universidad de Burgos).
- [222] Norma Española UNE-EN 1015-2. Julio 1999. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo.
- [223] Norma Española UNE-EN 1015-2/A1. Octubre 2007. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo.
- [224] Norma Española UNE-EN 1015-6. Julio 1999. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco.
- [225] Norma Española UNE-EN 1015-6/A1. Octubre 2007. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco.
- [226] Norma Española UNE-EN 196-1. Septiembre 2005. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.
- [227] Gao, J., Wang, Z., Zhang, T., & Zhou, L. (2017). Dispersion of carbon fibers in cement-based composites with different mixing methods. Construction and Building Materials, 134, 220-227.
- [228] Norma Española UNE-EN 1015-9. Marzo 2000. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 9: Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco.
- [229] Norma Española UNE-EN 1015-9/A1. Septiembre 2007. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 9: Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco.
- [230] Norma Española UNE-EN 1015-3. Septiembre 2000. Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).

- [231] Norma Española UNE-EN 1015-3/A1. Diciembre 2005. Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).
- [232] Norma Española UNE-EN 1015-3/A2. Septiembre 2007. Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).
- [233] Norma Española UNE-EN 1015-7:1999. Junio 1999. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco.
- [234] Norma Española UNE-EN 1015-10. Marzo 2000. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido.
- [235] Norma Española UNE-EN 1015-10/A1. Septiembre 2007. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido.
- [236] Norma Española UNE-EN 1015-18. Junio 2006. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido. 2003.
- [237] Benavente, D. (2003). Modelización y estimación de la durabilidad de materiales pétreos porosos frente a la cristalización de sales.
- [238] Söylev, T. A., & Özturan, T. (2014). Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fraction. *Construction and Building materials*, 73, 67-75.
- [239] Pereira-de-Oliveira, L. A., Castro-Gomes, J. P., & Nepomuceno, M. C. (2012). Effect of acrylic fibres geometry on physical, mechanical and durability properties of cement mortars. *Construction and Building Materials*, 27(1), 189-196.
- [240] Norma Española UNE-EN 1015-11. Marzo 2000. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.
- [241] Norma Española UNE-EN 1015-11/A1. Octubre 2007. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.
- [242] Gopalaratnam, V. S., & Gettu, R. (1995). On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes. *Cement and concrete composites*, 17(3), 239-254.
- [243] Norma Española UNE 83510. Diciembre 2004. Hormigones con fibras. Determinación del índice de tenacidad y resistencia a primera fisura.
- [244] ASTM International (2002), C 1018 – 97, Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), ASTM Annual Book of Standards, Vol 04.02, Philadelphia, USA, pp 546 – 553.

- [245] Li, V. C., & Maalej, M. (1996). Toughening in cement based composites. Part II: Fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 18(4), 239-249.
- [246] Cánovas, M. F. (1982). Hormigones reforzados con fibras de acero. *Informes de la Construcción*, 34(342), 5-17.
- [247] Malagavelli, V., & Rao, P. N. (2010). Effect of non bio degradable waste in Concrete slabs. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 1(3), 449.
- [248] Norma Española UNE 83508. Diciembre 2004. Hormigones con fibras. Determinación del índice de tenacidad a compresión.
- [249] Fernández Iglesias, ME. (2013). Refuerzo de Matrices Cementicias mediante la Valorización de Fibras Sintéticas provenientes de Residuos Post-Consumo. Universitat Politècnica de València.
- [250] Ramírez de Arellano Agudo, A., Alejandro Sánchez, F. J., Barrios Padura, Á., & Barrios Sevilla, J. (1997). La retracción en los morteros de cal. *Materiales de construcción*, 47(245), 27-44.
- [251] Dehouse, N. M. (1975). Méthodes d'essais et caractéristiques des bétons armés des fibres métalliques. *Rilem Symposium: Fibre Reinforced Cement and Concrete*, Ed. Construction Press.
- [252] Del Viso, J. R., Carmona, J. R., & Ruiz, G. (2007). Influencia de la forma y del tamaño de la probeta en la resistencia a compresión de hormigones de alta resistencia. In *Anales de la Mecánica de Fractura* (Vol. 2).
- [253] Rosell, J. R., & Cantalapiedra, I. R. (2011). Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto aplicado a morteros de cal y cemento. *Materiales de construcción*, 61(301), 39-48.
- [254] Norma Española UNE-EN 13412. Octubre 2006. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo, determinación del modulo de elasticidad en compresión
- [255] Norma Española UNE-EN 12504-4. Enero 2006. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.
- [256] Norma Española UNE-EN 12390-6. Octubre 2010. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas.
- [257] Nanni A. (1988), Splitting - Tension Test for Fiber Reinforced Concrete, *ACI Material Journal*, Vol 85, pp 229 – 233.
- [258] Nanni, A. (1991). Pseudoductility of fiber reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 3(1), 78-90.
- [259] Cho, B. S., El-Shakra, Z. M., & Gopalaratnam, V. S. (1991). Failure of FRC in direct and indirect tensile test configurations. *Fatigue and Fracture in Steel and Concrete Structures. ISFF'91.*, 1, 587-601.
- [260] Garín, L., Santilli, A., & Pejoja, E. (2012). Influencia del curado en la resistencia a compresión del hormigón: estudio experimental. Recuperado el, 10.

