UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN DE MADRID

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN REPARADOS CON MORTEROS DE REPARACIÓN

TESIS DOCTORAL

Olga Pérez Casal
Máster en Innovación Tecnológica en Edificación por la UPM
Arquitecto Técnico

2018

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN DE MADRID

Programa de Doctorado Innovación Tecnológica en Edificación

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ELEMENTOS DE
HORMIGÓN REPARADOS CON MORTEROS DE REPARACIÓN**

TESIS DOCTORAL

AUTORA: Olga Pérez Casal
Máster en Innovación Tecnológica en Edificación por la UPM
Arquitecto Técnico

DIRECTORES:
Dr. Alfonso Cobo Escamilla
Dra. Esther Moreno Fernández

2018

TESIS DOCTORAL

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN REPARADOS CON MORTEROS DE REPARACIÓN

Autora:
Olga Pérez Casal

Directores de Tesis:
Alfonso Cobo Escamilla
Esther Moreno Fernández

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

Presidente D.....

Vocal D

Vocal D

Vocal D

Secretario D.....

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis Doctoral en la Escuela Técnica Superior de Edificación de la UPM:

Calificación:.....

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Madrid, de de 2018

AGRADECIMIENTOS

Pienso que navegar es la actividad más bonita del mundo. Es mi gran fuente de inspiración, que relaciono estrechamente con mi pasión por mi profesión y la Arquitectura. Siempre que se presenta la ocasión me embarco en nuevas travesías. Desde que comencé esta singladura en la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid, me he encontrado con grandes personas que han sido muy importantes a las que quiero dar las gracias:

Quisiera comenzar por mis directores de tesis: D. Alfonso Cobo Escamilla y Dña. Esther Moreno Fernández, por la excelente dirección que han llevado a cabo a lo largo del desarrollo de este trabajo con la total disponibilidad y apoyo prestado en todo momento. Con la paciencia y confianza que me han otorgado ha sido posible que esta tesis arribara a buen puerto.

Gracias a mis profesores, que me enseñaron a aprender y me inculcaron el amor por la profesión y alguno casi sin saberlo, por la Arquitectura:

A Eduardo Medina Sánchez por transmitirme su entusiasmo por la construcción y compartir sus conocimientos, facilitándome los resultados obtenidos en la realización de ensayos previos de las vigas empleadas posteriormente para este trabajo.

A María Aurora Flórez de la Colina por sus ánimos, consejos y sugerencias para la elaboración de ésta tesis.

A Carlos Pérez Zapata porque ha sabido siempre brindarme orientación, recomendándome la importancia de seguir formándome para continuar en la vida académica y por empujarme a seguir adelante, inspirándome a creer que yo podía escribir una tesis.

A Juan José Amador Blanco porque entre memorables viajes de estudio y visitas a obra ha compartido su pasión por la enseñanza, introduciéndome en los ensayos de materiales y ha logrado contagiarme su emoción por la investigación.

A Juan Francisco Padial Molina por su capacidad de hacer que se entienda de forma lúdica lo que a veces es difícil de descifrar y por su atenta lectura de la tesis.

Gracias a mis profesores y amigos de la ETSEM y la ETSAM que han sido parte de esta experiencia y aprendizaje. Por haber compartido su tiempo y porque sin ser conscientes de ello me han dado motivación y ayudado a cumplir este sueño.

Gracias a las personas que me han ayudado maravillosamente en el camino de la burocracia de la tesis, particularmente a Joaquín Santiago López y María del Mar Villafranca Martín.

Gracias a los Técnicos del Laboratorio de Materiales de Construcción Félix Orús de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid por su total disponibilidad, cuya ayuda ha sido fundamental para la realización de las probetas y ensayos mecánicos:

A Javier Acirón Merino y en particular a Santiago Villa Ortega por ser un verdadero maestro que enseña con el ejemplo propio y por mostrar una gran dedicación y sensibilidad en los trabajos de investigación.

En memoria de la profesora Isabel Salto-Weis Azevedo por las traducciones a lengua inglesa realizadas en este trabajo.

Gracias a la Escuela Técnica Superior de Edificación y al Departamento de Construcciones Arquitectónicas y su Control, por el apoyo económico y de medios prestado en todo momento.

A la empresa DRIZORO S. A. por el suministro del mortero de reparación utilizado en este trabajo.

Gracias al Tribunal de Prelectura, formado por Daniel Ferrández Vega, María de las Nieves González García y María Isabel Prieto Barrio, por sus sabias sugerencias de mejora y correcciones de este documento.

Gracias a mi hermana Esther. Por su cariño. Porque no necesita leer la tesis para animarme y decir que es la mejor tesis del mundo.

Gracias a mi padre de todo corazón por estar ahí.

Y gracias a mi madre. A sus sacrificios para que pudiera ser Arquitecto Técnico y a su apoyo paciente para que pudiera terminar esta tesis doctoral. A sus enseñanzas, por transmitirme siempre que la tenacidad y el esfuerzo abren múltiples caminos. A mi madre va dedicada esta tesis.

A todos cuantos dais sentido a ésta tesis: GRACIAS.

A todos, ¡un enorme abrazo!

Olga Pérez Casal

RESUMEN

El deterioro de las estructuras de hormigón armado con anterioridad a la vida útil para la que han sido proyectadas, es un problema habitual en edificación. El origen de ese deterioro obedece a diferentes factores, desde la agresividad del medio a las condiciones de utilización y mantenimiento, siendo necesario conocer el origen de los daños para determinar los materiales y métodos de reparación más adecuados, así como asegurar la durabilidad de las reparaciones.

El objetivo del presente trabajo es comparar el comportamiento de elementos estructurales sometidos a flexión o a compresión, después de su reparación, mediante la sustitución del hormigón deteriorado por mortero de reparación de cemento Portland o mortero modificado con polímeros.

En primer lugar, se han fabricado probetas cúbicas con distintas proporciones hormigón-mortero de reparación para su ensayo a compresión y con los materiales dispuestos tanto en serie como en paralelo. Por otro lado, se han reparado y ensayado a flexión vigas de hormigón armado, con distintas cuantías y tipos de acero, previamente ensayadas a flexión hasta la rotura.

Del análisis de los resultados se puede concluir que los sistemas mixtos hormigón-mortero modificado con polímeros sometidos a compresión, resisten mayores cargas que con el mortero de reparación de cemento Portland, aunque en ningún caso son capaces de restaurar la capacidad de carga del hormigón. En elementos sometidos a flexión, las vigas reparadas son capaces de alcanzar las cargas de rotura de las vigas originales, e incluso mayores.

Por tanto, la reparación de estructuras de hormigón deterioradas mediante morteros de reparación, es una buena alternativa, sobre todo en elementos estructurales sometidos a flexión y realizada mediante morteros de cemento Portland. En estructuras sometidas a compresión, es mejor emplear morteros de reparación modificados con polímeros, los cuales aumentan su ductilidad cuando la reparación se sitúa en serie respecto a la carga.

Palabras clave - mortero de reparación, resistencia a flexión, resistencia a compresión, cuantías, ductilidad, hormigón.

ABSTRACT

Deterioration of reinforced concrete structures prior to the lifetime for which they have been projected is a common problem in construction. The origin of this deterioration is due to different factors, ranging from the aggressiveness of the environment to the conditions of use and maintenance, making it necessary to know the damage origin in order to determine the more appropriate repair materials, repair methods, as well as to ensure the durability of those repairs.

The aim of the present work is to compare the behavior of structural elements subjected to bending or compression after having been repaired, by substituting the deteriorated concrete by Portland cement mortar or mortar modified with polymers.

Firstly, cubic specimens were manufactured with different repair concrete-mortar proportions to be tested to compression, with the materials placed both in series and in parallel. In addition, four concrete reinforced beams, which had previously been tested to bending until fracture, were repaired and tested to bending with different amounts and types of steel.

From the results analysis, it can be concluded that mixed systems - polymer-modified concrete mortar subjected to compression can withstand greater loads than the repair Portland cement mortar, although they are in no case able to restore the load capacity of concrete. In elements subjected to bending, the repaired beams are able to achieve the initial fracture strength of the beams, and support even higher loads.

Therefore, repairing deteriorated concrete structures using repair mortars is a good alternative, especially in structural elements subjected to bending, and performed using Portland cement mortars. In structures subject to compression, it is better to use repair mortars modified with polymers which increase the ductility when the repair mortar is located in series regarding the load.

Keywords – repair mortar, flexure strength, compression strength, quantities, ductility, concrete.

ÍNDICE

RESUMEN	I
ABSTRACT	III
ÍNDICE	V
METODOLOGÍA	1

CAPÍTULO 1.-INTRODUCCIÓN3

1.1 Antecedentes.....	4
1.2 Motivación.....	6
1.3 Objetivos.....	6
1.4 Hipótesis de trabajo	7

CAPÍTULO 2.- ESTADO DEL CONOCIMIENTO9

2.1 Hormigón armado	10
2.1.1 Armaduras del hormigón	10
2.1.2 Patología del hormigón armado	13
2.1.2.1 Causas de deterioro de estructuras de hormigón armado.....	14
2.1.2.2 Reparación de estructuras dañadas de hormigón armado.....	20
2.1.3 Normativa de las estructuras de hormigón armado	25
2.2 Morteros de reparación de estructuras de hormigón	35
2.2.1 Morteros de reparación de base inorgánica	39
2.2.2 Morteros de reparación de base orgánica.....	45
2.2.3 Morteros de reparación de base mixta	47
2.2.4 Técnicas de ejecución	49
2.3 Adherencia entre el hormigón y los morteros de reparación	50
2.3.1 Generalidades.....	50
2.3.2 Factores que influyen en la adherencia.....	51
2.4 Fisuras en el hormigón	52
2.4.1 Causas de fisuración en el hormigón.....	53
2.4.2 Tipos de fisuras	54

CAPÍTULO 3.- TRABAJO EXPERIMENTAL..... 57

3.1 Introducción	58
3.2 Equipos y materiales utilizados.....	60
3.2.1 Equipos empleados	60
3.2.2 Materiales utilizados	60
3.3 Elementos ensayados	64
3.4 Proceso experimental	67
3.4.1 Fabricación de probetas mixtas	67
3.4.2 Preparación de piezas estructurales	71
3.5 Técnicas experimentales	77
3.5.1 Ensayo mecánico a compresión en probetas	77
3.5.2 Ensayo mecánico a flexión en vigas.....	79

CAPÍTULO 4.- RESULTADOS..... 81

4.1 Introducción	82
4.2 Resultados de los ensayos mecánicos a compresión	82
4.2.1 Resultados de los ensayos a compresión de un material	89
4.2.2 Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales.....	91
4.3 Resultados de los ensayos mecánicos a flexión	104
4.3.1 Resultados de los ensayos a flexión de las piezas sin reparar.....	107
4.3.2 Resultados de los ensayos a flexión de las piezas reparadas.....	109

CAPÍTULO 5.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN..... 111

5.1 Introducción	112
5.2 Estudio de los resultados de resistencia a compresión	112
5.2.1 Análisis de los resultados tensión/deformación.....	116
5.2.2 Análisis de variación de la capacidad de carga	118
5.2.3 Análisis de la deformación máxima, ϵ	119
5.2.4 Análisis porcentual de resistencia	120
5.2.5 Análisis del módulo de elasticidad, E	124
5.2.6 Análisis comparativo de la densidad de energía de deformación, U_{max} y U_u	126
5.3 Estudio de los resultados de resistencia a flexión	128
5.3.1 Análisis de los resultados momento flector-flecha	130
5.3.2 Análisis de variación de la capacidad de carga	132
5.3.3 Análisis de la ductilidad.....	133
5.3.4 Análisis de la fisuración	135

CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN..... 145

6.1 Conclusiones	146
6.1.1. Conclusiones sobre el estudio del comportamiento a compresión de probetas de hormigón y morteros de reparación	146
6.1.2 Conclusiones sobre el estudio del comportamiento a flexión de piezas estructurales de hormigón armado reparadas con morteros	147
6.2 Futuras líneas de investigación	148
6.2.1 Futuras líneas de investigación sobre el estudio del comportamiento a compresión de probetas de hormigón y morteros de reparación.....	148
6.2.2 Futuras líneas de investigación sobre el estudio del comportamiento a flexión de piezas estructurales de hormigón armado reparadas con morteros.....	149

BIBLIOGRAFÍA 151

ANEXOS..... 167

Anexo A Tablas de resultados.....	168
Anexo B Índices de calidad de la tesis.....	171
Anexo C Índice de figuras y tablas.....	174

METODOLOGÍA

El presente documento se estructura en nueve capítulos, ordenados de la siguiente manera:

CAPÍTULO 1.- Introducción

Se presentan los argumentos que motivan la elección del tema de estudio, el comportamiento mecánico de secciones mixtas de hormigón-mortero de reparación bajo solicitaciones normales y la importancia relativa en el campo de trabajo del objeto de estudio, indicando los antecedentes del tema, así como cuáles son los objetivos a conseguir de su análisis, la motivación e hipótesis de trabajo.

CAPÍTULO 2.- Estado del conocimiento

Establece un estado de la cuestión previo al trabajo y que ha sido relevante para su desarrollo. Para ello, se parte de una revisión de los trabajos publicados referentes a la reparación de estructuras de hormigón y al empleo de morteros de reparación.

CAPÍTULO 3.- Trabajo experimental

Se describen las características de los medios y materiales utilizados, los elementos ensayados, el desarrollo del proceso experimental y las técnicas experimentales empleadas.

CAPÍTULO 4.- Resultados

Muestra los datos obtenidos en cada una de las fases de estudio durante la realización de ensayos.

CAPÍTULO 5.- Análisis y discusión de los resultados

Se muestra el estudio de los datos obtenidos en los ensayos así como la discusión de los mismos, comparándolos entre sí.

CAPÍTULO 6.- Conclusiones y Futuras líneas de investigación

Se exponen las conclusiones obtenidas en la presente investigación y se plantean nuevas direcciones a seguir en investigaciones futuras.

Bibliografía

Enumera las fuentes bibliográficas consultadas.

Anexos

Recoge tablas de datos correspondientes a los resultados experimentales, la divulgación científica realizada durante la Tesis y una ilustración del trabajo.

1

INTRODUCCIÓN

1	Introducción		
2	Estado del conocimiento		
3	Trabajo Experimental	Ensayos a Compresión	Ensayos a Flexión
4
5			
6	Conclusiones y Futuras líneas de investigación		

1.1 ANTECEDENTES

A pesar de las estrategias de durabilidad seguidas por las distintas normativas (EHE-08; Eurocode 2; ACI-318S-08), el deterioro de las estructuras de hormigón armado con anterioridad a la vida útil para la que han sido proyectadas, es un problema habitual en construcción, tanto en ingeniería civil como en edificación. El origen de ese deterioro obedece a diferentes factores, desde la agresividad del medio a las condiciones de utilización y mantenimiento, siendo necesario conocer el origen de los daños para determinar los métodos de reparación más adecuados, así como asegurar la durabilidad de las reparaciones (Calavera 2005; Fernández 1994).

Para asegurar la durabilidad de la reparación de estructuras de hormigón, es necesario seleccionar los materiales de reparación teniendo en cuenta la compatibilidad química, física, electroquímica, estructural, mecánica y dimensional entre el material de reparación y el hormigón (Emberson y Mays 1990; Mays y Wilkinson 1987; Morgan 1996).

Los morteros de reparación empleados de forma habitual han sido los morteros a base de cemento Portland, pero éstos presentan sus limitaciones. Observándose que en el caso de vigas sometidas a condiciones agresivas en ambientes con cloruros, con el paso del tiempo, los morteros de cemento muestran una excesiva fisuración y son capaces de restaurar sólo el 50% de la capacidad de carga. De ahí que se busquen alternativas que le confieran mejores características, como el micro hormigón, que presenta más resistencia al ingreso de cloruros y no se fisura apenas (Nounu y Chaudhary 1999), morteros modificados con polímeros o morteros a los que se añaden diferentes materiales como fibras de refuerzo, fibras híbridas, vidrio reciclado, fosfato de magnesio o geopolímeros, y que les confieren características determinadas en función del material añadido (Al-Zahrani et al. 2003; Calmon et al. 2014; Dawood y Ramli 2011; Hemanth 2006; Mallat y Alliche 2011; Quanbin et al. 2000; Quiao y Chau 2010).

En cuanto a los morteros con polímeros, sus propiedades están influenciadas por la hidratación del cemento, la asociación entre las fases orgánicas e inorgánicas y la distribución del polímero en el mortero (Kong et al. 2013). Estudios realizados han demostrado que tienden a ser más dúctiles que los morteros de cemento, que su menor módulo de elasticidad da lugar a un menor riesgo de aparición de fisuras por retracción evitando así la formación de grietas en la interfase hormigón-mortero de reparación y que aumentan su durabilidad (Cabrera y Al-Hasan 1997; Hassan, Brooks y

Al-Alawi 2001; Lee, Wang y Chiu 2007; Mechtcherine 2013; Mangat y Limbachiya 1997; Medeiros et al. 2009; Pascal, Alliche y Pilvin 2004; Phoo-Ngernkham et al. 2015; Robery y Shaw 1997; Shash 2005).

Otro aspecto a considerar, es el curado y su influencia en la adherencia hormigón-mortero de reparación, siendo necesario controlar la humedad en la interfase ya puede afectar a la hidratación y producir alta porosidad en la zona (Rashid et al. 2015; Zhou, Ye y Van Breguel 2016). Por otro lado, la adición de polímeros a los morteros de reparación de cemento mejoran su trabajabilidad y para relaciones polímero /cemento del 15% alcanzan su máxima resistencia a flexión, además de aumentar la impermeabilidad y la resistencia a la helada (Hongyan y Zongjin 2013; Mirza, Mirza y Lapointe 2002; Wang, Wang y Li 2005). No obstante, determinados estudios han puesto de manifiesto que también hay factores negativos como son el coste, la toxicidad e inflamabilidad de dicha reparaciones (Fowler 1999; Ohama 1996).