- [261] Ventura, B. P., Ortega, E. B., Llopis, V. G., Cayón, Á. C., Parici, S. B., & Martín, J. A. M. (1985). La resistencia a tracción indirecta del hormigón por doble punzonamiento. Influencia del tamaño máximo del árido y de la excentricidad. *Informes de la Construcción*, 37(374), 19-26.
- [262] Norma Española UNE-EN ISO 148-1. Junio 2011. Materiales metálicos. Ensayo de flexión por choque con péndulo Charpy. Parte 1: Método de ensayo.
- [263] Guía morteros para fábricas de la Asociación Nacional de Fabricantes de Morteros (AFAM). Octubre 2004.
- [264] Norma Española UNE-EN 1015-12. Septiembre 2000. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros de revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes.
- [265] Norma Española UNE 80-112. 1989. Métodos de ensayo de cementos, ensayos físicos. Determinación de la retracción de secado y del hinchamiento en agua
- [266] Balaguru, P. N., & Shah, S. P. (1992). Fiber-reinforced cement composites.
- [267] Leonard, S., & Bentur, A. (1984). Improvement of the durability of glass fiber reinforced cement using blended cement matrix. *Cement and concrete research*, 14(5), 717-728.
- [268] Bentur, A., Ben-Bassat, M., & SCHNEIDER, D. (1985). Durability of glass-fiber-reinforced cements with different alkali-resistant glass fibers. *Journal of the American Ceramic Society*, 68(4), 203-208.
- [269] Fernández, J. N. E. (2011). Efecto de la adición de puzolanas activas en la durabilidad del GRC fabricado con fibras de vidrio tipo e.
- [270] Fedaoui-Akmoussi, O., Molez, L., Kaci, S., & Jauberthie, R. (2015). Mechanical behavior and durability of fibre reinforced mortar in an aggressive environment. *Procedia Engineering*, 114, 445-452.
- [271] Afroughsabet, V., & Ozbakkaloglu, T. (2015). Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and building materials*, 94, 73-82.
- [272] Puertas, F., Amat, T., Fernández-Jiménez, A., & Vázquez, T. (2003). Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. *Cement and Concrete Research*, 33(12), 2031-2036.
- [273] Zhang, P., & Li, Q. F. (2013). Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1587-1594.
- [274] Toledo Filho, R. D., Scrivener, K., England, G. L., & Ghavami, K. (2000). Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement and concrete composites*, 22(2), 127-143.
- [275] Ozerkan, N. G., Ahsan, B., Mansour, S., & Iyengar, S. R. (2013). Mechanical performance and durability of treated palm fiber reinforced mortars. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2(2), 131-142.

- [276] John, V. M., Cincotto, M. A., Sjöström, C., Agopyan, V., & Oliveira, C. T. A. (2005). Durability of slag mortar reinforced with coconut fibre. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 565-574.
- [277] Di Bella, G., Fiore, V., Galtieri, G., Borsellino, C., & Valenza, A. (2014). Effects of natural fibres reinforcement in lime plasters (kenaf and sisal vs. Polypropylene). *Construction and Building Materials*, 58, 159-165.
- [278] Norma Española UNE-EN 12371. Enero 2012. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad.
- [279] Norma Española UNE-EN 12370. Noviembre 1999. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales.
- [280] Norma Española UNE-EN 14066. Febrero 2014. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque.
- [281] Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete* (Vol. 4). London: Longman.
- [282] Rojas, M. F., & de Rojas, M. S. (2003). The effect of high curing temperature on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement matrices at 60 C. *Cement and Concrete Research*, 33(5), 643-649.
- [283] Fernández Cánovas, M. (1989). *Hormigón*. Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- [284] Arandigoyen, M., Bernal, J. P., López, M. B., & Alvarez, J. I. (2005). Lime-pastes with different kneading water: pore structure and capillary porosity. *Applied Surface Science*, 252(5), 1449-1459.
- [285] RILEM TC 167-COM (2005). Introduction to requirements for and functions and properties of repair mortars. Prepared by Van Balen K, Papayianni I, Van Hees R, Binda L, Waldum A. *Mater Struct* 38:781–785
- [286] Lanás, J., & Alvarez-Galindo, J. I. (2003). Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. *Cement and concrete research*, 33(11), 1867-1876.
- [287] Lanás, J., Bernal, J. P., Bello, M. A., & Galindo, J. A. (2004). Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. *Cement and concrete research*, 34(12), 2191-2201.
- [288] Seabra, M. P., Labrincha, J. A., & Ferreira, V. M. (2007). Rheological behaviour of hydraulic lime-based mortars. *Journal of the European Ceramic Society*, 27(2-3), 1735-1741.
- [289] Silva, B. A., Pinto, A. F., & Gomes, A. (2015). Natural hydraulic lime versus cement for blended lime mortars for restoration works. *Construction and Building Materials*, 94, 346-360.
- [290] RILEM, 50-FMC. (1986). Committee Fracture Mechanics of Concrete. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend test on notched beams, *Mater. Struct.* 18 285–290.
- [291] García-Cuadrado, J., Rodríguez, A., Cuesta, I. I., Calderón, V., & Gutiérrez-González, S. (2017). Study and analysis by means of surface response to

fracture behavior in lime-cement mortars fabricated with steelmaking slags. *Construction and Building Materials*, 138, 204-213.

- [292] Merta, I., & Tschegg, E. K. (2013). Fracture energy of natural fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 991-997.
- [293] Norma Española UNE-EN 1052-1. Abril 1999. Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión.
- [294] Norma Española UNE-EN 1052-3. Enero 2008. Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 3: Determinación de la resistencia inicial a cortante.
- [295] ASTM, A. (2010). E519/E519M-10: Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages. West Conshohoken, USA: American Society for Testing and Materials International.
- [296] Rilem, T. C. (1994). LUM B6 Diagonal tensile strength tests of small wall specimens, 1991. RILEM Recommendations for the testing and use of constructions materials, 488-489.
- [297] Alecci, V., Fagone, M., Rotunno, T., & De Stefano, M. (2013). Shear strength of brick masonry walls assembled with different types of mortar. *Construction and Building Materials*, 40, 1038-1045.

ANEXO

Índice de figuras y tablas

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1. Propiedades mecánicas de las fibras.....	23
Figura 2.2. Modelo fotoelástico de estructura de fábrica [101]	26
Figura 2.3. Distribución de esfuerzos ideal en un elemento de mampostería solicitado a compresión excéntrica [102]	27
Figura 2.4. Mecanismos de fallo a cortante en la interfaz ladrillo mortero [103]	28

CAPÍTULO 3

Figura 3.1. a) Cemento CEM IV/B (P-V) 32,5 N. b) Cemento CEM II/A LL 42,5 N	41
Figura 3.2. a) Cal hidráulica natural NHL 5. b) Cal aérea cálcica CL 90-S	46
Figura 3.3. Columna de tamizado	49
Figura 3.4. Granulometría de la arena. Media de los dos ensayos.....	50
Figura 3.5. Agitación de la probeta. Lavado de la probeta. Medición de la altura de la suspensión. Medición de la altura del sedimento	51
Figura 3.6. Pesada con el molde con capacidad de 1 litro relleno con arena	52
Figura 3.7. Picnómetro con arena y picnómetro con arena y relleno con agua	53
Figura 3.8. Fibra de vidrio	56
Figura 3.9. Fibra de carbono.....	58
Figura 3.10. Fibra de basalto	60
Figura 3.11. Plastificante Glenium Sky 604.....	62
Figura 3.12. Estructura química del BNS	63
Figura 3.13. Comportamiento de los aditivos con base BNS.....	63
Figura 3.14. Ladrillo de 250x65x120 mm	64
Figura 3.15. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad	65
Figura 3.16. a) Acondicionamiento de los ladrillos mediante pulido. b) Rotura a compresión del ladrillo	67

CAPÍTULO 4

Figura 4.1. Amasada de prueba con una relación agua-conglomerante de 0,95.....	74
Figura 4.2. Amasadora utilizada y pala de amasado.....	75
Figura 4.3. Amasado de mortero y retirada del mortero adherido	75
Figura 4.4. a) Equipo de compactación. b) Molde relleno, compactado y enrasado....	76
Figura 4.5. Curado de probetas en cámara húmeda.....	76