En cuanto a la fisuración de elementos sometidos a flexión, estudios realizados en vigas reparadas con estos morteros modificados con polímeros, muestran que la mayoría rompen a cortante, lo que representa que la aplicación de este tipo de morteros es más eficaz para controlar las grietas a flexión. Las vigas reparadas reforzadas a flexión y cortante, mostraron una mayor rigidez que las vigas reforzadas únicamente a flexión. La aplicación de mayor cantidad de polímero cuando las vigas se someten a carga permanente, puede significar resultados más eficaces (Ahmad et al. 2012). Resulta de gran importancia, evaluar las fisuras producidas en la interfaz mortero-hormigón, su longitud y anchura, así como la adherencia entre ambos. Estudios realizados en este aspecto muestran la influencia directa entre la calidad del mortero de reparación y su comportamiento en la interfaz (Valcuende 1994).

1.2 MOTIVACIÓN

Las estructuras de hormigón tienen una vida útil limitada porque diversos agentes les ocasionan daños que necesitan reparación. Según se expone en el apartado anterior, el estudio del comportamiento de distintos tipos de morteros de reparación en elementos de hormigón está ampliamente desarrollado.

Sin embargo, a pesar de las numerosas investigaciones realizadas, no existen experiencias previas que evalúen el comportamiento mecánico a compresión de secciones mixtas de hormigón-mortero de reparación, teniendo como variables la proporción hormigón-mortero de reparación y su disposición respecto a la dirección de la carga. Por otro lado, tampoco existen estudios previos sobre el comportamiento a flexión, de elementos estructurales dañados hasta la rotura y posteriormente reparados con morteros modificados con polímeros, tanto desde el punto de vista de su resistencia residual como desde el control de su fisuración y deformación (Pérez, Cobo y Moreno 2013). Es por ello, por lo que se plantea la presente tesis doctoral.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es estudiar el comportamiento mecánico de secciones mixtas de hormigón-mortero de reparación bajo solicitaciones normales.

El estudio se va a realizar en dos niveles:

- Estudio de secciones mixtas en probetas cúbicas de 10 x 10 x 10 cm.
- Estudio de piezas estructurales de 10 x 15 x 120 cm. (Vigas isostáticas).

Se pretende comparar el comportamiento de secciones mixtas hormigón-mortero de reparación realizados con morteros de cemento Portland y con morteros modificados con polímeros, sometidos a solicitaciones de compresión o flexión, con el propósito de evaluar las mejores opciones de reparación para cada caso.

Además, tras comparar las características mecánicas y los parámetros de ductilidad, de los dos tipos de morteros de reparación: de cemento Portland y modificado con polímeros, se busca averiguar si ambos morteros de reparación son igualmente válidos.

1.4 HIPÓTESIS DE TRABAJO

Para alcanzar los objetivos propuestos, se llevan a cabo dos campañas de ensayos:

La primera fase consiste en el estudio de secciones mixtas en probetas cúbicas de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, para lo que se sometieron a compresión probetas mixtas de hormigón y morteros tradicionales o de cemento modificado con polímeros, variando las proporciones de mortero. Los ensayos se realizan colocando los materiales en serie y en paralelo (esto es, con la dirección de la carga perpendicular a la unión entre ambos materiales o bien con la carga paralela a dicha unión). Tras la rotura de las piezas, se obtienen los diagramas tensión-deformación de las mismas.

En la segunda fase, se repararon piezas estructurales de hormigón de $10 \times 15 \times 120 \text{ cm}^3$, que anteriormente se habían ensayado a flexión hasta rotura. Estas piezas provienen de una investigación llevada a cabo en una tesis doctoral previa (Medina 2012) consistente en armar vigas de hormigón con diferentes cuantías y distintos tipos de acero. Las cuatro vigas se reparan con dos materiales distintos: un mortero de cemento tradicional y un mortero de cemento modificado con polímeros. De nuevo las vigas se ensayan hasta rotura mediante ensayos de flexión controlando la carrera para obtener los diagramas momento-deformación de cada uno de los casos y examinar la fisuración de las piezas. Se van a comparar dichos resultados con los obtenidos previamente a la reparación y se evaluarán las posibles diferencias de comportamiento antes y después de la reparación de las vigas dañadas.

2

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

1	Introducción general		
2	Estado del conocimiento		
3	Trabajo Experimental	Ensayos a Compresión	Ensayos a Flexión
4
5		Análisis y Discusión	
6	Conclusiones		
7	Futuras líneas de investigación		

2.1 Hormigón armado

Los antecedentes del hormigón armado se suelen remontar hasta el romano "opus caementicium" y en realidad el nacimiento de esta técnica se produce de manera paulatina en muchos lugares simultáneamente, cuando el desarrollo tecnológico del cemento así como de los modos de la puesta en obra, lo permitieron.

Desde el año 1866, comienza a generalizarse el empleo del hormigón armado, cuando Koenen publica un procedimiento de cálculo con aplicación a piezas de hormigón. Inicialmente, en España los cálculos de estructuras de hormigón armado se realizan aplicando tratados clásicos y normas de otros países, sin una normativa específica. En 1939, se aprueba la primera Instrucción de hormigón armado y desde entonces hasta la Instrucción de 1968, se emplea el cálculo clásico para el dimensionamiento de estructuras. A partir de la Instrucción de 1968 se introduce el cálculo en rotura que perdura hasta la actualidad. De esta forma, los métodos de análisis han ido evolucionando aunque sin prestar la misma importancia a los aspectos de durabilidad hasta la publicación de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE en 1998 (Saliger 1944; Grinda 1995).

Paralelamente al rápido crecimiento del empleo del hormigón armado, aparecen daños en las estructuras y la demanda de reparaciones va en aumento.

2.1.1 Armaduras del hormigón

El hormigón es un material que posee alta resistencia a compresión y baja a tracción. Por ello, el hormigón trabaja conjuntamente con armaduras de acero que le aportan la resistencia a tracción y esto es posible debido al mismo rango de valores en que se encuentran las dilataciones térmicas de ambos materiales ($11 \cdot 10^{-6}$ para el acero y $10 \cdot 10^{-6}$ para el hormigón), al mayor módulo de elasticidad del acero frente al hormigón ($2,1 \cdot 10^6$ para el acero y aproximadamente $2,5 \cdot 10^5$ para el hormigón) y al pH alcalino del hormigón, que funciona como capa protectora frente a la corrosión del acero. Para el buen funcionamiento del hormigón armado como material resistente, es importante tener en cuenta las características geométricas, mecánicas y de adherencia de las armaduras, así como el tipo de acero, que se describen a continuación (García 1998; Kang et al. 2018):

- **Características geométricas.** Las barras empleadas en hormigón armado deben carecer de grietas, sopladuras o mermas de sección superiores al 5% y se deben ajustar a la siguiente serie de diámetros nominales $\varnothing$ (mm): 4, 5, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50. Esta serie permite diferenciar visualmente unas de otras evitando confusiones en obra. Las vigas ensayadas en este trabajo, permiten comparar el comportamiento según su armado con barras de 8 y 16 mm.
- **Características mecánicas.** Para definir un acero, las características mecánicas más importantes desde un punto de resistente, son: el límite elástico y la resistencia. Y desde un punto de vista plástico: el alargamiento de rotura y la aptitud al doblado.
- **Características de adherencia.** Las características adherentes del acero vienen condicionadas por la geometría superficial de las barras: número de resaltos, forma, altura y distancia entre ellos.
- **Tipo de acero.** El acero no se puede deformar más allá de ciertos límites con el fin de evitar la fisuración excesiva del hormigón. Ese límite hace que la resistencia del material no sea determinante, por el casi constante valor del módulo de elasticidad. Para el hormigón convencional, aceros de resistencia superiores a los 500 N/mm² no proporcionan más ventajas que los que tienen esa misma resistencia. Los aceros de las armaduras se clasifican por su composición química, en aceros no aleados, aceros inoxidable y otros aceros aleados (Aenor 2001; Carrasco 2017; Medina 2012):

Los aceros no aleados son aquellos cuyo contenido de cualquiera de sus elementos es inferior al valor límite que se da en la Tabla 2.1 (Aenor 2001). En esta clase se incluyen los aceros no aleados de calidad, a los que se les exige requisitos específicos como, tenacidad o deformabilidad. Dentro de éste grupo se encuentra el acero al carbono B-500-SD, el más utilizado como armadura en España y el elegido para la comparativa del comportamiento mecánico con las de acero inoxidable.

Tabla 2.1 Delimitación de las clases de acero no aleado y de acero aleado

Elemento especificado		Contenido límite	Elemento especificado		Contenido límite [% en masa]
Al	Aluminio	0,30	Ni	Níquel	0,30
B	Boro	0,0008	Pb	Plomo	0,40
Bi	Bismuto	0,10	Se	Selenio	0,10
Co	Cobalto	0,30	Si	Silicio	0,60
Cr	Cromo	0,30	Te	Telurio	0,10
Cu	Cobre	0,40	Ti	Titanio	0,05
La	Lantánidos (a)	0,10	V	Vanadio	0,10
Mn	Manganeso	1,65 (b)	W	Tungsteno	0,30
Mo	Molibdeno	0,08	Zr	Circonio	0,05
Nb	Niobio	0,06	-	Otros (c)	0,10

(a) Considerados individualmente.

(b) Cuando el manganeso está definido sólo por un máximo, el valor límite es 1.80 %, y la regla del 70 % (cuando sólo está especificado un valor máximo en la norma, a efectos de clasificación, se debe considerar un valor del 70 % de dicho valor máximo según la Tabla) no se aplica.

(c) Excepto carbono, fósforo, azufre y nitrógeno, cada uno individualmente.

Los aceros inoxidables contienen un mínimo de 10,5 % de cromo y un máximo de 1,2 % de carbono. Estos aceros se subdividen en dos grupos según su contenido en níquel (el níquel es una aleación importante debido al alto costo económico que representa): de bajo contenido en níquel si su contenido es inferior al 2,5%, y los demás aceros inoxidables. Dentro del primer grupo se encuentra la armadura que es objeto de esta tesis.

Por otro lado, según su microestructura, los aceros inoxidables se clasifican en cinco tipos: ferríticos, martensíticos, endurecidos por precipitación, austeníticos y dúplex. En este trabajo se emplean armaduras tipo dúplex. Quizás, el avance más significativo en los últimos años en el sector de la construcción ha sido el empleo de los aceros inoxidables dúplex en aplicaciones estructurales, por su gran resistencia a la corrosión y ofrecer superiores resistencias mecánicas (Badoo 2008; Medina 2012).

Los otros aceros no aleados. Finalmente, dentro de éstos se encuentran aquellos que, sin cumplir la definición de acero inoxidable, superan el valor límite dado en la Tabla 2.1 de uno de sus elementos.

2.1.2 Patología del hormigón armado

Los síntomas patológicos del hormigón armado más comunes, son: aparición de rugosidades superficiales, cambios de coloración, aparición de exfoliaciones o degradaciones superficiales y, sobre todo, aparición de fisuras, punto al cual se dedica el apartado 2.4 (García 1998). Los elementos estructurales de hormigón armado que presentan mayor número de fallos, son las vigas, los forjados y los pilares. El coste de intervención en un elemento estructural, para alcanzar un cierto nivel de seguridad y durabilidad, va creciendo progresivamente cuanto más tarde se haga dicha intervención. Sólo en el Reino Unido se gastan aproximadamente 573 millones de euros anualmente en reparaciones de éstas estructuras (Comett 1995; Nounu y Chaudhary 1999).

Los problemas de durabilidad en el hormigón armado se pueden originar por diversos factores: problemas a nivel de proyecto, ejecución y mantenimiento, o bien por ataques externos o reacciones internas.

En la Figura 2.1 aparece un diagrama con los costes generados por la patología de las estructuras de hormigón armado en función de su origen, procedente de un estudio realizado por el Grupo Español del Hormigón en el año 1992 (Prieto 2012; Maya 1998). Se observa la influencia que llega a tener una mala ejecución sobre las estructuras de hormigón y cómo una tercera parte de las patologías se producen después de solo 10 años de uso, lo que requiere un control que permita que las estructuras se conserven en buen estado durante su vida útil proyectada.

Figura 2.1 Origen de la patología del hormigón

Es por todo lo anterior, que la EHE-08 establece una estrategia de durabilidad en las estructuras de hormigón armado con objeto de asegurar la vida útil para la que han sido proyectadas.

2.1.2.1 Causas de deterioro de estructuras de hormigón armado

El deterioro de las estructuras de hormigón armado, está asociado a una o varias de las siguientes causas que previamente a la reparación, ya se conocen: mala calidad de los materiales, errores de diseño o del proceso constructivo, exposición a condiciones climáticas extremas, acciones físicas y mecánicas, acciones químicas, corrosión de armaduras, acciones accidentales y extraordinarias.

Las principales causas de deterioro del hormigón y que suponen el mayor coste económico son debidas a factores químicos y la corrosión de armaduras, produciendo grietas y desprendimientos en la superficie del hormigón. El principal agente agresivo del hormigón es el agua, por ser el vehículo de transporte de los agentes agresivos al interior del hormigón, además de existir una variedad de procesos nocivos para el hormigón. Los agentes responsables del deterioro del hormigón pueden ser clasificados en cuatro categorías: agentes físicos, mecánicos, químicos y biológicos. Se describen en la Tabla 2.2 (Bilurbina, Liesa e Iribarren 2003; Fernández 1994; Johnson 1973; Ohama 1996; Valcuende 1994).

Tabla 2.2 Agentes responsables del deterioro del hormigón

Ataque físico	Ataque mecánico	Ataque químico	Ataque biológico
Acción hielo/deshielo	Impacto	Reacciones álcalis-áridos	Acciones biológicas
Cambios térmicos	Sobrecargas	Eflorescencias	Acciones bacteriológicas
Cristalización de sales	Movimientos	Filtraciones	
Retracción	Vibraciones	Exposición química agresiva (ácidos, sulfatos...)	
Erosión	Terremotos		

La forma más adecuada de reducir los ataques al hormigón es consiguiendo que sus poros ocupen el menor volumen posible y formen una red capilar que esté poco intercomunicada, lo que implica un buen compactado, una dosificación de cemento relativamente alta y el estudio de la granulometría. Siendo importante vigilar que el

recubrimiento de hormigón sea suficiente y no excesivo, en cuyo caso, la excesiva distancia de las armaduras a la superficie del hormigón en zonas traccionadas, favorecería la aparición de fisuras relativamente abiertas (Blevot 1977).

Se deben eliminar o controlar los factores de deterioro de estructuras de hormigón armado: físicos, biológicos y químicos tanto para el hormigón como la armadura, según indica la Figura 2.2. (Ohama 1996; Shash 2005; Broto 2005).

Figura 2.2 Factores de deterioro de estructuras de hormigón armado

Errores de diseño y ejecución

Los errores en la fase de diseño suelen estar relacionados con asimetrías y cambios bruscos de dimensiones, masas o rigideces.

Los errores de ejecución del hormigón afectan a su compacidad y homogeneidad, y son debidos a varios factores: una inadecuada fabricación del hormigón, la segregación del hormigón durante el transporte y vertido, una compactación deficiente, fugas de material a través del encofrado y falta de recubrimiento de las armaduras.

Ataque de agentes externos

El deterioro de estructuras de hormigón armado es debido tanto al deterioro del hormigón por factores externos a su constitución: ataques de agentes físicos, biológicos y químicos, como a la corrosión de sus armaduras, provocando que el

hormigón se fisure y desprenda. De manera que la pérdida de sección de hormigón supone una reducción de la rigidez del elemento.

- **Deterioro de hormigón**

Los agentes físicos que generalmente suelen causar daños en el hormigón son el agua, el viento y las temperaturas ambientales extremas. Es importante estudiar la disposición de las superficies de hormigón en relación a las lluvias, puesto que los elementos dispuestos horizontalmente facilitan la penetración del agua. La incidencia de las bajas temperaturas en hormigones porosos, llega a manifestar roturas por heladicidad. También se deben tener en cuenta el número de ciclos hielo-deshielo, ya que éste es un factor clave en el deterioro del hormigón.

Los agentes químicos que degradan el hormigón, generalmente son: ataques de ácidos, ataques de aguas puras, reacciones álcalis-áridos y ataques por sulfatos.

Los hidratos del cemento, que son de tipo base, reaccionan con los ácidos cuyo pH sea inferior a 7, formando sal más agua. El peligro que entraña el ácido atacante aumenta con la solubilidad de sus sales cálcicas. Los ácidos más comunes son el ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido nítrico y ácido fluorhídrico, provenientes de aguas negras, aguas carbónicas o aguas ácidas, de la industria química y alimentaria. Por otro lado, la lluvia ácida también ataca al hormigón, formándose ácido sulfúrico que condensa en gotas pudiendo contener óxidos de nitrógeno que pasan a ácido nítrico.

Las aguas puras son aquellas que llevan pocas sales disueltas y su capacidad de disolución es muy elevada, como las aguas procedentes de deshielo. Estas producen la lixiviación, una erosión química por lavado continuo, que disuelve la portlandita del cemento.

Las reacciones álcalis-áridos se generan al reaccionar algunos tipos de áridos con el cemento del hormigón o bien con productos de hidratación del mismo, provocando procesos degenerativos en su interior. Se denomina álcalis al contenido de iones Na^+ y K^+ del cemento, que reaccionan con los áridos reactivos (silíceos, dolomíticos, arcillosos, feldespáticos y áridos finos).

Los sulfatos de sodio, calcio y magnesio son solubles y perjudiciales para el hormigón. Pueden provenir de los áridos, de otros componentes del hormigón, de terrenos con sulfatos o del agua de mar. El ataque se produce como consecuencia de una expansión, por la formación de sustancias sólidas cuyo volumen final es mayor que el de los elementos de la reacción (Barberena 2015; Talero 1991).

Los agentes biológicos también tienen importancia en sus interacciones con el hormigón. La presencia de organismos y microorganismos de origen vegetal o animal pueden producir una variedad de daños de carácter físico, químico, mecánico o biológico.