Figura 4.6. a) Medida de la torta de mortero	80
Figura 4.7. Pesada del recipiente relleno de mortero	81
Figura 4.8. Comparación de las densidades aparentes del mortero fresco para los morteros de cemento y cal hidráulica.....	83
Figura 4.9. a) Esquema del aparato de ensayo (Norma UNE-EN 1015-7). b) Aparato de medida con la muestra de mortero en el interior	84
Figura 4.10. Porcentaje de aire ocluido para los morteros de cemento	86
Figura 4.11. Porcentaje de aire ocluido para los morteros de cal hidráulica	86
Figura 4.12. Pesada hidrostática de la probeta seca	87
Figura 4.13. Comparación de densidades aparentes del mortero en estado fresco y endurecido para los morteros de cemento	91
Figura 4.14. Comparación de densidades aparentes del mortero en estado fresco y endurecido para los morteros de cal hidráulica	91
Figura 4.15. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad	92
Figura 4.16. Coeficiente de absorción de agua por capilaridad para los morteros de cemento.....	94
Figura 4.17. Coeficiente de absorción de agua por capilaridad para los morteros de cal hidráulica	94
Figura 4.18. Equipo Ibertest modelo MIB-60/AM.....	95
Figura 4.19. Determinación de la resistencia a flexión	96
Figura 4.20. Resistencia a flexión para los morteros de cemento	98
Figura 4.21. Resistencia a flexión para los morteros de cal hidráulica	98
Figura 4.22. Diagrama tensión-deformación esquemático con indicación de los límites para el cálculo de: a) densidad de energía $E_{fL/150}$ e índice I_{30} . b) índices I_5 , I_{10} e I_{20} ...	100
Figura 4.23. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento con fibra de vidrio	101
Figura 4.24. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento con fibra de carbono.....	102
Figura 4.25. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento con fibra de basalto	103
Figura 4.26. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento con fibras mixtas	103
Figura 4.27. Índices de tenacidad últimos de los morteros de cemento	105
Figura 4.28. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cal hidráulica con fibra de vidrio	106

Figura 4.29. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cal hidráulica con fibra de carbono	107
Figura 4.30. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cal hidráulica con fibra de basalto	107
Figura 4.31. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cal hidráulica con fibras mixtas	108
Figura 4.32. Índices de tenacidad últimos de los morteros de cal hidráulica	109
Figura 4.33. Determinación de las resistencias a compresión.....	111
Figura 4.34. Resistencia a compresión a 28 días para los morteros de cemento.....	113
Figura 4.35. Resistencia a compresión a 120 días para los morteros de cemento....	113
Figura 4.36. Resistencia a compresión a 28 días para los morteros de cal hidráulica	115
Figura 4.37. Resistencia a compresión a 120 días para los morteros de cal hidráulica	115
Figura 4.38. Correlación entre la resistencia a compresión de los morteros de cemento y en porcentaje de aire ocluido	116
Figura 4.39. Diagrama de tensión-deformación a compresión a 28 días de los morteros de cemento con fibra de vidrio	118
Figura 4.40. Diagrama de tensión-deformación a compresión a 28 días de los morteros de cemento con fibra de carbono.....	118
Figura 4.41. Diagrama de tensión-deformación a compresión a 28 días de los morteros de cemento con fibra de basalto	119
Figura 4.42. Diagrama de tensión-deformación a compresión a 28 días de los morteros de cemento con mezcla de fibras	119
Figura 4.43. Diagrama de tensión-deformación a compresión a 120 días de los morteros de cemento con fibra de vidrio	121
Figura 4.44. Diagrama de tensión-deformación a compresión a 120 días de los morteros de cemento con fibra de carbono.....	121
Figura 4.45. Diagrama de tensión-deformación a compresión a 120 días de los morteros de cemento con fibra de basalto	122
Figura 4.46. Diagrama de tensión-deformación a compresión a 120 días de los morteros de cemento con mezcla de fibras	123
Figura 4.47. Diagramas a compresión a 28 días de los morteros de cal hidráulica con fibra de vidrio	125
Figura 4.48. Diagramas a compresión a 28 días de los morteros de cal hidráulica con fibra de carbono.....	125

Figura 4.49. Diagramas a compresión a 28 días de los morteros de cal hidráulica con fibra de basalto	126
Figura 4.50. Diagramas a compresión a 28 días de los morteros de cal hidráulica con mezcla de fibras.....	126
Figura 4.51. Diagramas a compresión a 120 días de los morteros de cal hidráulica con fibra de vidrio	128
Figura 4.52. Diagramas a compresión a 120 días de los morteros de cal hidráulica con fibra de carbono.....	129
Figura 4.53. Diagramas a compresión a 120 días de los morteros de cal hidráulica con fibra de basalto	129
Figura 4.54. Diagramas a compresión a 120 días de los morteros de cal hidráulica con mezcla de fibras.....	130
Figura 4.55. Módulo de elasticidad a flexión para los morteros de cemento	133
Figura 4.56. Módulo de elasticidad a flexión para los morteros de cal hidráulica	133
CAPÍTULO 5	
Figura 5.1. Amasada tipo de 0,028 m ³	138
Figura 5.2. Realización de probetas de prismáticas de 40x40x160 mm.....	139
Figura 5.3. Realización de probetas prismáticas de 100x30x500 mm y 50x50x500 mm	139
Figura 5.4. Realización de probetas cilíndricas de Ø 100x200 mm.....	140
Figura 5.5. Realización de probetas de 100x100x100 mm.....	140
Figura 5.6. Realización de probetas de adherencia	141
Figura 5.7. Realización de probetas de retracción	141
Figura 5.8. Desmoldado de probetas	142
Figura 5.9. Determinación de la resistencia a flexión: a) probeta de 160x40x40 mm, b) probeta de 500x50x50 mm, c) probeta de 500x100x30 mm, d) probeta de 600x150x100 mm	142
Figura 5.10. Resistencia a flexión para los morteros de cemento según el tipo de probeta	143
Figura 5.11. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento para probetas de 160x40x40mm	145
Figura 5.12. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento para probetas de 500x50x50mm	145
Figura 5.13. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento para probetas de 500x100x30mm.....	146

Figura 5.14. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento para probetas de 600x150x100mm.....	146
Figura 5.15. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento de referencia.....	147
Figura 5.16. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento con adición de fibras de vidrio	148
Figura 5.17. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento con adición de fibras de carbono	148
Figura 5.18. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento con adición de fibras de basalto	149
Figura 5.19. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento con adición de fibras mixtas	150
Figura 5.20. Índices de tenacidad últimos de los morteros de cemento en función de la geometría de probeta.....	152
Figura 5.21. Determinación de la resistencia a compresión: a) probeta de 40x40x40 mm, b) probeta de 160x40x40 mm, c) probeta de 100x100x100 mm, d) probeta de Ø100x200 mm	152
Figura 5.22. Resistencia a compresión para los morteros de cemento según el tipo de probeta	153
Figura 5.23. Resistencia a compresión para los morteros de cal hidráulica según el tipo de probeta	154
Figura 5.24. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento para probetas de 40x40x40mm	155
Figura 5.25. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento para probetas de 160x40x40mm	156
Figura 5.26. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento para probetas de 100x100x100mm	157
Figura 5.27. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento para probetas de Ø100x200mm	157
Figura 5.28. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento de referencia	158
Figura 5.29. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento con adición de fibras de vidrio	158
Figura 5.30. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento con adición de fibras de carbono.....	159
Figura 5.31. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento con adición de fibras de basalto	160

Figura 5.32. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento con adición de fibras mixtas	160
Figura 5.33. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica para probetas de 40x40x40mm	163
Figura 5.34. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica para probetas de 160x40x40mm	163
Figura 5.35. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica para probetas de 100x100x100mm	164
Figura 5.36. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica para probetas de Ø100x200mm	164
Figura 5.37. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica de referencia.....	165
Figura 5.38. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica con adición de fibras de vidrio.....	166
Figura 5.39. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica con adición de fibras de carbono	166
Figura 5.40. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica con adición de fibras de basalto.....	167
Figura 5.41. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica con adición de fibras mixtas.....	168
Figura 5.42. Determinación del módulo de Young	170
Figura 5.43. Correlación entre el módulo de Young y la resistencia a compresión de los morteros de cemento	172
Figura 5.44. Correlación entre el módulo de Young y la resistencia a compresión de los morteros de cal hidráulica	172
Figura 5.45. Ensayo de ultrasonidos.....	173
Figura 5.46. Correlación entre la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos y la resistencia a compresión de los morteros de cemento.....	175
Figura 5.47. Correlación entre la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos y la resistencia a compresión de los morteros de cal hidráulica.....	175
Figura 5.48. Determinación de la resistencia a tracción indirecta.....	176
Figura 5.49. Diagrama de tensión-deformación a tracción indirecta de mortero de cemento.....	177
Figura 5.50. Diagrama de tensión-deformación a tracción indirecta de mortero de cal hidráulica	177
Figura 5.51. Comparación de resultados del ensayo a tracción indirecta para los morteros de cemento	178

Figura 5.52. Comparación de resultados del ensayo a tracción indirecta para los morteros de cal hidráulica.....	179
Figura 5.53. a) Péndulo Charpy según norma. b) Péndulo empleado para los ensayos	180
Figura 5.54. Anillo troncocónico	183
Figura 5.55. Marcado del mortero con anillo troncocónico	183
Figura 5.56. Equipo de arrancamiento de pastillas por tracción	184
Figura 5.57. Tipo de rotura a – Rotura adhesiva – rotura en la interfase entre el mortero y el soporte. El valor del ensayo es igual a la resistencia a la adhesión.....	184
Figura 5.58. Tipo de rotura b – Rotura cohesiva – rotura en el mortero. El valor del ensayo es mayor que el valor del ensayo	185
Figura 5.59. Tipo de rotura c – Rotura cohesiva – rotura en el soporte. El valor del ensayo es mayor que el valor del ensayo.....	185
Figura 5.60. Medición de la retracción por secado.....	186
Figura 5.61. Variación de la longitud en función del tiempo para los morteros de cemento.....	188
Figura 5.62. Variación de la longitud en función del tiempo para los morteros de cal hidráulica	188
Figura 5.63. Microscopio electrónico de barrido.....	189
Figura 5.64. Equipo de preparación de muestras.....	189
Figura 5.65. Detalle de la muestra con recubrimiento de oro	190
Figura 5.66. Imagen de electrones retrodispersados (BSE) a 50 aumentos de los morteros de cemento: a) fibras de vidrio, b) fibras de carbono, c) fibras de basalto, d) fibras mixtas	191
Figura 5.67. Imagen de electrones retrodispersados (BSE) a 50 aumentos de los morteros de cal hidráulica: a) fibras de vidrio, b) fibras de carbono, c) fibras de basalto, d) fibras mixtas	192
Figura 5.68. Imagen de electrones retrodispersados (BSE) a 250 aumentos de los morteros de cemento: a) fibras de vidrio, b) fibras de carbono, c) fibras de basalto, d) fibras mixtas	193
Figura 5.69. Imagen de electrones retrodispersados (BSE) a 250 aumentos de los morteros de cal hidráulica: a) fibras de vidrio, b) fibras de carbono, c) fibras de basalto, d) fibras mixtas	194
Figura 5.70. Imagen de electrones retrodispersados (BSE) a 1000 aumentos de los morteros de cemento: a) fibras de vidrio, b) fibras de carbono, c) fibras de basalto, d) fibras mixtas	195