- **Corrosión de armadura**

Los efectos de la corrosión sobre el acero, se manifiestan con una disminución de su capacidad mecánica por pérdida de sección transversal, disminución de su ductilidad y de su resistencia a fatiga. La causa más generalizada del deterioro de estructuras de hormigón es la corrosión de armaduras, debida a los siguientes factores desencadenantes: carbonatación del hormigón y presencia de iones cloruro.

Se ha comprobado que cuando la causa es un ataque por cloruros, las reparaciones son susceptibles de presentar daños a los pocos años. Cuando el ataque se ha debido a la carbonatación, las reparaciones tienden a comportarse mejor. La mayoría de los casos se han dado en ambientes de humedad media o alta y en ambientes urbanos o marinos en edificios de más de 10 años (Fernández, López y Delibes 1998; GEHO 1992; Otero 1997).

En zonas sumergidas, con hormigones completamente saturados es muy difícil que se produzca la corrosión, debido a la baja concentración de oxígeno en el agua y a su lenta velocidad de difusión hasta el nivel de las armaduras. En hormigones muy secos, el CO₂ encuentra mucha dificultad para reaccionar sin la presencia de humedad. En climas cálidos además, este problema de corrosión es causado debido a una combinación de las condiciones ambientales y adiciones y métodos de construcción inadecuados (Al-Zahrani et al. 2003; Nounu y Chaudhary 1999).

Las armaduras de acero inoxidable poseen excelente resistencia a la corrosión por cloruros, frente a las armaduras de acero al carbono. Se ha demostrado

que la estabilidad de la capa pasiva en ambos aceros es mayor en ambientes con pH altos (García-Alonso, M.C. et al; 2007 b; Gedge 2000).

Carbonatación del hormigón

Es la reacción del dióxido de carbono CO_2 de la atmósfera con sustancias alcalinas de la solución de los poros y con los componentes hidratados del hormigón, que produce un descenso del pH del hormigón por debajo de un valor crítico, no bien definido, que algunos autores sitúan en 9,5. A partir de este valor no se puede garantizar la protección de la armadura (Cobo 2001 b; Bonnet y Rubaud 1976; Schiessl 1984). La carbonatación avanza progresivamente a una velocidad relacionada con la porosidad del hormigón y si hay presencia simultánea de oxígeno y humedad en unas cantidades mínimas, se puede rebasar el recubrimiento de éste, produciendo la pérdida de pasividad de las armaduras (Figura 2.3).

Figura 2.3 Proceso de carbonatación del hormigón

Presencia de iones cloruro

Los iones despasivantes, principalmente cloruros Cl^- penetran en la superficie de hormigón rompiendo la capa de óxido de protección alrededor de la armadura, despasivando así al acero y produciéndose la corrosión.

La penetración de cloruros es un proceso que tiene lugar en los poros rellenos total o parcialmente de agua, siendo un proceso mucho más lento que la carbonatación (Moreno 2008). Produce corrosión en forma de picaduras, con una importante reducción local de la sección de la armadura. Los iones cloruro están presentes en ambientes marinos o aparecen al ser añadidos al hormigón como aditivos (acelerantes de fraguado), o bien se encuentran en la sal que produce el deshielo en carreteras y penetran en el hormigón por difusión

(Fernández 1994; González 1989; GEHO 1993). En la Figura 2.4 se muestra el esquema de la penetración de cloruros en el hormigón desde el exterior por difusión.

Figura 2.4 Penetración de cloruros por difusión en el hormigón

Daños internos del hormigón

Los daños intrínsecos del hormigón se pueden originar por la escasa calidad de los materiales o por acciones mecánicas.

- **Escasa calidad de los materiales**

Los defectos del hormigón están ligados a los defectos de sus componentes, principalmente: la no utilización de cementos del tipo adecuado en función del ambiente de exposición, la inadecuada dosificación del cemento, el contenido de sustancias nocivas en los áridos, el uso de aguas no potables o con impurezas y el empleo de altas relaciones agua-cemento en el amasado.

- **Acciones mecánicas**

Por otro lado, se producen daños estructurales como consecuencia de las tensiones que rebasan la capacidad resistente del hormigón. Los estados tensionales son provocados por fuerzas mecánicas de compresión, tracción, flexión, cortante o torsión. En la investigación realizada por Chellapandian y Prakash (2018) se analizan distintos métodos de reparación en estructuras de hormigón dañadas bajo estas acciones, aportándose información sobre la poca efectividad de las reparaciones con morteros de cemento de fraguado rápido.

Acciones extraordinarias

Son acciones cuya aparición es poco probable pero pueden llegar a colapsar la estructura. Suelen obedecer a causas naturales, como los sismos y asentos del terreno o bien a causas no naturales, como impactos de proyectiles o explosiones y el fuego.

Se incluyen en este apartado otras situaciones que pueden ocasionar importantes daños como son el uso y la falta de mantenimiento de las estructuras de hormigón armado.

El comportamiento de las acciones extraordinarias sobre el hormigón en la actualidad, ha sido investigado por Liu y otros para realizar reparaciones rápidas del hormigón bajo estas acciones ((Liu, Tan y Yao 2018; Wu y Pantelides 2017).

2.1.2.2 Reparación de estructuras dañadas de hormigón armado

La reparación de estructuras dañadas de hormigón armado requiere un estudio previo a la ejecución de los trabajos para elegir el sistema de reparación más conveniente. El proyecto de reparación consta de las etapas de: planificación, proyecto, materiales, ejecución y mantenimiento. Los condicionantes de las tareas a realizar conllevan un importante grado de especialización, tanto del proyectista como de la empresa que ejecuta la reparación, así como de la empresa proveedora del material a emplear.

Actualmente hay un planteamiento de las reparaciones como un sistema global que recoge la eliminación del material deteriorado, preparación del soporte, tipo de mortero de reparación y condiciones de aplicación y acabado y, por lo tanto se hace referencia a sistemas de reparación en lugar de aplicación de un determinado producto como se hacía tradicionalmente. Todo ello requiere un estudio previo para elegir el sistema más conveniente (Aguado y Agulló 1995).

Los pasos a seguir para reparar el hormigón dañado son:

a. Apuntalamiento provisional de la estructura. Sólo cuando la capacidad resistente residual de la estructura no sea suficiente.

b. Eliminación del hormigón deteriorado. Puede llevarse a cabo mediante medios manuales o mecánicos. El sistema de reparación debe comenzar con una preparación adecuada de la superficie del hormigón existente que ha de recibir al nuevo material de reparación, libre de sustancias contaminantes, polvo, membranas

de curado, productos de desmoldeo, etc., siendo imprescindible para obtener una unión eficaz y una reparación durable.

Durante la preparación de las superficies a reparar, es preciso eliminar todo el hormigón de las zonas donde presente síntomas de deterioro ampliando el área a eliminar una distancia de seguridad, antes de la colocación del nuevo material de reparación. La eliminación del hormigón puede realizarse mediante picado manual con puntero, escarificado con martillo de agujas o mediante cualquier otro medio mecánico, manual o neumático. Una consideración importante a tener en cuenta es evitar los ángulos agudos en las superficies de hormigón eliminado para evitar problemas como la fisuración por retracción, debiéndose buscar soluciones con ángulos superiores a 90° (Aguado, Agulló 1995; Cobo 2001 a).

c. Sellado de fisuras y restauración de la capacidad resistente de las armaduras. Hay que observar la superficie del núcleo eliminado de hormigón para detectar posibles fisuras. En caso de que existan, se deben inyectar con resinas epoxi de baja viscosidad. Es recomendable emplear los siguientes tipos de sistemas epoxi, en función del ancho de la fisura:

- Para fisuras de ancho inferior a 0,2 mm: emplear formulaciones epoxi bicomponentes y con viscosidad de unos 100 cP a 20°C.
- Para fisuras de ancho entre 0,2 y 0,6 mm: emplear formulaciones epoxi bicomponentes de viscosidad inferior a 500 cP a 20°C.
- Para fisuras de ancho entre 0,6 y 3 mm: emplear formulaciones epoxi bicomponentes puras o cargadas pero con viscosidad inferior a 1500 cP a 20°C. Como cargas se pueden emplear polvo de cuarzo o de vidrio.
- Para fisuras de anchura superior a 3 mm: Se pueden usar formulaciones epoxi cargadas. La carga puede ser arena con tamaño máximo inferior a 1 mm o 0,6 veces del mínimo espesor de la grieta. Siendo habitual utilizar una relación formulación/árido de 1:1.

En algunos casos, puede ser posible recalcular la estructura o restaurar la capacidad resistente inicial de la armadura, cuando las pérdidas de sección del acero sean superiores al 15%. La restauración de las armaduras se lleva a cabo reemplazando los segmentos de barra debilitados por otros sanos, unidos mediante soldadura o atado con alambres, con una longitud de solape de cuarenta diámetros (Aggelis y Shiotani 2007; Feng 2018; Fukuyama, Higashibata y Miyauchi 2000).

d. Colocación de un material de reparación. En la colocación del material de reparación, se deberá colocar el material más adecuado en función al uso que se le destina.

Son muy numerosos los tipos de mortero de reparación y se agrupan fundamentalmente en tres familias: de base orgánica, de base inorgánica y de base mixta. Entre los factores a tener en cuenta antes de seleccionar un material de relleno para una reparación adecuada y duradera, se destacan los siguientes (Ali et al. 2018; GEHO 1989):

- Nivel de deterioro, causas, evolución y resistencia mecánica del hormigón a reparar.
- Espesor del mortero de reparación a aplicar, tras sanear el soporte.
- Disposición de la reparación. Habitualmente las reparaciones se llevan a cabo en la superficie pero en ocasiones las oquedades se encuentran en el interior.
- Solicitaciones físico-químicas a las que está sometido el elemento estructural, incluidos los cambios térmicos.
- Condiciones ambientales y específicas del soporte de temperatura y humedad, en el momento de la reparación.
- Tiempo disponible para la reparación. Está en función del requerimiento para conseguir las resistencias solicitadas.
- Compatibilidad con el hormigón. Teniendo en cuenta la adecuada compatibilidad química, física, electroquímica, estructural, mecánica y dimensional entre el material de reparación y el hormigón (Emberson y Mays 1990; Mays y Wilkinson 1987; Morgan 1996; Nounu y Chaudhary 1999).

Junto con los factores indicados, se determinarán los costes de los materiales y su aplicación, eligiendo así entre las diversas soluciones técnico-económicas.

e. Aplicación de un tratamiento superficial. Después de la colocación del material de reparación, no es generalmente necesaria la aplicación de tratamientos superficiales. Únicamente puede ser necesario incorporar algún tipo de tratamiento superficial, ante exposiciones ambientales especialmente agresivas. Los materiales superficiales de protección deben poseer las siguientes propiedades: profundidad de penetración,

impermeabilidad a la entrada de agua, expulsión del vapor de agua e impedimento a la penetración de agentes agresivos.

Fundamentalmente, existen cuatro tipos de materiales de protección superficial (Fernández 1994; Moreno 2008):

- **Obturadores de poros.** Estos productos rellenan las fisuras y poros, penetrando en ellos y reaccionando con componentes del hormigón.
- **Pinturas y sellantes.** Son productos impermeabilizantes de protección y forman una película continua sobre la superficie del hormigón.
- **Hidrófugos e impregnantes.** Son productos que cuando se aplican en la superficie del hormigón forman una película muy fina que se adhiere a ella sin cerrar los poros. Reducen la absorción de agua y de sales solubles y permiten la salida del vapor de agua del hormigón.
- **Revestimientos gruesos.** Se utilizan cuando además de necesitarse una protección química, se precisa protección mecánica. Se suelen aplicar con llana o mediante gunitado.

La Figura 2.5 ilustra las ideas anteriores, pudiendo observar las fases de reparación de una viga dañada por corrosión (Cobo 2001 a) y en la Tabla 2.3 Mays y Wilkinson (1987) proporcionan un resumen orientativo de las propiedades mecánicas de cada material de reparación.

Figura 2.5 Fases de reparación de una viga dañada por corrosión

Tabla 2.3 Propiedades mecánicas de los materiales de reparación

Propiedades	Morteros de cemento	Morteros de resina	Morteros de cemento modificado con polímeros
Resistencia a compresión (MPa)	20-50	50-100	30-60
Resistencia a tracción (MPa)	2-5	10-15	5-10
Módulo de elasticidad en compresión (GPa)	20-30	10-20	15-25
Coefficiente de expansión térmica (°C)	10×10^{-6}	$25-30 \times 10^{-6}$	$10-20 \times 10^{-6}$
Absorción de agua (%)	5-15	1-2	0.1-0.5
Temperatura máxima (°C)	>300	40-80	100-300

De la Tabla 2.3 se desprende que existen grandes diferencias en las propiedades mecánicas de los morteros de resina (morteros de base orgánica) en comparación con los morteros de cemento. Los valores en las propiedades mecánicas de los morteros modificados con polímeros tienden a ser intermedios entre los morteros de resina y los morteros de cemento.

2.1.3 Normativa de las estructuras de hormigón armado

Hay un largo proceso de cambio en España en cuanto a normativa de hormigón armado, desde la aparición de la primera Instrucción de Hormigón Armado en el año 1939 hasta la última Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08, en el año 2008 donde se establecen las exigencias que deben cumplir las estructuras de hormigón para satisfacer los requisitos de seguridad estructural y seguridad en caso de incendio, además de la protección del medio ambiente, proporcionando procedimientos que permiten demostrar su cumplimiento con suficientes garantías técnicas, además de recoger temas relacionados con la calidad y la durabilidad de las estructuras de hormigón armado.

Todas las estructuras deben reunir unas condiciones adecuadas de seguridad, funcionalidad y durabilidad con objeto de que puedan rendir el servicio para el que han sido proyectadas. Se denominan estados límites aquellas situaciones tales que, al ser superadas, colocan a la estructura fuera de servicio. Los estados límites se pueden clasificar en (EHE-08 2008; Mº de Obras Públicas 1939):

- **Estados límite últimos (ELU).** Son los que corresponden a la máxima capacidad resistente de la estructura. Se relacionan con la seguridad de la estructura independientemente de la función que ésta cumpla (equilibrio, agotamiento de la sección, pandeo, fatiga, adherencia, anclaje).
- **Estados límites de servicio (ELS).** Corresponden a la máxima capacidad de servicio de la estructura. Se relacionan con la funcionalidad, estética y durabilidad de la estructura y dependen de la función que ésta vaya a cumplir (deformación excesiva, flechas, giros de un elemento estructural, vibraciones, fisuración).

De igual modo, se considera que una estructura durable debe conseguirse mediante una estrategia capaz de considerar todos los posibles factores de degradación, actuando consecuentemente sobre cada una de las fases de proyecto, ejecución y uso de la estructura. La EHE-08 exige para el hormigón armado, una resistencia característica mínima a compresión de cálculo en ambiente no agresivo, de 25 MPa.

Vida útil de una estructura de hormigón armado

Según la Instrucción EHE-08, la vida útil de una estructura es el período de tiempo a partir de su puesta en servicio, durante el que debe mantener unas condiciones de seguridad, funcionalidad y aspecto aceptables. Requiriendo durante este período una conservación normal adecuada, sin operaciones de rehabilitación. En edificación y obra civil, la vida útil de una estructura de hormigón armado debe superar al menos 50 años o 100, en el caso de estructuras con importancia especial y su estimación se realiza teniendo en cuenta los siguientes factores:

- Agresividad del medio. Se clasifica en función de agentes contaminantes y del contenido de humedad.
- Espesor del recubrimiento. Se debe establecer en función de la resistencia del hormigón a la penetración del agente agresivo.
- Límite inaceptable de deterioro. Puede ser la despasivación del acero o el desprendimiento del recubrimiento. La definición de dicho límite varía en función del elemento estructural y de las repercusiones económicas y sociales que implican su deterioro.

Hay varias investigaciones que describen métodos para evaluar y predecir la vida útil de estructuras de hormigón armado (Foraboschi 2015; Somodikova et al. 2016; Muller, Haist y Vogel 2014). El modelo más generalizado de predicción de la vida útil de las estructuras de hormigón armado, es el de Tuutti (1982), referente a uno de los principales problemas que afecta a la durabilidad de las estructuras, la corrosión de las armaduras embebidas en el hormigón. En dicho modelo se fija un nivel máximo inaceptable de deterioro por efecto de la corrosión, asociado con la aparición de grietas. La vida útil de la estructura se obtiene como la suma del período de iniciación " t_i " y del período de propagación " t_{pr} " (Figura 2.6). El período de iniciación se refiere al tiempo transcurrido desde la ejecución de la estructura hasta que las sustancias agresivas ambientales (CO_2 , Cl^- , etc.) alcanzan la armadura, despasivan el acero y se desencadena la corrosión en estado activo. Éste se puede estimar en función de las características del medio agresivo y de la calidad y espesor del recubrimiento de hormigón. El período de propagación es el tiempo que transcurre desde la despasivación hasta que se alcance un nivel de deterioro en el que sea necesaria una reparación.

La velocidad de corrosión en esta segunda etapa depende de la capacidad de los iones Fe^{2+} y OH^- para migrar entre zonas catódicas y anódicas, la disponibilidad de oxígeno y agua en la interfase acero/hormigón, la solubilidad que posean los productos de corrosión y de las condiciones ambientales. Dicha etapa resulta difícil de modelizar por los distintos tipos de productos de corrosión que se forman y su diferente distribución en la armadura y en el recubrimiento, factores que determinan dónde y cuándo se fisurará, produciéndose el desprendimiento del hormigón. Por este motivo, la mayoría de las predicciones de la vida útil de las estructuras de hormigón armado, se basan en determinar el tiempo requerido de inicio de la corrosión " t_i " (Andrade, Alonso y Molina 1993; Tuutti 1982).

Figura 2.6 Proceso de corrosión del acero en hormigón (Modelo de Tuutti)

La experiencia demuestra la difícil predicción real del nivel de deterioro y particularmente en el caso de corrosión de las armaduras, esto es debido a la gran variabilidad de los factores que influyen en el progreso de los daños.