Figura 5.71. Imagen de electrones retrodispersados (BSE) a 1000 aumentos de los morteros de cal hidráulica: a) fibras de vidrio, b) fibras de carbono, c) fibras de basalto, d) fibras mixtas	196
---	-----

CAPÍTULO 6

Figura 6.1. Congelación de probetas previamente saturadas	202
Figura 6.2. Deterioro de las probetas tras el ensayo de heladicidad: a) morteros de cemento, b) morteros de cal hidráulica	203
Figura 6.3. Saturación de probetas en la disolución de sulfato sódico decahidratado	204
Figura 6.4. Deterioro de las probetas tras el ensayo de cristalización de sales: a) morteros de cemento, b) morteros de cal hidráulica	205
Figura 6.5. Cristalización de sales en el interior del mortero	206
Figura 6.6. Secado de probetas en la estufa.....	207
Figura 6.7. Deterioro de las probetas tras el ensayo de choque térmico: a) morteros de cemento, b) morteros de cal hidráulica	207
Figura 6.8. Resistencia a flexión de los morteros de cemento tras los ensayos de envejecimiento acelerado	210
Figura 6.9. Resistencia a flexión de los morteros de cal hidráulica tras los ensayos de envejecimiento acelerado	211
Figura 6.10. Probeta de cal hidráulica con fibra de carbono tras ensayo de cristalización de sales	211
Figura 6.11. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento tras el ensayo de heladicidad	213
Figura 6.12. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento tras el ensayo de cristalización de sales	214
Figura 6.13. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento tras el ensayo de choque térmico	214
Figura 6.14. Índices de tenacidad últimos de los morteros de cemento tras los ensayos de envejecimiento acelerado	216
Figura 6.15. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cal hidráulica tras el ensayo de heladicidad.....	217
Figura 6.16. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cal hidráulica tras el ensayo de cristalización de sales	217
Figura 6.17. Diagrama de tensión-deformación a flexión de los morteros de cal hidráulica tras el ensayo de choque térmico	218
Figura 6.18. Índices de tenacidad últimos de los morteros de cal hidráulica tras los ensayos de envejecimiento acelerado	220

Figura 6.19. Resistencia a compresión de los morteros de cemento tras los ensayos de envejecimiento acelerado	221
Figura 6.20. Resistencia a compresión de los morteros de cal hidráulica tras los ensayos de envejecimiento acelerado	222
Figura 6.21. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento tras el ensayo de heladicidad	223
Figura 6.22. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento tras el ensayo de cristalización de sales.....	224
Figura 6.23. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento tras el ensayo de choque térmico.....	225
Figura 6.24. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica tras el ensayo de heladicidad.....	227
Figura 6.25. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica tras el ensayo de cristalización de sales	227
Figura 6.26. Diagrama de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica tras el ensayo de choque térmico	228
CAPÍTULO 7	
Figura 7.1. Amasado de los morteros	237
Figura 7.2. Proceso de elaboración de los muros	238
Figura 7.3. Aplicación del revestimiento en los muros.....	239
Figura 7.4. Determinación de la resistencia a flexión y compresión	239
Figura 7.5. Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros	241
Figura 7.6. Ensayo a compresión axial sobre probetas de 560x520x120 mm.....	242
Figura 7.7. Ensayo a compresión sobre fábricas de albañilería	243
Figura 7.8. a) Ensayo uniaxial a cortante. b) Fallo de probeta por pérdida de adherencia.....	244
Figura 7.9. Zapata metálica	246
Figura 7.10. Posición de los captadores	246
Figura 7.11. Interpretación del ensayo de compresión diagonal de acuerdo con: a) la norma ASTM, b) el documento RILEM, por la representación del círculo de Mohr ...	248
Figura 7.12. Diagramas de carga desplazamiento de los muros ensayados a 7 días: a) hasta carga máxima, b) hasta carga última.....	249
Figura 7.13. Diagramas de carga-desplazamiento de los muros de referencia ensayados a 28 días: a) hasta carga máxima, b) hasta carga última	250