En consecuencia, una forma de garantizar la durabilidad del hormigón, consiste en obtener un hormigón con una permeabilidad reducida. Para ello, son decisivos los siguientes factores que influyen en la calidad del hormigón: dosificación, elección de una relación agua/cemento baja, adiciones, adecuada compactación, contenido idóneo de cemento y la suficiente hidratación de éste, obtenida con un cuidadoso curado (Liang y Wang 1999).

Durabilidad de las estructuras de hormigón armado

En el artículo 37 de la EHE-08 se define el concepto de durabilidad de una estructura de hormigón, como su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y solicitaciones consideradas en el análisis estructural.

Para conseguir una estructura durable, la EHE-08 señala que debe conseguirse con una estrategia que considere todos los factores posibles de degradación y actuar consecuentemente sobre cada una de las fases de proyecto, ejecución y uso de la estructura. Una estrategia correcta para la durabilidad debe tener en cuenta el tipo de ambiente al que vaya a estar sometido el elemento estructural a lo largo de su vida útil, por lo que la Instrucción EHE-08 clasifica las clases de exposición en el artículo 8.2 por la combinación de:

- **Una clase general de exposición**, relativa a la corrosión de armaduras, de acuerdo con la Tabla 2.4 (Tabla 8.2.2. de la EHE-08).
- **Las clases específicas de exposición** relativas a los otros procesos de degradación distintos de la corrosión de armaduras, definidas en Tabla 2.5 (Tabla 8.2.3.a de la EHE). En estructuras sometidas a ataque químico (clase Q), la agresividad se clasificará de acuerdo a los criterios establecidos en la Tabla 2.6 (Tabla 8.2.3.b de la EHE-08).

Tabla 2.4 Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras
Tabla 2.4 Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				Descripción
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso	
Normal	No agresiva	I	Ataque químico	-Interiores de edificios no sometidos a condensaciones.
	Humedad alta	IIa	Corrosión de origen diferente de los cloruros	-Interiores sometidos a humedades relativas medias altas (>65%) o a condensaciones.
				-Exteriores en ausencia de cloruros y expuestos a lluvia con precipitación media anual >600 mm. -Elementos enterrados o sumergidos.
Marina	Humedad media	IIb	Corrosión de origen diferente de los cloruros	-Exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a lluvia con precipitación media anual <600 mm.
		IIIa	Corrosión por cloruros	-Estructuras marinas, por encima del nivel de pleamar. -Elementos exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5 Km).
	Sumergida	IIIb	Corrosión por cloruros	-Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel de bajamar.
	En zona de mareas	IIIc	Corrosión por cloruros	-Estructuras marinas en la zona de carrera de mareas.
	Con cloruros de origen diferente del medio marino	IV	Corrosión por cloruros	-Instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua y alto contenido de cloruros, no marinos. -Superficies expuestas a sales de deshielo.

Tabla 2.5 Clases específicas de exposición relativas a otros procesos de deterioro distintos de la corrosión.
Tabla 2.5 Clases específicas de exposición relativas a otros procesos de deterioro distintos de la corrosión

CLASE ESPECÍFICA DE EXPOSICIÓN				Descripción
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso	
Química agresiva	Débil	Qa	Ataque químico	-Elementos en ambiente con sustancias químicas que alteran el hormigón con velocidad lenta.
	Media	Qb	Ataque químico	-Elementos en contacto con agua de mar. -Elementos en ambientes con sustancias químicas que alteran el hormigón con velocidad media.
	Fuerte	Qc	Ataque químico	-Elementos en ambiente con sustancias químicas que alteran el hormigón con velocidad rápida.
Con heladas	Sin sales fundentes	H	Ataque hielo-deshielo	-Elementos situados en contacto frecuente con agua, o zonas con humedad relativa media ambiental en invierno superior al 75% y probabilidad anual > 50% de alcanzar una vez temperaturas por debajo de -5°.
	Con sales fundentes	F	Ataque por sales fundentes	-Elementos destinados al tráfico de vehículos o peatones en zonas con más de 5 nevadas anuales o con valor medio temperatura mínima de invierno <0°.
Erosión		E	Abrasión cavitación	-Elementos sometidos a desgaste superficial. -Elementos de estructuras hidráulicas.

Tabla 2.6 Clasificación de la agresividad química

Tipo de medio agresivo	Parámetros	Tipo de exposición		
		Qa Ataque débil	Qb Ataque medio	Qc Ataque fuerte
Agua	Valor del pH	6,5 - 5,5	5,5 - 4,5	<4,5
	CO ₂ agresivo (mg CO ₂ /l)	15 - 40	40 - 100	>100
	Ión amonio (mg NH ₄ ⁺ /l)	15 - 30	30 - 60	>60
	Ión magnesio (mg Mg ²⁺ /l)	300 - 1000	1000 - 3000	>3000
	Ión sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /l)	200 - 600	600 - 3000	>3000
	Residuo seco (mg/l)	75 - 150	50 - 75	<50
Suelo	Grado de acidez Baumann - Gully	>20	(*)	(*)
	Ión sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /Kg de suelo seco)	2000 - 3000	3000 - 12000	>12000

(*) Estas condiciones no se dan en la práctica

Todo elemento estructural está sometido a una clase general de exposición y a ninguna, una o varias clases específicas de exposición. Los elementos de hormigón en masa tienen siempre una clase general de exposición I (no agresiva), dado que la inexistencia de armaduras impide cualquier posibilidad de corrosión, pudiendo estar además, según el caso, sometidas a clases específicas.

La clase general normal, designada como II, corresponde básicamente a los problemas de corrosión que se pueden producir en las armaduras como consecuencia de la carbonatación del hormigón, si bien incluye además elementos enterrados o permanentemente sumergidos. En el caso de que la corrosión sea inducida por cloruros, las clases generales de exposición son la III y la IV, según sea marino o no, el origen del ión.

Como la velocidad de penetración del CO₂ o del ión cloruro a través de la red de poros del hormigón depende de muchas variables, se han dividido las clases generales II y III en subclases específicas de exposición, en función del grado de humedad del ambiente y de la proximidad y situación de la estructura con respecto a la costa.

Las clases específicas de exposición se dividen en I (no agresiva), Q (ataque químico), F (helada en presencia de fundentes), H (helada sin presencia de fundentes) y E (erosión).

Una vez queda definido el tipo de ambiente, la estrategia de durabilidad, se basará en el cumplimiento de los siguientes principios (según el artículo 37 de la EHE-08):

- **Selección de formas estructurales adecuadas.** Se eligen formas estructurales que aislen del agua, ya que la presencia de agua puede producir ataques químicos o físicos y condicionar otros procesos patológicos como la corrosión.
- **Requisitos mínimos de calidad del hormigón.** Se seleccionan las materias primas de acuerdo a las exigencias que define la Instrucción. En función de la clase de exposición a la que esté sometido el hormigón, se fija la máxima relación agua/cemento (a/c), el contenido mínimo de cemento y la resistencia mínima a compresión del hormigón a emplear (Tabla 2.7).

Tabla 2.7 Requisitos de durabilidad del hormigón: Máxima relación a/c, mínimo contenido de cemento y resistencia mínima, en función de la clase de exposición

Clase de exposición	Máxima relación a/c	Mín. contenido de cemento (Kg/m ³)	Resistencia a compresión mínima (N/mm ²)
IIIa	0,5	300	30
IIIb	0,5	325	30
IIIc	0,45	350	35
Qb	0,5	350	30

- **Adopción de un espesor de recubrimiento adecuado.** Para armaduras pasivas se mantendrán los siguientes recubrimientos:

Cuando se trata de armaduras principales, el recubrimiento deberá ser igual o superior al diámetro de dicha barra (o diámetro equivalente si se trata de un grupo de barras) y a 0,80 veces el tamaño máximo del árido empleado, salvo que la disposición de armaduras respecto a los paramentos dificulte el paso del hormigón, en cuyo caso se tomará 1,25 veces el tamaño máximo del árido.

Para cualquier clase de armaduras pasivas (incluso estribos) el recubrimiento no será, en ningún punto, inferior a los valores mínimos recogidos en la Tabla 2.8

(Tabla 37.2.4 de la EHE) en función de la clase de exposición ambiental y de la resistencia característica del hormigón (f_{ck}). Para garantizar estos valores mínimos, se prescribirá en el proyecto un valor nominal del recubrimiento r_{nom} , donde:

$$r_{nom} = r_{mín} + \Delta r$$

r_{nom} : Recubrimiento nominal. Es el valor que debe prescribirse en el proyecto y reflejarse en los planos, y que servirá para definir los separadores.

$r_{mín}$: Recubrimiento mínimo.

Δr : Margen de recubrimiento, en función del tipo de elemento y del nivel de control de ejecución, su valor es de: 0 mm en elementos prefabricados, con control de ejecución intenso; 5 mm en elementos contruidos in situ, con control de ejecución intenso; 10 mm para otros casos.

Tabla 2.8 Recubrimientos mínimos según la clase de exposición

Resistencia característica (N/mm ²)	Tipo de elemento	RECUBRIMIENTO MÍNIMO (mm)			
		IIIa	IIIb	IIIc	IV
$20 \leq f_{ck} < 40$	General	35	35	40	35
	Elementos prefabricados y láminas	30	30	35	30
$f_{ck} \geq 40$	General	30	30	35	30
	Elementos prefabricados y láminas	25	25	30	25

El espesor del recubrimiento es de vital importancia, ya que el período durante el que el hormigón del recubrimiento protege a las armaduras es función del cuadrado de su espesor, de ahí que estén fijados los recubrimientos mínimos que se pueden emplear en función de la clase de exposición, tipo de armadura, tamaño máximo del árido, etc. El espesor mínimo del recubrimiento está íntimamente ligado con la resistencia del cemento y su compacidad y, por tanto, con su impermeabilización.

Estudios realizados muestran como la utilización de hormigones muy compactos y de altas resistencias, ofrecen mejores comportamientos frente a la durabilidad para los mismos espesores del recubrimiento (Burón 2004; Prieto 2012). Por tanto, la calidad del hormigón determina la durabilidad del mismo, la cual está íntimamente relacionada con su permeabilidad, ya que por la red de

poros que posee el hormigón se introducen los agentes agresivos que minimizan su durabilidad.

- **Control del valor máximo de abertura de fisura.** Se fijan los valores máximos en función de los distintos ambientes y del tipo de hormigón, de acuerdo con la Tabla 2.9 (Tabla 37.2.6.de la EHE-08). A mayor anchura de fisura, con mayor rapidez se introducen las sustancias nocivas exteriores, aumentando la velocidad de corrosión de las barras de acero.

Tabla 2.9 Valor máximo de abertura de fisura ($w_{\text{máx}}$)

Clase de Exposición	$w_{\text{máx}}$ (mm) Hormigón armado
I	0,4
IIa, IIb, H	0,3
IIIa, IIIb, IV, F	0,2
IIIc, Qa, Qb, Qc	0,1

La limitación del ancho de fisura por motivos de durabilidad reflejadas en los códigos, resulta polémica y dudosa para algunos autores. Por un lado, las fisuras reducen la vida en servicio, acelerando la iniciación y propagación de la corrosión. Por otro lado, para anchos de fisura inferiores a 0,4 mm, la autocicatrización de las fisuras provocada por los depósitos de suciedad y por los propios productos de corrosión, acaba reduciendo sensiblemente, la permeabilidad de las mismas. A ello debe añadirse el hecho de que la velocidad de corrosión viene controlada por los procesos catódicos que se desarrollan en las áreas próximas a las fisuras y que dependen de la permeabilidad del recubrimiento del hormigón.

Cuando existen estribos, las fisuras tienden a producirse en los planos de ubicación de éstos, dada la discontinuidad que provocan en el hormigón. (Chang, Peng y Hwang 2001).

2.2. Morteros de reparación de estructuras de hormigón

Durante la primera mitad del siglo XX, gran parte de los trabajos de reparación del hormigón llevados a cabo, se realizaban con morteros tradicionales a base de cemento portland. En la década de 1920, se introducen polímeros en los materiales cementantes con objeto de mejorar las propiedades de adherencia, flexibilidad y trabajabilidad, apareciendo el cemento modificado con polímeros. Desde 1960 se introducen nuevos materiales de reparación del hormigón que permiten elegir en función de sus propiedades, el sistema más compatible con la estructura existente para asegurar su durabilidad (Figura 2.7) (Emmons, Vaysburd y McDonald 1993; Kong et al. 2013; Lefebure 1924; Morgan 1996).

Actualmente se pueden encontrar en el mercado numerosos tipos de morteros de reparación. Son varios los autores (GEHO 1989; Mays y Wilkinson 1987) que hacen una clasificación de los mismos. En la Figura 2.8 se clasifican los morteros de reparación en tres familias principalmente: morteros de base inorgánica basados en cemento (entre ellos, los morteros hidráulicos tradicionales a base de cemento portland y los morteros hidráulicos no tradicionales como el cemento de fosfato o magnesio o el cemento aluminoso), morteros de base orgánica basados en polímeros puros (como las resinas epoxi, poliésteres y poliuretanos) y morteros de base mixta basados en cemento portland modificado con polímeros (principalmente estireno-butadieno, acrílicos y algunos copolímeros vinílicos). Aparecen sombreados en color azul y rojo, los morteros de reparación empleados en este trabajo.

Figura 2.7 Factores que afectan a la durabilidad de reparaciones de hormigón

Figura 2.8 Clasificación de los tipos de morteros de reparación

De toda la variedad de materiales existentes, el mortero de cemento posee unas propiedades mecánicas similares al hormigón y se podría considerar el material de reparación más apropiado para alcanzar la compatibilidad con la estructura de hormigón (Morgan 1996). Sobre éste punto de vista, Plum (1991) señala que se corre el riesgo de rechazar las grandes ventajas ofrecidas por otros materiales de reparación alternativos, pues siendo el mortero de cemento portland el material idóneo para algunos tipos de reparaciones, hay situaciones donde este enfoque podría no ser suficiente. Además, cuando el hormigón existente es de mala calidad, se debe cuestionar seriamente su reparación con un hormigón de calidad equivalente.

Considerando el empleo de los morteros de reparación según su exposición, en reparaciones de superficies verticales o elevadas, sería adecuado aplicar un mortero de reparación de cemento modificado con polímeros, que posee una gran adhesión. Si el hormigón original se ha deteriorado como consecuencia de condiciones agresivas tales como alto desgaste o ataque químico, puede ser más apropiado utilizar un mortero de reparación de resina, de mayor resistencia y más resistente a los químicos. En caso de que la reparación se lleve a cabo en condiciones de temperaturas bajas extremas, se requieren materiales de reparación especiales con alto calor de reacción, como los morteros de resina, morteros de cemento de fosfato y magnesio o cemento aluminoso. Aunque algunos autores han mostrado que algunos materiales no actúan adecuadamente en estructuras hidráulicas cuando se exponen a condiciones climáticas duras. Es el caso de los morteros de resina, que no son compatibles térmicamente con el soporte de hormigón (tienen una amplia variación en el coeficiente de expansión térmica comparado con el hormigón) y presentan baja unión a superficies húmedas de hormigón. Sin embargo, los morteros de cemento modificados con polímeros han demostrado un comportamiento aceptable por su compatibilidad con el hormigón y son adecuados para reparar superficies de hormigón en condiciones climáticas extremas (Mirza y Durand 1992; Mirza, Mirza y Lapointe 2002).

En definitiva, no hay un mortero de reparación ideal y puede haber más de una solución correcta. Se deben evaluar las condiciones físicas y químicas a las cuales será expuesto el mortero de reparación así como su compatibilidad con el hormigón, antes de decidir qué tipo de material de reparación utilizar. En la Tabla 2.10 se muestran los campos de aplicación de los morteros de reparación que se describen en el presente trabajo, en función de la extensión de la zona a reparar (Broto 2005).

Tabla 2.10 Aplicación de morteros de reparación, según espesores y áreas

POSIBLES MATERIALES DE REPARACIÓN	Espesor recubrimiento (mm)						Vertido o Inyección	Ligantes para adherir
	Grandes áreas				Pequeñas áreas			
	60-100	25-60	12-25	6-12	12-25	6-12		
Lechada							•	•
Mortero			•	•	•	•	•	
Hormigón y Microhormigón	•						•	
Hormigón proyectado		•						
Mortero modificado con expansivos				•	•	•	•	
Mortero fosfato de magnesio		•						
Mortero epoxi				•	•	•	•	•
Mortero poliuretano				•	•	•	•	•
Mortero poliéster						•		
Mixtos con polímeros termoplásticos			•	•	•	•		•
Mixtos con polímeros termoestables			•	•	•	•		

El rápido crecimiento de la industria de la reparación en los últimos 30 años, ha mejorado los materiales de reparación y sus controles de calidad contribuyendo a mejorar la vida útil de las estructuras, reduciendo los costes de reparación (Emmons y Sordyl 2006).

2.2.1 Morteros de reparación de base inorgánica

Son aquellos cuya base es el cemento. Se clasifican en morteros hidráulicos tradicionales y morteros hidráulicos no tradicionales.

Morteros hidráulicos tradicionales

En los morteros hidráulicos tradicionales, el ligante inorgánico es a base de cemento portland. El cemento portland es el material más empleado en construcción por diversas razones: la conservación de recursos, la seguridad, durabilidad, la posibilidad

de producción con materiales locales y el menor costo comparado con otras alternativas.

En reparación de estructuras dañadas se han usado morteros y hormigones de cemento portland sin ninguna precaución, obteniendo resultados insatisfactorios. El principal motivo que ha causado el poco éxito de estas reparaciones ha sido el no tener en cuenta los cambios de volumen que experimenta la pasta durante el fraguado. Esto ha provocado la aparición de tensiones en la interfase hormigón-mortero de reparación, disminuyendo la adhesión entre ambos materiales y produciéndose el agrietamiento y la separación. Para evitar esto, con el mortero de cemento portland empleado, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones básicas: presentar la mínima retracción, cuidando la dosificación de sus componentes, asegurar una buena adherencia al hormigón y resistir a los agentes agresivos que provocan el deterioro del hormigón.