Figura 7.14. Diagramas de carga-desplazamiento de los muros con revestimiento de morteros de cemento ensayados a 28 días: a) hasta carga máxima, b) hasta carga última.....	250
Figura 7.15. Diagramas de carga-desplazamiento de los muros con revestimiento de morteros de cemento con fibras de vidrio ensayados a 28 días: a) hasta carga máxima, b) hasta carga última	250
Figura 7.16. Diagramas de carga-desplazamiento de los muros con revestimiento de mortero mixto ensayados a 28 días: a) hasta carga máxima, b) hasta carga última..	251
Figura 7.17. Diagramas de carga-desplazamiento de los muros con revestimiento de mortero mixto con fibras de vidrio ensayados a 28 días: a) hasta carga máxima, b) hasta carga última	251
Figura 7.18. Diagramas de carga desplazamiento de los mejores muros ensayados a 28 días: a) hasta carga máxima, b) hasta carga última.....	252
Figura 7.19. a) Efecto de cosido de las fibras. b) W3-RMMFV fisurado y sin desprendimientos	252
Figura 7.20. Ensayo a compresión diagonal. Modo de fallo: D.....	254
Figura 7.21. Ensayo a compresión diagonal. Modo de fallo: ND	254

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1.1. Estado de conservación del Parque edificado español.....	4
Tabla 1.2. Antigüedad del parque edificado español.....	4
Tabla 1.3. Accesibilidad del parque edificado español.....	4

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas de las fibras	24
--	----

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1. Cementos recomendados como morteros de albañilería según RC-08.....	40
Tabla 3.2. Características del cemento empleado	42
Tabla 3.3. Componentes (%) de los cementos comunes utilizados.....	42
Tabla 3.4. Recomendaciones de uso según certificados del fabricante	43
Tabla 3.5. Densidad real del cemento.....	43
Tabla 3.6. Resistencia a compresión de cales hidráulicas naturales según UNE-EN 459-1	45
Tabla 3.7. Características físicas y mecánicas de la cal hidráulica empleada.....	46
Tabla 3.8. Características químicas de la cal hidráulica empleada	46
Tabla 3.9. Características químicas de la cal aérea empleada	47
Tabla 3.10. Densidad real de la cal.....	47
Tabla 3.11. Límites superior e inferior para el árido 0/4. UNE-EN 13139	49
Tabla 3.12. Límite del contenido en finos para el árido 0/4. UNE-EN 13139.....	49
Tabla 3.13. Series numéricas del % que pasa de arena	50
Tabla 3.14. Resultados de equivalente de arena	51
Tabla 3.15. Resultados de la densidad aparente de la arena.....	52
Tabla 3.16. Resultados de la densidad de partículas de la arena	53
Tabla 3.17. Resumen de las características físicas de la arena.....	54
Tabla 3.18. Análisis del agua potable de la ciudad de Madrid 2015 según los datos del Servicio de Aguas del Ayuntamiento de Madrid adjunto al Canal de Isabel II	55
Tabla 3.19. Composición de las fibras de vidrio AR	57
Tabla 3.20. Propiedades mecánicas de las fibras de vidrio.....	57
Tabla 3.21. Propiedades mecánicas de las fibras de carbono	59
Tabla 3.22. Composición de las fibras de basalto por diferentes autores.....	61

Tabla 3.23. Propiedades mecánicas de las fibras de basalto.....	61
Tabla 3.24. Características del Glenium Sky 604.....	62
Tabla 3.25. Requisitos adicionales para morteros con aditivos	64
Tabla 3.26. Características geométricas del ladrillo	65
Tabla 3.27. Contenido de agua de los ladrillos	66
Tabla 3.28. Características aportadas por el fabricante	68
CAPÍTULO 4	
Tabla 4.1. Dosificación en peso del conglomerante y de la arena por m ³	73
Tabla 4.2. Valor del escurrimiento. Norma UNE-EN 1015-2.....	73
Tabla 4.3. Tipos de consistencias y designación. Norma UNE-EN 1015-6	79
Tabla 4.4. Dosificaciones y consistencias de los morteros de cemento y cal hidráulica	80
Tabla 4.5. Densidades aparentes en estado fresco para los morteros de cemento y cal hidráulica	82
Tabla 4.6. Porcentaje de aire ocluido en estado fresco para los morteros de cemento y cal hidráulica.....	85
Tabla 4.7. Densidades aparentes en estado endurecido para los morteros de cemento y cal hidráulica	89
Tabla 4.8. Comparación densidades en estado fresco y endurecido para los morteros cemento y cal hidráulica	90
Tabla 4.9. Coeficiente de absorción de agua por capilaridad para los morteros de cemento y cal hidráulica	93
Tabla 4.10. Resistencia a flexión para los morteros de cemento y de cal hidráulica ...	97
Tabla 4.11. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento.....	104
Tabla 4.12. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a flexión de los morteros de cal hidráulica	108
Tabla 4.13. Clases de mortero según UNE-EN 998-2.....	110
Tabla 4.14. Clases de mortero según UNE-EN 1504-3.....	110
Tabla 4.15. Resistencia a compresión para los morteros de cemento	112
Tabla 4.16. Resistencia a compresión para los morteros de cal hidráulica	114
Tabla 4.17. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión a 28 días de los morteros de cemento.....	120
Tabla 4.18. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión a 120 días de los morteros de cemento.....	123