Los cementos más adecuados son aquellos cuya resistencia característica oscila, entre 35 y 45 N/mm² y poseen finuras Blaine inferiores a 4000 cm² /g, para obtener retracciones mínimas. Todos ellos se pueden utilizar en forma de lechada, mortero, microhormigón y hormigón (Carrasco 2017).

- **Lechada**

Es el material formado por cemento y agua. Se emplea en reparaciones de dos formas: la ligera y la densa.

La lechada ligera posee una relación agua-cemento del orden de la unidad. Se aplica por decantación de los granos de cemento, siendo recomendable la utilización de aditivos para reducir la exudación. Se aplica para el relleno de fisuras de ancho inferior al milímetro, generalmente cuando la inyección no es aconsejable por motivos de dimensiones, temperatura, presencia de agua, etc.

La lechada densa posee una relación agua-cemento del orden de 0,5. Se coloca por vertido o por bombeo. Se aplica en el relleno de grietas de espesores superiores a 1 mm. Otra aplicación es en rellenos de grietas y coqueras de espesor variable, como complemento de morteros colocados por bombeo. En este tipo de lechada también es recomendable el uso de aditivos.

- **Mortero**

El mortero es el material compuesto por cemento, agua y árido con tamaño máximo 5 mm. Cuando se utiliza como material de reparación es conveniente disminuir su relación agua-cemento mediante el empleo de aditivos. En el mercado se encuentran envasados, predosificados y listos para usar.

Las propiedades del mortero de cemento portland dependen de diversos factores: tipo y finura del cemento, las dosificaciones cemento-árido y agua-cemento, las características y granulometría del árido, las condiciones de curado (tiempo, humedad y temperatura) y el tipo y dosificación del aditivo.

Los áridos no toman parte activa del fraguado y endurecimiento del mortero, aunque según su origen y naturaleza, le confieren resistencia y durabilidad.

En cuanto al agua de amasado se debe emplear la mínima cantidad posible para conseguir un material de trabajabilidad adecuada; menores relaciones agua-cemento proporcionan materiales menos porosos y más resistentes. A su vez, el curado da mejores resultados con alta humedad relativa, lo que evita la evaporación temprana del agua de amasado, con su consiguiente retracción y disminución de resistencias y favoreciendo las reacciones de hidratación del cemento.

Los aditivos son materiales artificiales o naturales que añadidos al cemento en la mezcla de mortero, aportan diferentes propiedades.

- **Microhormigón**

Es el tipo de mortero más empleado en trabajos de reparación, con unas características mecánicas muy superiores a las del mortero de cemento portland. Estos morteros se colocan por bombeo donde el árido pasa por el tamiz de 2,4 mm de luz de malla. No se puede realizar su compactación.

Para relaciones agua-cemento de 0,69 y se emplean 500 kg de cemento por metro cúbico, se alcanzan unas características resistentes similares a un hormigón H-20. Para relaciones agua-cemento de 0,56 con dosificaciones de 650 kg de cemento, se consiguen las características de un H-40. (Varhen, et al. 2016).

- **Hormigón**

Es el material formado por cemento, árido fino, árido grueso y agua. Es un material resistente a la acción de la intemperie y permeable a líquidos y gases. Su resistencia mecánica depende de su composición y ejecución (agregado, compactación, dimensión del elemento, etc.) y fundamentalmente de la relación agua-cemento en peso, empleada. En un hormigón, el agua a añadir al cemento es superior cuanto más porosos y finos sean los áridos. Para su uso como material de reparación es fundamental el empleo de algún tipo de aditivo que anule su retracción.

Se debe prestar atención a la porosidad del hormigón, la presencia de fisuras o el escaso espesor de recubrimiento sobre la armadura.

Cuanta mayor sea la porosidad, más fácilmente penetrarán los gases y el agua en el hormigón y se deteriorará aún más si se expone a ciclos de hielo-deshielo. Es importante destacar que un aumento de la relación agua-cemento, aumenta tanto el porcentaje de porosidad abierta como el diámetro de los capilares.

El escaso espesor de recubrimiento de hormigón es una causa frecuente de la prematura oxidación de las armaduras. El espesor mínimo de recubrimiento sobre la armadura debe ser 20 mm. Tras iniciarse la oxidación, se propaga rápidamente y de ahí la importancia de detectarlo a tiempo.

La baja resistencia a tracción que posee el hormigón favorece su fisuración. El ancho aceptable de fisuras depende de las condiciones ambientales a las que vaya a estar expuesto el elemento de hormigón.

Morteros hidráulicos no tradicionales

Los morteros hidráulicos no tradicionales son aquellos cuyo ligante inorgánico es un cemento portland modificado con agentes expansivos o un cemento no portland. Estos materiales experimentan un aumento de volumen después de fraguar que compensa la retracción o incluso pueden generar una expansión, produciendo compresión en el hormigón, afirmando su adhesión (Figura 2.9) (Cobo 2001 a).

Figura 2.9 Comparación de las curvas de curado para pastas de cemento portland, pastas de cementos expansivos y pastas de cemento con la expansión controlada

Los morteros hidráulicos no tradicionales también pueden contener fibras para disminuir la retracción o aumentar sus propiedades mecánicas. Se pueden clasificar en cuatro tipos, según el constituyente base que utilicen:

- **Cemento portland modificado con agentes expansivos**

Son morteros fabricados con cemento portland y adicción de otros agentes expansivos con objeto de compensar la retracción del secado y de confinar el material con el hormigón a reparar.

Los agentes más utilizados que producen una expansión controlada, son óxidos que aumentan de volumen al hidratarse (generalmente óxidos de hierro) o sustancias que producen burbujas de gas (como el polvo de aluminio en contacto con el hormigón).

- **Cemento a base de fosfato de Magnesio o Aluminio**

Los morteros a base de estos cementos son principalmente óxido de magnesio (MgO) y fosfatos amónico y de aluminio ($NH_4H_2PO_4$ o $Al(H_2PO_4)_3$) que cuando reaccionan con el agua producen fosfato amónico magnésico hidratado ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$).

Necesitan poca cantidad de agua de amasado, pues cantidades grandes provocan exudación y disminución de resistencias. Alcanzan resistencias mecánicas elevadas al cabo de una hora (20 N/mm^2) y una densidad final similar a la del mortero de cemento portland ($2100\text{-}2200 \text{ Kg/m}^3$). Poseen

características autonivelantes que hacen relativamente fácil su puesta en obra, ya que además necesitan poca compactación (Mo, et al. 2014; Mo, et al. 2015).

- **Cemento aluminoso**

También llamado cemento a base de aluminatos cálcicos. En caso de que sea necesario conseguir fraguados rápidos, se emplean mezclas de cemento aluminoso y portland, alcanzando a su vez elevadas resistencias mecánicas. Su riesgo de deterioro y cambio de color en climas cálidos y húmedos, por transformación de los aluminatos, hacen que su uso sea limitado. Se suelen utilizar fundamentalmente en reparaciones temporales, como el taponamiento inmediato de vías de agua en tuberías o depósitos (Li, et al. 2013).

- **Cemento de etringita**

También llamado cemento a base de sulfoaluminatos. Es un cemento con contenido en etringita o sulfoalumainatos expansivos. Se parte de diversas mezclas y proporciones de compuestos de aluminio (cenizas volantes), sulfato cálcico y óxido de calcio para obtener cementos con distintos porcentajes de expansión, los cuales se trabajan de manera similar a los morteros tradicionales.

En la Tabla 2.11 se dan algunos valores orientativos para estos materiales (Li 2018). Todos ellos suelen encontrarse en el mercado en forma de morteros listos para su uso, mezclándose con agua en las proporciones especificadas por el fabricante y se colocan habitualmente de forma manual o mediante proyección o bombeo.

Tabla 2.11 Valores orientativos de los materiales de base inorgánica no tradicionales

Propiedad	Rango	Valor típico
Expansión a 28 (%)	0,01-0,10	0,05
Resist. compresión a 24 h (MPa)	5,7-27,3	21
Resist. compresión a 28 días (MPa)	35-81,2	49
Resist. flexotracción a 28 días (MPa)	Hasta 9,3	
Módulo de elasticidad a 28 días (MPa)		30.000
Adherencia al hormigón a 28 días (MPa)		3,5

2.2.2 Morteros de reparación de base orgánica

En los morteros de reparación de base orgánica, su ligante orgánico es a base de polímeros termoestables (resinas). Los termoestables más empleados son los basados en las siguientes resinas reactivas:

- Epoxi (EP)
- Poliuretanos (PUR)
- Poliésteres no saturados. Incluyendo las acrílicas reactivas (PNS).

El ligante del polímero termoestable mezclado con árido forma el denominado mortero u hormigón polimérico, en terminología inglesa "Polymer concrete" (P.C.).

Los polímeros termoestables se presentan en forma de dos o tres componentes que son mezclados en el momento de su uso, dando lugar a una reacción química (polimerización) y su endurecimiento.

La reacción de polimerización tiene lugar en el momento en que se mezclan los componentes, disponiendo de un tiempo de trabajabilidad para la puesta en obra del material, que puede oscilar de minutos a horas. Una manera de determinar el final del mismo es prestando atención al aumento de la temperatura del producto y su viscosidad, que a medida que crece se dificulta su aplicación.

En el tiempo de trabajabilidad, afectan los siguientes factores:

- Tipo de sistema utilizado (epoxi, poliuretano o poliéster).
- Proporción de componentes en la mezcla.
- Temperatura de los componentes de la mezcla.
- Temperatura y naturaleza del hormigón dañado.
- Modo de puesta en obra.

La reacción de polimerización es exotérmica, de manera que una vez mezclados los componentes, si el producto se conserva en el mismo envase, la temperatura de la masa aumenta y la reacción se acelera, ya que el calor no se puede evacuar. En consecuencia, se debe verter el producto sobre el sustrato a reparar. De esta manera el calor de la reacción puede ser absorbido por la superficie, ralentizando la reacción y aumentando el tiempo de trabajabilidad.

No se recomienda el empleo de estos sistemas con temperaturas por debajo de 5° C por varios factores: la velocidad de endurecimiento de las resinas (especialmente de las epoxi) se retrasa notablemente, la viscosidad de la mezcla aumenta bastante, dificultando la puesta en obra y la penetración en la superficie donde se aplican disminuye, dificultando su adherencia (Heidari y Bashandeh 2018; Jafari 2018; Sousa 2017).

Mortero epoxi

Las resinas epoxi son sustancias que tienen más de un grupo epoxi por molécula y pueden sufrir polimerización cuando son mezcladas por un agente de curado o endurecedor. El conjunto de resina y endurecedor, es denominado formulación. Todos los productos comerciales epoxi utilizados para reparación del hormigón están constituidos por la formulación y otro componente, que se llama modificador de la formulación.

El componente modificador más importante de un sistema epoxi son las cargas, que por su especial importancia se las considera distintas de los modificadores. El esquema fundamental de un mortero epoxi se muestra en la Figura 2.10 (AENOR 1994).

Figura 2.10 Componentes de un mortero epoxi

Las resinas epoxi poseen un gran poder adherente, altas características mecánicas y elevada estabilidad frente a acciones físicas y químicas. Sin embargo, algunas de sus propiedades difieren de las del hormigón, como la fluencia, el módulo de elasticidad o el coeficiente de dilatación térmica. Estas diferencias, que pueden mejorarse empleando cargas, no impiden que se produzca una buena unión. En efecto, las uniones que se realizan con resinas epoxi son excelentes, siempre que el soporte sea el adecuado y esté seco.

Para obtener una buena adherencia entre el hormigón y el mortero epoxi es necesario, antes de su colocación, sanear el soporte y aplicar una imprimación sobre la zona de hormigón dañada y sobre las armaduras. Dicha imprimación sirve a su vez de barrera anticorrosiva, en el caso de que quedaran al descubierto las armaduras. La

imprimación se aplica habitualmente con brocha, aunque también se pueden emplear rodillos o pistolas, en función de su viscosidad.

El mortero epoxi se aplica sobre la imprimación cuando se mantiene pegajosa al tacto. Si por alguna causa la imprimación se seca, es necesario aplicar una segunda capa sobre la que se colocará el mortero (Ariffin 2015; Jo 2008).

Mortero de poliuretano

Una vez endurecido puede formar productos rígidos o flexibles. Forman barreras anticarbonatación y poseen buena durabilidad. Normalmente se emplean en revestimientos protectores debido a su gran adhesividad con el hormigón.

Aventajan a las resinas epoxi en que se pueden curar a bajas temperaturas. (Gadea, et al. 2010).

Mortero de poliéster

Las resinas de poliéster también son conocidas como resinas de metacrilato de metilo (MM). En terminología inglesa, al mortero de poliéster se le denomina "Polymer impregnation concrete" (PIC).

Estas resinas se pueden mezclar con filler calizo, silíceo, cemento portland o con árido fino para formar morteros que poseen buena adherencia con el hormigón, impermeabilidad y buenas características mecánicas y de resistencia a los agentes químicos. El inconveniente que presentan son las retracciones que producen durante la polimerización y al enfriarse. Como desarrollan la mayor parte de su exotermicidad cuando han solidificado, experimentan una alta contracción térmica que puede hacer peligrar la adhesión con el hormigón (Kiani, Liang y Gross 2018).

2.2.3 Morteros de reparación de base mixta

En los morteros de reparación de base mixta, su ligante mixto está formado por cemento portland y polímeros en emulsión (hidráulico-poliméricos). El ligante mixto mezclado con árido, se denomina en terminología inglesa: "Polymer Portland Cement Concrete" (PPCC).

Los morteros modificados con polímeros proporcionan la misma protección de pasivación alcalina a la armadura como lo hacen los morteros de cemento. Los polímeros se proporcionan en forma líquida como dispersores de partículas muy finas en agua (látex). Cuando el agua desaparece, su efecto ligante se suma con el del

cemento resultando un mortero más compacto e impermeable, con un módulo de elasticidad longitudinal y un coeficiente de dilatación térmica parecido al de un mortero hidráulico sin modificar.

Los polímeros se comportan como fluidificantes, lo que permite reducir la relación agua-cemento, produciendo un mortero con menor retracción y buena trabajabilidad. Los polímeros, incorporados al cemento, se infiltran en las microfisuras y actúan como flejes elásticos que cosen los labios de las juntas, obteniendo una mayor permeabilidad al agua y al dióxido de carbono e incrementando así la resistencia a flexión y a tracción respecto de los morteros tradicionales. (Al-Zahrani et al. 2003; Menhosh, et al. 2018; Valcuende 1994).

Los materiales considerados en esta categoría se dividen en dos grandes grupos:

- Asociación de polímeros termoestables con cementos portland. Se refiere a formulaciones epoxídicas. Presentan ventajas sobre los morteros con polímeros termoplásticos por su mayor adherencia sobre soporte húmedo.
- Asociación de cementos portland con polímeros termoplásticos, en forma de emulsión látex: acrílicos (AC), estireno-butadieno (SB o SBR) y acetatos de polivinilo (PVA). Los morteros modificados con acrílicos y estireno-butadieno poseen mayor resistencia al agua y mejores propiedades mecánicas.

Como resultado de la asociación del cemento portland con el polímero se obtienen, normalmente, las siguientes propiedades:

- Mejoran las resistencias a tracción y a flexión (al asociarse con polímeros termoplásticos).
- Altas resistencias a compresión (al asociarse con polímeros termoendurecibles).
- Se reduce la permeabilidad (al asociarse con polímeros termoplásticos).
- Mejora la adherencia con la superficie a reparar (al asociarse con polímeros termoendurecibles y polímeros termoplásticos).
- No se modifica el tiempo de trabajabilidad.
- No se modifica el módulo de elasticidad longitudinal ni el coeficiente de dilatación térmica (al asociarse con polímeros termoplásticos).

En cuanto a la puesta en obra, no se requiere una tecnología especial aunque si algunas precauciones, como emplear la mínima cantidad de agua de amasado necesaria para obtener la consistencia deseada. Se debe evitar la producción de espuma durante el amasado, lo que podría ocasionar un contenido excesivo de aire

incorporado. El amasado debe ser enérgico aunque evitando una compactación excesiva que podría generar una exudación indeseada. Durante el curado conviene mantener una humedad alta durante un tiempo variable que suele oscilar entre 1 y 3 días (Huseien 2017).

2.2.4 Técnicas de ejecución

Las técnicas fundamentales que se utilizan para ejecutar reparaciones con los materiales descritos, son: aplicación manual, hormigón proyectado y hormigón inyectado (Broto 2005; Cobo 2001a).

Aplicación manual

El hormigón utilizado en la reparación debe poseer unas propiedades finales lo más similares al hormigón existente (módulo de elasticidad, resistencia mecánica, coeficiente de fluencia, etc.). Al colocar el material en la zona a reparar debe impedirse la entrada de aire, para evitar la formación de coqueras.

Para evitar fisuras debido a la retracción, particularmente en la zona de unión, se deben elegir cuidadosamente el tipo de cemento, su dosificación, así como la relación agua-cemento. En aplicaciones del hormigón utilizando encofrados, éstos deben estar bien unidos al hormigón y ser lo suficientemente rígidos y estables, para impedir la pérdida de lechada.

Hormigón proyectado

Esta técnica se suele emplear como reparación de superficies dañadas o sustitución de hormigón de elementos estructurales. Proporciona capas muy compactas e impermeables, especialmente si se emplean hormigones o morteros con relaciones agua-cemento bajas. Posee un rendimiento elevado en la puesta en obra.

En el caso de que se proyecten espesores mayores a 50 o 60 mm hay que incorporar una armadura mínima, que puede ser una tela de gallinero o un mallazo electrosoldado, evitando la existencia de espacios sin rellenar por detrás de las barras.

El tratamiento previo de la superficie es muy importante en este tipo de técnica. Se humedece la superficie para posteriormente proceder al chorreado de arena, sin necesidad de añadir ningún adhesivo que mejore la adherencia.

Es necesario disponer de plataformas de trabajo apropiadas por las que se puedan mover los operarios, ya que la distancia de la boquilla de salida a la superficie que se esté proyectando puede oscilar entre 0,6 y 1,8 metros.

Hormigón inyectado

La técnica consiste en la inyección de un microhormigón dentro de un encofrado relleno de grava. El microhormigón se inyecta desde el punto más bajo del encofrado, para que, al ir ascendiendo entre la grava, se rellenen los vacíos.

La dosificación en peso del microhormigón suele estar formado por dos partes de cemento portland, una de cenizas volantes o puzolanas naturales finamente molidas y cuatro partes de árido fino con tamaño máximo de 2,4 mm y módulo de finura comprendido entre 1,7 y 3,0. Es habitual utilizar un aditivo fluidificante que contenga una pequeña cantidad de polvo de aluminio para lograr rellenar mejor los espacios entre los granos del árido. La grava elegida debe tener una granulometría que permita el ascenso del microhormigón. Generalmente se elimina el árido fino y se utilizan tamaños superiores a 20 mm.

Mediante esta técnica se obtienen hormigones con un módulo de elasticidad longitudinal superior al de los hormigones tradicionales, con la misma dosificación, debido a que la grava está en contacto por puntos.

2.3 Adherencia entre el hormigón y los morteros de reparación

2.3.1 Generalidades

Se podría definir la adherencia entre el hormigón y los morteros de reparación, como la fuerza superficial que mantiene unidos ambos materiales. Para conocer por qué dos elementos sólidos quedan unidos y no se separan, habría que estudiar en detalle qué es esa fuerza, qué la origina o qué factores le influyen.

Son varios los autores que emplean distintos métodos experimentales para evaluar la resistencia de la unión entre el hormigón y el mortero de reparación (Assaad 2018; Qian et al. 2014; Tayeh et al. 2013). Courard et al. (2011) señalan el efecto del agua en la superficie de hormigón antes de aplicar morteros de reparación y evalúan el grado de humedad óptimo del hormigón antes de aplicar el material de reparación. Cuando en la unión existe un nivel de saturación alto, se produce la formación de película de agua en la interfaz, que es incompatible con el material polimérico y reduce

artificialmente el trabajo de adhesión. Garbacz et al. (2017) en su estudio concluyen que la rugosidad del hormigón y el microfisuramiento influyen en la resistencia de la unión.

2.3.2 Factores que influyen en la adherencia

El material de reparación a menudo se culpa por "no pegarse", aunque la fuente general del problema reside en el acondicionamiento de la superficie del hormigón. Entre los factores que influyen en la adherencia, se encuentran principalmente la humedad del soporte de hormigón, la compatibilidad dimensional y la rugosidad del hormigón. Sobre estas tres cuestiones, y cómo influye en la adherencia de las reparaciones con morteros de reparación se va a hablar en este apartado. A continuación, se describen los factores que influyen en la calidad de la unión (Courard et al. 2011; Vázquez 2010).

Contenido de humedad del hormigón

El nivel apropiado de saturación de agua en la superficie del hormigón es esencial para la durabilidad de la estructura reparada. La existencia de agua en el soporte de hormigón es la primera causa de alteración de la adherencia entre el hormigón y los morteros de reparación: puede estar presente en la interfase o penetrar en ella, causando problemas en la unión de las reparaciones con morteros de reparación poliméricos: impidiendo la penetración de producto en los poros del hormigón en el momento de la aplicación, evitando la polimerización correcta de las resinas que conforman la reparación o llegándose a producir el desprendimiento del mortero.

Compatibilidad dimensional

Los cambios dimensionales entre el hormigón y el mortero de reparación provocan esfuerzos cortantes en la interfase, que influyen en la adherencia. Los factores que provocan dicha variabilidad dimensional pueden ser las retracciones producidas durante el fraguado, cambios de temperatura o el módulo de elasticidad de los elementos. Esto último implica que con un mayor módulo de elasticidad se necesita mayor esfuerzo para ajustar los movimientos diferenciales, y viceversa.

Rugosidad del hormigón

La adherencia es un fenómeno superficial, por lo tanto, para generar mayor fuerza de adherencia se debe maximizar la superficie de contacto entre los dos materiales. Es

importante la limpieza sobre la superficie de hormigón donde se va a producir la adhesión.

2.4 Fisuras en el hormigón

En los últimos tiempos numerosas investigaciones han contemplado diversos aspectos relacionados con los procesos de reparación en los elementos de hormigón dañados. De hecho, la comprobación de la fisuración y de las flechas en las estructuras de hormigón armado se ha convertido en un aspecto esencial en la práctica profesional (Albitar, Ali y Visintin 2018; Li, et al. 2018; Shardakov, et al. 2017).

Las fisuras se definen por su ancho, profundidad o longitud. El ancho de una fisura normalmente varía en la superficie y a nivel de la armadura y en general se considera el valor medio medido en la superficie del hormigón (Figura 2.11).

Asimismo, el ancho de fisura puede variar a lo largo de su longitud y normalmente el valor que se toma de ancho de fisura es el valor medio que se obtiene como resultado de medir en varios puntos. La anchura de fisuras es decisiva para la penetración de agentes nocivos.

Figura 2.11 Ancho de fisura

El hormigón es un material rígido, poco resistente a tracción. Por tanto, cuando éste es solicitado a esfuerzos de tracción y de flexión, se originan fisuras. El empleo de armaduras con aceros de alta calidad resistente, requieren que el hormigón que las rodea, alcance deformaciones superiores a las compatibles con su capacidad resistente a tracción, de lo contrario el hormigón rompe, produciendo fisuras. También es frecuente que las propias tensiones internas en el proceso de fraguado, sean las que originen fisuras (Gowripalan, Sirivivatnanon y Lim 2000).

En las estructuras de hormigón las fisuras pueden deslucir el aspecto del hormigón así como indicar problemas estructurales de gran importancia. Issa y Debs (2007) en su estudio encontraron que las grietas en las estructuras de hormigón causaron una reducción en la resistencia a compresión de hasta un 40%. Es por ello, que en algunos

casos deben limitarse las tensiones de trabajo de las armaduras para reducir el riesgo de fisuración del hormigón (Blevot 1977).

La máxima abertura de fisura permitida puede alcanzar los 0,30 mm en las estructuras armadas con acero inoxidable (Medina 2012). La EHE-08 limita a 0,20 mm la apertura de fisura para estructuras armadas con acero al carbono sometidas a ambientes marinos o con cloruros (IIIa, IIIb, IV, F y Qa).

Hay numerosos tipos de fisuras y también numerosas causas. A continuación se exponen las principales causas de fisuración y se da una lista de los distintos tipos de fisuras, pretendiendo dar las posibilidades de reparación del hormigón armado (Issa y Debs 2007; Johnson 1973; Muñoz 2009).

2.4.1 Causas de fisuración en el hormigón

Las fisuras que aparecen en el hormigón, se deben principalmente a las siguientes causas (Calderón, 2008; Gilbert 2017):

- Actuación de cargas exteriores. Si las solicitaciones son de tracción o flexión, pueden producir fisuras perpendiculares al eje de las piezas. Si existen solicitaciones de cortante, las fisuras serán inclinadas. Es consubstancial al funcionamiento del hormigón armado de elementos estructurales sometidos a flexión, que éstos se fisuren. Esta situación es considerada aceptable siempre que el tamaño de fisuras se encuentre dentro de unos límites que fijan las normas y códigos en 0.3 mm.
- Deformaciones impuestas a la estructura impedidas por sus condiciones de apoyo. Estas son debidas a asentos de cimentación, variaciones de temperatura o fenómenos de retracción y fluencia del hormigón.
- Asiento del hormigón fresco dentro del encofrado, impedido por las armaduras parcialmente.
- Errores de diseño o de construcción.
- Fenómenos de corrosión de armaduras, ataques químicos al hormigón o acción de heladas.

2.4.2 Tipos de fisuras

La fisuración de elementos de hormigón normalmente indica que sucede una anomalía en el mismo. Independientemente, investigaciones llevadas a cabo por Calavera, et al. (1977) relativas a la microestructura del hormigón, muestran que al contrario que la mayoría de materiales estructurales, el hormigón contiene numerosas pequeñas fisuras antes incluso de ser sometido a tensiones externas. Para saber a qué se debe la fisuración, es necesario conocer los distintos tipos de fisuras que pueden presentarse (Johnson 1973; García 1998):

- **Fisuras de dilatación**

Las fisuras de dilatación y contracción térmica del hormigón, también llamadas fisuras por tensión, son debidas al movimiento térmico por variaciones de temperatura y visualmente son anchas. El hormigón se contrae con el frío y con el calor aumenta su volumen, con dilataciones del orden de $10 \text{ a } 11 \text{ m/m} \cdot ^\circ\text{C}$ y equivale con bastante exactitud al coeficiente de dilatación térmica lineal del acero. Para evitarlo se establecen una red de juntas.

En estas fisuras, los ácidos en estado gaseoso o líquido pueden penetrar profundamente en el hormigón empujando hacia dentro el frente del pH 10 en forma de cuña y alcanzar así al acero en capas más profundas; el acero comienza así a oxidarse. De ahí surge la necesidad de sellar estas fisuras si se quiere conservar el hormigón.

- **Fisuras de retracción**

La retracción es un fenómeno por el cual el hormigón contrae de volumen debido a la pérdida paulatina del agua en el hormigón, lo que provoca las fisuras de retracción. Estas fisuras actúan como capilares conduciendo el agua hacia el interior del hormigón. Visualmente son finísimas y no pueden rellenarse ni cubrirse con facilidad, así deben infiltrarse.

Durante los procesos de fraguado y secado, el hormigón se contrae cediendo el exceso de agua. Por esta razón se forman oquedades en el hormigón y una reducción de volumen. Esta retracción lineal es una magnitud de cálculo importante para el proyectista porque, de lo contrario, se formarían fisuras. En los hormigones normales, el orden de magnitud de la retracción es de $0,5 \text{ mm/m}$. La retracción queda terminada en dos años, incluyendo la contracción bajo carga.

No es posible evitar la formación de fisuras de retracción, así que deben distribuirse bien por la superficie del hormigón y para ello se coloca la armadura de reparto. Si la distribución de las fisuras es buena, estas fisuras de retracción son muy estrechas, del orden de 0,05 a 0,1 mm de anchura, y es frecuente que no tengan más de 0,02 mm. Tampoco son profundas y no suelen penetrar en el hormigón más de 4 a 10 mm. En un hormigón normal no hay necesidad de prestarles demasiada atención.

- **Fisuras de asiento**

Las fisuras de asiento, se producen por causas constructivas o bien por defectos de proyecto y de ejecución. Este tercer grupo de tipos de fisuras comprende las que no son previsibles.

3

TRABAJO EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

Para poder evaluar el comportamiento de los materiales de reparación en estructuras de hormigón, se elaboran probetas mixtas de hormigón con diferentes porcentajes de morteros de reparación. Utilizando para ello dos tipologías; de cemento tradicional y de base orgánica.

Adicionalmente, se reparan cuatro vigas de hormigón dañadas, comparando los resultados de los ensayos de las vigas reparadas con las vigas originales.

El trabajo se realiza estudiando el comportamiento mecánico a nivel de secciones mixtas en probetas cúbicas de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ y a nivel de piezas estructurales de $10 \times 15 \times 120 \text{ cm}^3$.

A nivel de sección en probetas cúbicas, el trabajo se va a desarrollar en dos vertientes experimentales y analíticas:

- Experimentalmente: ensayando a compresión en serie las probetas mixtas de hormigón y ensayando a compresión en paralelo las probetas mixtas de hormigón.
- Analíticamente: comprobando los datos obtenidos de carga-deformación en los ensayos con los previstos teóricamente, y comparando los resultados de los dos tipos de morteros de reparación, cemento tradicional y de base orgánica.

A nivel de piezas estructurales, el trabajo se va a desarrollar experimental y analíticamente:

- Experimentalmente: ensayando a flexión, hasta la rotura, cuatro vigas de hormigón de $10 \times 15 \text{ cm}^2$ de sección (13 cm de canto útil) y 1,20 metros de longitud, apoyada en sus extremos, y aplicando la carga sobre dos puntos simétricos equidistantes 33 cm entre sí. Las vigas están reparadas con morteros de reparación: dos vigas con mortero de reparación de base orgánica de comportamiento previsible más dúctil, y dos con mortero de cemento tradicional, y por tanto, de rotura prevista más frágil.
- Analíticamente: elaborando los diagramas momento-deformación de las vigas reparadas y sin reparar. A partir de los diagramas, se van a comparar los resultados de los dos tipos de morteros de reparación entre sí y con las vigas originales sin reparar, estudiando los valores de ductilidad y energía absorbida de las secciones.

En las Figuras 3.1 y 3.2 se representa esquemáticamente el plan de ensayos desarrollado, por un lado de las probetas cúbicas sometidas a compresión y por otro lado, de las piezas estructurales sometidas a flexión.

Plan de ensayos

Figura 3.1 Plan de ensayos a compresión

Figura 3.2 Plan de ensayos a flexión

3.2 Equipos y materiales utilizados

A continuación se definen los equipos y materiales empleados para llevar a cabo el proceso experimental de este trabajo de investigación.

3.2.1 Equipos empleados

Los equipos con los que se ha contado, pertenecen al Laboratorio de Materiales de Construcción Félix Orús de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid (ETSEM) de la Universidad Politécnica de Madrid:

- Amasadora planetaria de hormigón de eje vertical IBERTEST modelo CIB-701 actualizado a IB32-040V0 con una capacidad máxima de 100 litros y capacidad de trabajo de 75 litros.
- Báscula Balanco con esfera graduada de 0 a 100 Kg.
- Tamizadora convencional con torre de tamices metálicos IB-40-000E, UNE 750
- Moldes cúbicos de fundición de 100 x 100 mm.
- Cámara de curado.
- Prensa universal IBERTEST MIB-60/AM para ensayos de rotura a compresión y a flexión, de 600 KN de capacidad. Con actualización de software Wintest 32 instalado en el ordenador para la obtención de resultados.

3.2.2 Materiales utilizados

Se ha empleado hormigón H-25 y dos tipos de mortero de reparación, uno de cemento Portland y el otro modificado con polímeros, con el fin de estudiar el comportamiento de los elementos estructurales mixtos tanto a compresión, cómo a flexión. Los materiales necesarios para ambos casos se indican a continuación y las dosificaciones y características concretas de las probetas cúbicas y de las vigas se detallan en la Tabla 3.6.

Cemento

- **Cemento Portland tipo CEM II A-L 42,5** según UNE-EN 197-1:2011 (AENOR 2011). empleado para fabricar el hormigón y el mortero de cemento Portland en el proceso experimental de este trabajo. Ha sido suministrado por cementos Portland Valderrivas S.A. (Morata de Tajuña, Madrid). Las características de este

cemento son las que se indican en la Tabla 3.1 cumplen con la Instrucción RC-08 (2009) y son descritas en el artículo 26 de la EHE-08.

Tabla 3.1

Características del cemento Portland CEM II A-L 42,5 y denominación utilizada

Designación	Denominación simplificada	Características
CEM II/A-L 42,5 R	CEM II-A	Cemento Portland con adiciones (II) Proporción alta de clínker (A) Con filler calizo (L) Alta resistencia inicial (R)

- **Cemento Portland CEM II B-L 32,5** según RC-08 (2009) y EHE-08. Ha sido empleado en la elaboración del hormigón de las vigas en ensayos previos.
- **Cemento hidráulico-polimérico** sin retracción, con adición de productos minerales y modificado con polímeros e inhibidores de corrosión, tipo CC, clase R4 según UNE-EN 1504-3:2006 (AENOR 2006). Los inhibidores de corrosión que contiene, protegen y pasivan la armadura prolongando la vida útil de la zona reparada. Ha sido suministrado por Drizoro S.A. y los datos técnicos del producto se muestran en la Tabla 3.5. Está exento de cloruros y agregados metálicos y destacan la alta resistencia mecánica y gran adherencia que proporciona. El consumo de producto es variable en función de la textura, porosidad y condiciones del soporte, así como del método de aplicación.

Áridos

Los áridos empleados (arenas y gravas) son de origen natural.

La arena utilizada para elaborar el hormigón y los morteros de reparación es un árido fino silíceo de río de fracción granulométrica 0 mm- 4mm, según UNE-EN 13139/AC:2004 (AENOR 2004).

La grava utilizada para elaborar el hormigón es un árido grueso de canto rodado, con tamaño máximo de 10 mm, según la norma UNE-EN 12620:2003+A1:2009 (AENOR 2009 a). Las características se describen en el artículo 28 de la EHE-08.

Agua

El agua utilizada no contiene ningún ingrediente perjudicial en cantidades tales que afecten a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras frente a la corrosión.

Se emplea agua potable del Canal de Isabel II de la Comunidad de Madrid, que cumple con las prescripciones técnicas que se establecen en el artículo 27 de la EHE-08 para el hormigón estructural (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Condiciones que debe cumplir el agua

Condiciones del agua	
Exponente de hidrógeno pH (UNE 7234)	≥ 5
Sustancias disueltas (UNE 7130)	≤ 15 gramos por litro (15.000 p.p.m)
Sulfatos, expresados en $\text{SO}_4^{=}$ (UNE 7131)	≤ 1 gramo por litro (1.000 p.p.m)
Ión cloruro Cl^- (UNE 7178) para hormigón armado	≤ 3 gramos por litro (3.000 p.p.m)
Hidratos de carbono (UNE 7132)	0
Sustancias orgánicas solubles en éter (UNE 7235)	≤ 15 gramos por litro (15.000 p.p.m)

Acero

Las vigas procedentes de ensayos previos, han sido armadas con dos tipos de acero, con diferentes diámetros y formas de laminación de las barras (Tabla 3.3). Las barras corrugadas Ø8 de los dos tipos de acero, han sido elaboradas mediante laminación en frío y las Ø16 se han fabricado mediante laminación en caliente. En la Tabla 3.4 se indica la composición química de los aceros inoxidables según Medina (2012).