Tabla 4.19. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión a 28 días de los morteros de cal hidráulica..... 127

Tabla 4.20. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión a 120 días de los morteros de cal hidráulica..... 130

Tabla 4.21. Módulo de elasticidad a flexión de los morteros de cemento y de cal hidráulica 132

CAPÍTULO 5

Tabla 5.1. Dosificación para los morteros de cemento y cal hidráulica 138

Tabla 5.2. Resistencia a flexión de los morteros de cemento según el tipo de probeta 143

Tabla 5.3. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento en función del tipo de probeta 150

Tabla 5.4. Resistencia a compresión de los morteros de cemento según el tipo de probeta 153

Tabla 5.5. Resistencia a compresión de los morteros de cal hidráulica según el tipo de probeta 154

Tabla 5.6. Resultados del análisis de los diagramas de tensión/deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica en función del tipo de probeta..... 161

Tabla 5.7. Resultados del análisis de los diagramas de tensión/deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica en función del tipo de probeta..... 168

Tabla 5.8. Módulo de Young para los distintos tipos de mortero 171

Tabla 5.9. Resultados de la medida de la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos para las distintas mezclas 174

Tabla 5.10. Resultados del ensayo a tracción indirecta para los morteros de cemento..... 178

Tabla 5.11. Resultados del ensayo a tracción indirecta para los morteros de cal hidráulica 179

Tabla 5.12. Energía absorbida en función del tipo de probeta para los morteros de cemento..... 181

Tabla 5.13. Energía absorbida en función del tipo de probeta para los morteros de cal hidráulica 182

Tabla 5.14. Resultados ensayo de resistencia a la adhesión en mortero de cemento..... 185

Tabla 5.15. Resultados ensayo de resistencia a la adhesión en mortero de cal hidráulica 185

Tabla 5.16. Variación de la longitud para los morteros de cemento 187

Tabla 5.17. Variación de la longitud para los morteros de cal hidráulica	187
--	-----

CAPÍTULO 6

Tabla 6.1. Pérdida de masa tras la realización del ensayo de heladicidad	203
--	-----

Tabla 6.2. Pérdida de masa tras la realización del ensayo de cristalización de sales	205
--	-----

Tabla 6.3. Pérdida de masa tras la realización del ensayo de choque térmico	208
---	-----

Tabla 6.4. Resistencia a flexión de los morteros de cemento tras los ensayos de envejecimiento acelerado	209
--	-----

Tabla 6.5. Resistencia a flexión de los morteros de cal hidráulica tras los ensayos de envejecimiento acelerado	210
---	-----

Tabla 6.6. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a flexión de los morteros de cemento tras los ensayos de envejecimiento acelerado	215
--	-----

Tabla 6.7. Resultados del análisis de los diagramas de tensión/deformación a flexión de los morteros de cal hidráulica tras los ensayos de envejecimiento acelerado	219
---	-----

Tabla 6.8. Resistencia a compresión de los morteros de cemento tras los ensayos de envejecimiento acelerado	220
---	-----

Tabla 6.9. Resistencia a compresión de los morteros de cal hidráulica tras los ensayos de envejecimiento acelerado	221
--	-----

Tabla 6.10. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión de los morteros de cemento tras los ensayos de envejecimiento acelerado	225
--	-----

Tabla 6.11. Resultados del análisis de los diagramas de tensión-deformación a compresión de los morteros de cal hidráulica tras los ensayos de envejecimiento acelerado	229
---	-----

CAPÍTULO 7

Tabla 7.1. Dosificaciones de las mezclas utilizadas en el estudio	236
---	-----

Tabla 7.2. Resumen del programa experimental (muestra, N° de muros, tipo, descripción)	237
--	-----

Tabla 7.3. Resistencia a flexión y compresión para los distintos morteros	240
---	-----

Tabla 7.4. Resistencia a la adhesión de los distintos morteros	241
--	-----

Tabla 7.5. Resistencia a la adhesión de los distintos morteros	242
--	-----

Tabla 7.6. Resistencia a la compresión uniaxial	243
---	-----

Tabla 7.7. Resumen de los resultados de las pruebas de caracterización realizadas sobre los materiales empleados	245
--	-----

Tabla 7.8. Resultados de los ensayos de compresión diagonal	253
---	-----