- **Acero al carbono B 500 SD**, de diámetros 8 y 16 mm, según UNE 36065:2011 (AENOR 2011). Suministrado por Armacentro S.A. (del grupo Armatek). Está en posesión del certificado de calidad ARCER.
- **Acero inoxidable dúplex AISI 2304**, de diámetros 8 y 16mm, según UNE-EN 10088-1:2015 (AENOR 2015). Los aceros inoxidables han sido fabricados por la empresa española ROLDÁN S.A., en posesión del certificado de calidad CARES (UK Certification Authority for Reinforcing Steel).

Tabla 3.3 Aceros, diámetros y formas de laminación de las barras corrugadas de las vigas ensayadas a flexión

Diámetro nominal (mm)	Designación del acero	
	B-500-SD	AISI 2304
8	F	F
16	C	C

F: Laminado en frío. C: Laminado en caliente

Tabla 3.4 Composición química (%) de los aceros

Acero	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	N (ppm)	Mo
AISI 2304	0,02	0,35	0,81	0,03	<0,01	22,7	4,32	0,31	0,14	0,29
B500SD	0,45	0,22	0,72	<0,01	0,02	0,13	0,13	0,18	-	-

Tabla 3.5 Datos técnicos del mortero modificado con polímeros (Drizoro 2011)

Características del producto	
Aspecto y color	Polvo gris
Granulometría máx. (mm)	2,0
Densidad aparente en polvo (g/cm ³)	1,25 ± 0,10
Agua (% en peso)	13 ± 1
Condiciones de aplicación y curado	
Temperatura mínima de aplicación para soporte y ambiente (°C)	>5
Tiempo de fraguado a 20° C y 50 % H.R. (horas)	5-6
Segregación	Nula
Expansión (%)	0,05
Consistencia en mesa de sacudidas (mm)	135
Características del producto curado	
Densidad del producto curado (g/m ³)	2,15 ± 0,10
Norma UNE-E 1504-3 Reparación estructural	Clase R4
Resistencia a compresión a 28 días, EN 12190 (MPa)	≥cm ²
Resistencia a flexotracción a 28 días (MPa)	≥10
Contenido en iones cloruro, UNE-EN 1015-17:2001 (% en peso)	≤0,05
Adhesión al hormigón, EN 1542 (MPa)	≥2,0
Módulo de elasticidad, EN 13142 (GPa)	≥20
Resistencia a la carbonatación, EN 13295 (mm) (Profundidad en el hormigón de referencia: 4 mm)	≤4,0
Compatibilidad térmica	
▪ Parte 1: hielo/deshielo, EN 13687-1 (MPa)	≥2,0
▪ Parte 2: lluvia tormentosa, EN 13687-2 (MPa)	≥2,0
▪ Parte 4: ciclos secos, EN 13687-4 (MPa)	≥2,0
Absorción capilar, EN 13057 (Kg/m ² *h ^{0.5})	≤0,5
Reacción al fuego	A1
Espesor/Consumo	
Espesor mín./máx. recomendado por capa (mm)	5/40
Consumo como mortero puro (kg/m ² y mm de espesor)	2,0 ± 0,1
Consumo como microhormigón con árido (Kg/m ² y mm de espesor)	1,5 ± 0,1

Tabla 3.6 Dosificación y materiales de probetas y vigas

Probetas cúbicas				Vigas		
	Hormigón (H-25)	Mortero de cemento Portland	Mortero modificado con polímeros	Hormigón (H-25)	Acero	
Tipo de cemento	CEM II A-L 42,5	CEM II A-L 42,5	Clase R4 (tipo CC)	CEM II B-L 32,5	Armadura longitudinal	Armadura transversal a 45°
Materiales	Dosificaciones			Tipos de acero		
Cemento	1,00	1,00	1,00	1,00	B 500 SD	2 ϕ 8 c ϕ 8 cada 10
Arena	2,00	3,00	0,32	2,66	B 500 SD	2 ϕ 16 c ϕ 8 cada 7
Grava	3,50	-----	-----	2,58	AISI 2304	2 ϕ 8 c ϕ 8 cada 10
Agua	0,50	0,50	0,12	0,55	AISI 2304	2 ϕ 16 c ϕ 8 cada 7

3.3 Elementos ensayados

Para evaluar el comportamiento de elementos estructurales de hormigón en los que se ha reparado su capacidad resistente mediante la utilización de morteros de reparación, se han desarrollado dos fases:

En la primera fase, se han fabricado en total 27 probetas cúbicas con el fin de estudiar el comportamiento a compresión de probetas mixtas de hormigón-mortero con diferentes proporciones. De cada tipo se han fabricado tres probetas, de las cuales se ensayarán dos en paralelo y una en serie.

Todas las probetas se han realizado en moldes cúbicos de 10 x 10 x 10 cm³ y cumplen con los parámetros establecidos en la norma UNE-EN 12390-1:2013 (AENOR 2013). Las probetas se han fabricado con hormigón H-25 y con dos tipos de morteros de reparación (de cemento Portland y de cemento modificado con polímeros), en distintas proporciones.

En función de la variación de los porcentajes de hormigón-mortero, se generan cinco tipos de probetas, según se muestra en la Figura 3.3, donde el punteado representa el hormigón y el sombreado, el mortero de reparación:

- Hormigón
- 2/3 hormigón y 1/3 mortero de reparación
- 1/2 hormigón y 1/2 mortero de reparación
- 1/3 hormigón y 2/3 mortero de reparación
- Mortero de reparación

Figura 3.3 Esquema de las probetas cúbicas hormigón-mortero

Para llevar a cabo la segunda fase, se han reparado con los mismos morteros de reparación utilizados en la primera fase, mortero de cemento portland y mortero modificado con polímeros, cuatro vigas de hormigón armado de 10x15 cm² de sección y 1,20 m de longitud, con diferentes cuantías y tipos de acero según se indican la tabla 3.6 y cuyo esquema se muestra en la Figura 3.4, donde el punteado representa la viga original de hormigón y el sombreado en color rojo simboliza el área reparada.

Dichas vigas habían sido ensayadas a flexión hasta la rotura con anterioridad y en aquellas armadas con Ø8, el área reparada es mayor que en las armadas con Ø16, debido a la mayor sección de rotura de hormigón.

Figura 3.4 Esquema de reparación de las vigas

La nomenclatura y tipos de ensayos a realizar tanto en las probetas mixtas como en las vigas, se pueden observar en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Nomenclatura, características y tipos de ensayos en probetas y vigas

Probetas cúbicas (Ensayo a compresión)			
Probetas de un solo material			
Hormigón	C-1	C-2	C-3
Mortero de cemento Portland	MC-1	MC-2	MC-3
Mortero modificado con polímeros	MP-1	MP-2	MP-3
Probetas mixtas			
Hormigón-mortero de cemento Portland	C.MC-1/3-s1	C.MC-1/2-s1	C.MC-2/3-s1
	C.MC-1/3-s2	C.MC-1/2-s2	C.MC-2/3-s2
	C.MC-1/3-s3	C.MC-1/2-s3	C.MC-2/3-s3
	C.MC-1/3-p1	C.MC-1/2-p1	C.MC-2/3-p1
	C.MC-1/3-p2	C.MC-1/2-p2	C.MC-2/3-p2
	C.MC-1/3-p3	C.MC-1/2-p3	C.MC-2/3-p3
Hormigón-mortero modificado con polímeros	C.MP-1/3-s1	C.MP-1/2-s1	C.MP-2/3-s1
	C.MP-1/3-s2	C.MP-1/2-s2	C.MP-2/3-s2
	C.MP-1/3-s3	C.MP-1/2-s3	C.MP-2/3-s3
	C.MP-1/3-p1	C.MP-1/2-p1	C.MP-2/3-p1
	C.MP-1/3-p2	C.MP-1/2-p2	C.MP-2/3-p2
	C.MP-1/3-p3	C.MP-1/2-p3	C.MP-2/3-p3
Vigas (Ensayo a flexión)			
Antes de reparar		Reparadas	
Hormigón-mortero de cemento Portland	B-SD-8	B-SD-8-MC	
	B-SD-16	B-SD-16-MC	
Hormigón-mortero modificado con polímeros	B-AISI-8	B-AISI-8-MP	
	B-AISI-16	B-AISI-16-MP	

Descripción de las abreviaturas:**C:** Probeta 100% de Hormigón.**MC:** Probeta 100% de mortero de reparación de cemento Portland.**MP:** Probeta 100% de mortero de reparación de cemento modificado con polímeros.**C.MC-1/3-s** y **C.MC-1/3-p:** Probeta mixta formada por 1/3 de Mortero de reparación y la diferencia de hormigón, sometidas a ensayo de compresión en serie y en paralelo, respectivamente.**C.MC-1/2-s** y **C.MC-1/2-p:** Probeta mixta formada por 1/2 de Hormigón y la diferencia de mortero de reparación, sometidas a ensayo de compresión en serie y en paralelo, respectivamente.**C.MC-2/3-s** y **C.MC-2/3-p:** Probeta mixta formada por 2/3 de mortero de reparación y la diferencia de hormigón, sometidas a ensayo de compresión en serie y en paralelo, respectivamente.**B-SD-8** y **B-SD-8-MC:** Viga armada longitudinalmente con barras corrugadas de acero al carbono B500SD, con 2 Ø 8 antes de la reparación y reparada con mortero de cemento Portland, respectivamente.**B-AISI-16** y **B-AISI-16-MP:** Viga armada longitudinalmente con barras corrugadas de acero inoxidable de grado dúplex AISI 2304, con 2 Ø 16 antes de la reparación y reparada con mortero de cemento modificado con polímeros, respectivamente.

3.4 Proceso experimental

3.4.1 Fabricación de probetas mixtas

Para la fabricación de las probetas mixtas hormigón-mortero de reparación, se procedió en primer lugar a la fabricación del hormigón para su incorporación a los moldes cúbicos. En segundo lugar se fabricaron los morteros.

Proceso de fabricación del hormigón

Los materiales que componen el hormigón, son: grava, arena, cemento y agua (Figura 3.5).

Figura 3.5 Componentes del hormigón.-Grava, arena, cemento y agua-

Para garantizar que no hubiese áridos de tamaño superior a 10 mm, la grava se somete a un análisis granulométrico previo, utilizando la serie de tamices 0.063-5-8-10-12.5-16 mm y se emplea únicamente la retenida en los tamices 5 y 8 respectivamente. A la arena se le han quitado los finos, considerando por tales, los que pasan por el tamiz 0.063 mm.

Se ha utilizado cemento Portland de tipo CEM II A-L 42,5 que presenta un bajo contenido de adiciones de cenizas volantes y calizas, resistencia mínima a compresión a los 28 días de 42,5 MPa y resistencia inicial ordinaria. Ha sido suministrado por Cemento Portland Valderrivas, S.A.

El agua utilizada tanto para el amasado como para el curado del hormigón ha sido agua potable que cumple con las especificaciones de la EHE-08 en el Artículo 27°.

Una vez medidas las cantidades de material correspondientes a las dosificaciones establecidas (Tabla 3.8), se introdujo la grava, el cemento y la arena, por ese orden en la amasadora planetaria, donde se mezclan los materiales en seco durante 15 segundos para homogeneizar la muestra. Después se agregó el agua y se amasó durante 2 minutos. Se dejó reposar la mezcla un minuto para, finalmente, amasar durante otro minuto más, obteniendo un hormigón de clase resistente H-25. Se ha utilizado una amasadora planetaria de eje vertical IBERTEST modelo CIB-701 actualizado a IB32-040V0 (Figura 3.6).

Figura 3.6 Amasadora planetaria utilizada en la fabricación del hormigón

Tabla 3.8 Cantidades por m³ de hormigón para cada componente empleado en la fabricación del hormigón H-25

Componente	Relación	Dosificación (Kg)
Cemento	1	4,0
Agua	A/c= 0,5	2,0
Arena	Ar/c= 2	8,5
Grava	Ar/c= 3,5	14,5

A continuación, se procedió a llenar 27 moldes cúbicos de 10 x 10 x 10 cm³ con hormigón hasta las proporciones fijadas a 1, 1/3, 1/2 y 2/3 de la capacidad total de los moldes y se ha picado con barra por tongadas (Figuras 3.7 y 3.8) ayudando al relleno del volumen deseado pero evitando un tiempo de picado excesivo que podría causar segregación de la mezcla e introducción de aire.

Durante 24 horas se mantuvieron a una temperatura ambiente de laboratorio de 22°C $\pm$ 3°C y con una humedad relativa del 60%, momento el que se procedió a su desmoldado. El curado se realizó en cámara húmeda (21°C y 95% de humedad relativa) durante 9 días (Figuras 3.9 y 3.10), momento en el que se inició la fabricación de los morteros correspondientes para terminar de rellenar los moldes.

Figura 3.7

Figura 3.8

Figura 3.9

Figura 3.10

Figuras 3.7 y 3.8 Relleno de los moldes y picado con barra del hormigón

Figuras 3.9 y 3.10 Desmoldado de probetas de hormigón y curado en cámara húmeda

Proceso de fabricación de los morteros

Los materiales que componen el mortero, son: cemento, arena y agua (Figura 3.11).

Figura 3.11 Componentes del mortero.-Cemento, arena y agua-

Tras el vertido del hormigón en una primera fase, a los 9 días se procedió a la fabricación de dos morteros para aportar la suficiente variabilidad a la experimentación:

- Mortero de cemento Portland tipo CEM II A-L 42,5, según UNE-EN 197-1:2011 (AENOR 2011).
- Mortero de cemento hidráulico-polimérico sin retracción, con adición de productos minerales y modificado con polímeros e inhibidores de corrosión, tipo CC, clase R4 según UNE-EN 1504-3:2006 (AENOR 2006). Con resistencia mínima a compresión a los 28 días de 45 MPa, según norma EN 12190.

Se termina de rellenar los moldes (Figuras 3.12 y 3.13) según la norma UNE-EN 12390-2:2009 (AENOR 2009), vertiendo de forma continua y por el mismo lado el mortero, hasta el enrasado total de las mismas. Así se evita la formación de juntas frías al mismo tiempo que se minimiza el riesgo de contener aire ocluido.

Figura 3.12

Figura 3.13

Figura 3.14

Figuras 3.12 y 3.13 Relleno total de los moldes con mortero de reparación

Figura 3.14 Probetas mixtas cúbicas en diferentes proporciones

Se mantuvieron a una temperatura ambiente de laboratorio de $22^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ y con una humedad relativa del 60%, durante 24 horas. Pasado este tiempo, se desmoldaron y se curaron en la cámara húmeda (21°C y 95% de humedad relativa) durante 28 días.

Para la fabricación de los morteros, se emplearon las dosificaciones especificadas en las Tablas 3.9 y 3.10. Las probetas terminadas se muestran en la Figura 3.14.

Tabla 3.9 Dosificación de mortero modificado con polímeros Clase R4 (tipo CC)

Componente	Relación	Dosificación (Kg)
Cemento	1,00	13,2
Arena	0,32	4,2
Agua	0,12	0,1

Tabla 3.10 Dosificación de mortero de Cemento Portland CEM II A-L 42,5

Componente	Relación
Cemento	1,00
Arena	3,00
Agua	0,50

3.4.2 Preparación de piezas estructurales

Para estudiar el comportamiento de elementos estructurales de hormigón armado reparados con morteros cuando se encuentran sometidos a flexión, se procedió a reparar mediante sustitución del hormigón deteriorado, cuatro vigas de hormigón armado previamente ensayadas a flexión en el Laboratorio de Materiales de Construcción Félix Orús de la EUATM. Las consideraciones a la hora de elegir esas vigas fueron:

- Las vigas estaban realizadas con hormigón empleado habitualmente en edificación.
- Se emplearon diámetros de 8 y 16mm, que son los más empleados en estructuras de hormigón en edificación, en barras de acero al carbono y de acero inoxidable.
- Las vigas seleccionadas se corresponden con elementos estructurales de baja y alta cuantía de acero.
- Las vigas se habían ensayado a flexión pura con anterioridad y se disponía de los resultados experimentales del ensayo (Medina 2012).

Estudios previos de las vigas

En una tesis doctoral previa correspondiente a Medina (2012), se evaluó el comportamiento mecánico y estructural de vigas de hormigón armadas con un nuevo acero inoxidable dúplex de bajo contenido en níquel, el EN 1.4482 (AISI 2001) y se comparó entre otros, con el dúplex EN 1.4362 (AISI 2304) y con el tradicional acero al carbono B-500-SD. Los resultados de los ensayos mecánicos demostraron que las armaduras de acero inoxidable alcanzan resistencias similares a las de acero al carbono aunque el módulo de deformación longitudinal sea inferior al del acero al carbono, hecho que se debe tener en cuenta en los análisis lineales de cálculo de estructuras de hormigón armado. Además, las armaduras de acero inoxidable laminadas en caliente alcanzan valores de deformación máxima que llegan a duplicar los valores de las armaduras de acero al carbono, lo que se traduce en que presentan una ductilidad muy superior a las de acero al carbono y ofrecen una mayor seguridad frente a la rotura o al colapso de la estructura.

En dicha tesis doctoral, Medina (2012) elaboró cuatro vigas de hormigón de 10 x 15 cm² de sección y 1,20 m de longitud, armadas longitudinalmente, con barras corrugadas laminadas en frío y en caliente, de 8 y 16 mm de diámetro respectivamente y con los siguientes aceros (Figura 3.15 y Tabla 3.11):

Vigas armadas con acero al carbono B500SD:

- Viga B-SD-8: dos barras de Ø 8
- Viga B-SD-16: dos barras de Ø 16

Vigas armadas con acero inoxidable dúplex AISI 2304:

- Viga B-AISI-8: dos barras de Ø 8
- Viga B-AISI-16: dos barras de Ø 16

Experimentalmente se ensayaron a flexión, hasta la rotura, cuatro vigas de hormigón de 1 metro de luz, apoyadas en sus extremos y aplicando la carga sobre dos puntos simétricos equidistantes entre sí. Las vigas se armaron con diferentes cuantías de acero: dos vigas con cuantía baja y de comportamiento previsto más dúctil y dos con cuantía alta y, por tanto, de rotura previsiblemente más frágil.

Análíticamente se comprobaron los datos obtenidos de momento-deformación en los ensayos con los previstos teóricamente y comparando los resultados de los dos tipos de acero, al carbono e inoxidable, entre sí.

Tabla 3.11 Aceros y diámetros de las barras corrugadas de las vigas

Viga	B-SD-8	B-SD-16	B-AISI-8	B-AISI-16
Acero	B500SD		AISI 2304	
Armadura longitudinal	2 Ø8	2 Ø16	2 Ø8	2 Ø16
Armadura transversal a 45°	c Ø8 @ 10 cm	c Ø8 @7 cm	c Ø8 @10 cm	c Ø8 @7 cm

Figura 3.15 Barras corrugadas de acero B 500-SD e inoxidable dúplex AISI 2304, de diámetros 16 y 8 mm. **Figura 3.16** Armados y encofrados de las vigas ensayadas a flexión

Con el fin de que la rotura de las vigas se produjera por el efecto de flexión, y no por el de cortante, se armaron con cercos transversales Ø 8, colocados a 45°, elaborados con acero B500SD. Los cercos se disponen en los extremos de las vigas, separados 10 cm en las dos vigas armadas con Ø 8, y 7 cm en las dos vigas armadas con Ø 16. En la

parte central de las vigas no se colocaron cercos por quedar libres de esfuerzo cortante en el ensayo (Figura 3.16).

Tras disponer las armaduras, se ha fabricado hormigón de resistencia característica $f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$, de dosificación en peso 1 : 2,667 : 2,583 : 0,55; es decir: 1 Kg de cemento CEM II B-L 32,5; 2,667 Kg de arena de río; 2,583 Kg de gravilla de tamaño máximo 20 mm y 0,55 litros de agua. A continuación se colocaron encofrados de madera para introducir el armado de cada viga y se hizo el vertido del hormigón.

Las vigas se han mantenido en cámara de curado con un 95% de humedad hasta el ensayo de rotura a flexión, que se realizó a la edad de 28 días (Figura 3.18) aplicando la carga a velocidad lenta y rompiendo cada viga en un plazo aproximado de 20 minutos, permitiendo durante el ensayo medir el ancho de fisuras en el hormigón y realizar posteriormente los cálculos teóricos que confirman los resultados.

En la Figura 3.17 se representan los armados de los dos modelos de vigas.

Vigas B-SD-8 y B-AISI-8

Vigas B-SD-16 y B-AISI-16

Figura 3.17 Esquema del armado de los dos modelos de vigas

Figura 3.18 Ensayo previo a flexión de una viga de hormigón

Proceso de reparación de vigas de hormigón

Las vigas que se han reparado en este trabajo se tomaron tras el ensayo de rotura de Medina (2012) y presentaban el siguiente estado (Figura 3.19):

Figura 3.19 Estado de las vigas antes de la reparación

Una vez elegidas las vigas sobre las que trabajar, se comenzó el proceso de reparación con los dos morteros de reparación previstos (de cemento tradicional y de cemento modificado con polímeros) ejecutándose en las siguientes fases. En primer lugar se procedió a la limpieza y saneado de las vigas, retirando la superficie dañada de hormigón, localizada en el tramo central, mediante puntero y maceta, de tal forma que las vigas presenten una sección con ángulos superiores a 90° para una mayor adherencia del mortero de reparación (Figura 3.20).

Figura 3.20 Limpieza y saneado de las vigas

A continuación se humedeció el hormigón del vano central de las vigas para evitar que se produjeran retracciones posteriores, según la norma UNE 83702:1994 IN (AENOR 1994). En los laterales de cada viga se colocó un encofrado de madera para posteriormente hacer el vertido del mortero de reparación por gravedad desde el

mismo lado para evitar la formación de juntas frías y minimizar el riesgo de que quede aire ocluido. Después se ha picado con barra. Pasadas 24h desde su reparación, se desmoldaron y se procedió al curado de las mismas durante 28 días, reproduciendo las condiciones de curado crítico que son comunes en situaciones prácticas, por lo que se mantuvo su humedad mediante tejidos de fibra, con humedad relativa superior al 60 %. El proceso de reparación de las vigas se puede observar en las Figura 3.21 y 3.22.

Figura 3.21 Proceso de reparación de vigas: 1. encofrado de madera. 2. picado con barra

Figura 3.22 Proceso de reparación de vigas: 3. enrasado del mortero. 4. vanos centrales reparados. 5. humectación de las vigas

3.5 Técnicas experimentales

Para desarrollar la presente investigación, se han realizado dos tipos de ensayos: el ensayo a rotura por compresión en probetas mixtas y el ensayo a flexión en vigas, cuyas características se detallan en la Tabla 3.6.

3.5.1 Ensayo mecánico a compresión en probetas

Los ensayos a rotura por compresión se realizaron sobre 27 probetas cúbicas, realizadas según la norma UNE-EN 12390-3:2009 (AENOR 2009), previo pulido de la cara superior para asegurar la planeidad de las caras perpendiculares a la carga. En la Tabla 3.12 se muestra las variables estudiadas en las probetas sometidas a compresión.

En primer lugar se realizan los ensayos a compresión de probetas de un material: hormigón, mortero de cemento Portland y mortero modificado con polímeros.

El ensayo a compresión en las probetas mixtas, se realizó con los materiales dispuestos en serie y en paralelo, ensayando en cada tipo de probeta mixta, dos de ellas en paralelo y una, situando los materiales en serie. Los ensayos se realizaron en la prensa universal IBERTEST MIB-60/AM, que dispone en su parte superior del mecanismo de compresión, con una velocidad de aplicación de la carga de 0.2 KN/s. El esquema de cargas y la disposición del ensayo puede observarse en las Figuras 3.23-3.25.

Figura 3.23 Esquema de cargas del ensayo a compresión

Tabla 3.12 Variables estudiadas en probetas sometidas a compresión

Tipo de probeta	Ensayo	Variables estudiadas	Medición	Dimensiones de probeta
Un material	Compresión	100 %	Fuerza máxima	100 x 100 mm ²
Dos materiales	Compresión en serie	Porcentajes:	Fuerza máxima en serie	
	Compresión en paralelo	1/3, 1/2, 2/3	Fuerza máxima en paralelo

Figura 3.24 Máquina de ensayo a compresión

Figura 3.25 Formas de disposición de las probetas en el ensayo a compresión

3.5.2 Ensayo mecánico a flexión en vigas

El ensayo a flexión se realizó a la edad de 28 días sobre las cuatros vigas cuyo tramo central fue reparado con los dos morteros de reparación a estudiar, según la norma UNE-EN 12390-5:2009 (AENOR 2009).

El ensayo fue realizado en el Laboratorio de Materiales de Construcción Félix Orús de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid, en la misma prensa universal IBERTEST MIB-60/AM que los ensayos a compresión, interponiendo una estructura auxiliar metálica sobre dos puntos situados a 333 mm de los apoyos y próxima a la interfaz entre los dos materiales, de forma que la aplicación de la carga produce en su tramo central una sollicitación flectora constante. La velocidad media de aplicación de la carga fue de 0.2 KN/s y la disposición y cantidad de cercos dispuestos, aseguran la rotura de las vigas por el efecto de flexión y no del cortante. El esquema de cargas puede observarse en la Figura 3.26 y la disposición del ensayo en las Figuras 3.27 y 3.28.

Figura 3.26 Esquema de cargas del ensayo a flexión

Figura 3.27

Figuras 3.27 y 3.28

Disposición y detalle de las vigas en el ensayo de rotura a flexión

Figura 3.28

4

RESULTADOS

1	Introducción		
2	Estado del conocimiento		
3	Trabajo Experimental	Ensayos a Compresión	Ensayos a Flexión
4
5	Análisis y Discusión		
6	Conclusiones y Futuras líneas de investigación		

4.1 Introducción

Se exponen los resultados obtenidos tras el desarrollo del programa experimental especificado en el capítulo 3. A continuación se estructuran los resultados en función del estudio realizado.

En primer lugar, se recogen los resultados de los ensayos mecánicos a compresión, de probetas cúbicas de uno o dos materiales ensayados a compresión en serie o paralelo respectivamente.

En segundo lugar, se incorporan los resultados de los ensayos mecánicos a flexión de las piezas estructurales, antes y después de la reparación.

4.2. Resultados de los ensayos mecánicos a compresión

En este apartado están recogidos los resultados de los valores más característicos hallados con los datos obtenidos del ensayo de rotura a compresión de todas las probetas cúbicas elaboradas con hormigón H-25 y con dos tipos de morteros de reparación, de cemento Portland y de cemento modificado con polímeros, en distintas proporciones, 1/3, 1/2, 2/3, 1, tras 28 días de curado. No obstante, los resultados de los valores individuales procedentes de los ensayos de compresión de cada probeta aparecen en Tablas y pueden encontrarse en el anexo A, al final de este documento.

A continuación se explica cómo se trataron los datos obtenidos en los ensayos a compresión y el tipo de diagramas generados para conocer los datos más característicos necesarios para el análisis de los resultados obtenidos.

Con los datos obtenidos en la prensa universal MIB 60/AM en los ensayos a compresión, se obtienen gráficas Fuerza-Desplazamiento (KN/mm), con la totalidad de resultados. Debido a que lo que interesa es obtener el valor de resistencia del hormigón de la probeta, con los datos de Fuerza (KN) y los de Área de la sección cúbica (mm²), se obtienen los datos de resistencia a compresión del hormigón (N/mm²) y los de deformación del hormigón (adimensional).

Con estos datos, se procede a realizar la gráfica tensión-deformación para las probetas más representativas (de cada tres probetas ensayadas a compresión) y conocer los datos más característicos del ensayo, como se representa en la Figura 4.1.

Figura 4.1 Representación esquemática del diagrama Tensión-Deformación del hormigón ensayado a compresión

Donde:

$\sigma_{\max}$	Tensión máxima a compresión del hormigón (N/mm ²)
$\varepsilon_{\max}$	Deformación máxima del hormigón
ε_u	Deformación última del hormigón
E	Módulo de deformación longitudinal
$U_{\max}$	Energía máxima generada durante el ensayo (N/mm ²)
U_{ult}	Energía última generada durante el ensayo (N/mm ²)

El esquema anterior muestra los diagramas que aparecerán en este apartado. Además, para estudiar el comportamiento que tienen los morteros de reparación con el hormigón, en las Tablas se indican los valores de $\sigma_{\max}$ de cada tipo de probeta, así como los valores $\sigma_{\max}$, $\varepsilon_{\max}$, E , $U_{\max}$ y U_{ult} poniéndolos en relación con los valores medios de las probetas de hormigón (c): $\sigma_{\max}/\sigma_{\max C}$, $\varepsilon_{\max}/\varepsilon_{\max C}$, E/E_c , $U_{\max}/U_{\max C}$, $U_{ult}/U_{ult C}$. A continuación se indican los valores medios de las probetas de hormigón tomados de referencia:

$$\sigma_{\max C} = 38,73 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{\max C} = 0,01185 \text{ mm}$$

$$E_c = 3278,51 \text{ N/mm}^2$$

$$U_{\max C} = 0,23788 \text{ N/mm}^2$$

$$U_{ult C} = 0,31145 \text{ N/mm}^2$$

En la Figura 4.2 se muestra una recopilación de las imágenes más representativas de las roturas de probetas durante los ensayos de compresión.

En algunos casos, la rotura de las probetas en la máquina de ensayo se produjo de forma inesperada y explosiva. Este hecho puede estar motivado por una mayor concentración de tensiones en alguna zona. Por otra parte, las probetas no han experimentado cambios de volumen significativos durante el fraguado, por lo que tenían buena adhesión entre el hormigón y el mortero de reparación.

Figura 4.2 Imágenes representativas de roturas en los ensayos a compresión

En las siguientes tablas (4.1- 4.4) se muestra un resumen de los esquemas y diagramas que aparecerán en este apartado, a excepción de las probetas de dos materiales en serie y paralelo de todas las proporciones clasificadas por tipo de mortero, que se expondrán y analizarán en detalle en el capítulo 5 de este documento.

4.2 COMPRESIÓN	4.2.1 Un material
	4.2.2 Dos materiales	2/3 (s, p)
		1/2 (s, p)
		1/3 (s, p)

Tabla 4.1 Resumen esquemático de las probetas de uno y dos materiales colocadas en serie o paralelo

4.2. COMPRESIÓN 4.2.2 Dos materiales							
		Serie (s) Totales
		Paralelo (p) Totales
		Mortero con polímeros C.MP
		Mortero de cemento C.MC

Tabla 4.2 Resumen esquemático de las probetas de dos materiales, por colocación en la máquina de ensayo y tipo de mortero

Tabla 4.3 Resumen de los diagramas tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas de uno y dos materiales colocadas en serie o paralelo

Tabla 4.4 Resumen de los diagramas totales tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas de dos materiales, por colocación en la máquina de ensayo y tipo de mortero

4.2.1 Resultados de los ensayos a compresión de un material

En este apartado se estudiará el comportamiento a compresión de las probetas realizadas con un material, hormigón (C), mortero de reparación de cemento Portland (MC) y mortero de reparación modificado con polímeros (MP), según indica el esquema de la Figura 4.3.

Para poder realizar las comparaciones y evaluaciones correspondientes, en la Figura 4.4 se muestra un diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria de las probetas más representativas realizadas con un solo material y en la Tabla 4.5 aparecen los valores más característicos ($\sigma_{\max}$, $\sigma_{\max}/\sigma_{\max C}$, $\varepsilon_{\max}/\varepsilon_{\max C}$, E/E_c , $U_{\max}/U_{\max C}$, $U_{ult}/U_{ult C}$) de cada tres probetas cúbicas sometidas a compresión de un material.

En el anexo A, Tabla 9.1 se puede consultar los de resultados de rotura a compresión de cada probeta cúbica elaborada con un tipo de material, destacando la muy alta deformación en la rotura en las probetas de hormigón, la alta tensión máxima alcanzada en las probetas de mortero de cemento modificado con polímeros a pesar de presentar menor módulo de deformabilidad que éstas y la inferior resistencia de las probetas de mortero cemento portland respecto a las anteriores. También se puede comprobar la homogeneidad de resultados de las tres probetas de cada tipo.

Como se puede observar, la tensión y la deformación máximas son mayores en las probetas realizadas con morteros modificados con polímeros que en las de hormigón, lo que muestra la bondad del material. Las menores tensiones son alcanzadas por los morteros realizados con cemento Portland.

Figura 4.3 Esquema de las probetas de un material: Hormigón (C), mortero de cemento portland (MC) y mortero modificado con polímeros (MP)

Figura 4.4 Diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas realizadas con un solo material

Probetas	σ_{max} (N/mm ²)	$\sigma_{max}/$ σ_{maxC}	$\epsilon_{max}/$ ϵ_{maxC}	E/ E _C	$U_{max}/$ U_{maxC}	$U_{ult}/$ U_{ultC}
C	38,73	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
MC	34,41	0,89	1,30	0,71	0,87	0,88
MP	45,39	1,17	1,33	0,88	1,34	1,35

Tabla 4.5 Resultados de los ensayos a compresión de un material

4.2.2 Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales

En este apartado se estudiará el comportamiento a compresión de las probetas realizadas con dos materiales, hormigón-mortero de reparación de cemento portland y hormigón-mortero de reparación de cemento modificado con polímeros, comparando entre sí los resultados de las probetas mixtas de cada material en las distintas proporciones 2/3, 1/2, 1/3, con los materiales dispuestos en serie o en paralelo (esto es, con la dirección de la carga perpendicular a la unión entre ambos materiales o bien con la carga paralela a dicha unión), según indican los esquemas de las Figuras 4.5, 4.7 y 4.9, con el objetivo de relacionar el comportamiento de las probetas mixtas realizadas con cada tipo de mortero de reparación para cada porcentaje estudiado.

En primer lugar, aparecen los resultados de los ensayos mecánicos a compresión de las probetas mixtas hormigón-mortero de reparación con la colocación de los materiales en serie, con las proporciones 2/3, 1/2 y 1/3 y también se incorpora un diagrama conjunto donde se muestran agrupados los resultados de los ensayos a compresión en serie de las probetas más representativas, según indica la Figura 4.12 y la Tabla 4.9.

En segundo lugar, se exponen los resultados de los ensayos a compresión de las probetas mixtas hormigón-mortero de reparación con la colocación de los materiales en paralelo, con las proporciones 2/3, 1/2 y 1/3 y un diagrama conjunto donde se muestran agrupados los resultados de los ensayos a compresión en paralelo de las probetas más representativas, según indica la Figura 4.20 y la Tabla 4.13.

Las siguientes Figuras 4.6, 4.8, 4.10 y 4.14, 4.16 y 4.18 muestran un diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria de las probetas más representativas realizadas con dos materiales de cada proporción estudiada y en las Tablas 4.6-4.8 y 4.10-4.12 aparecen los valores más característicos ($\sigma_{\max}$, $\sigma_{\max}/\sigma_{\max C}$, $\varepsilon_{\max}/\varepsilon_{\max C}$, E/E_c , $U_{\max}/U_{\max C}$, $U_{ult}/U_{ult C}$) de cada tres probetas cúbicas sometidas a compresión de dos materiales de cada proporción objeto de estudio.

En el anexo A, se puede consultar las Tablas de resultados de rotura a compresión de cada probeta cúbica elaborada con dos materiales, en serie y en paralelo. Se observa que las probetas ensayadas a compresión en serie y en paralelo son menos resistentes que las de hormigón o cualquier mortero de reparación.

Resulta paradójico que las probetas mixtas ensayadas a compresión en serie y en paralelo, no se encuentren dentro del intervalo que comprende las gráficas de hormigón (38,73 N/mm²) y mortero de reparación (34,41 N/mm² y 45,39 N/mm², valores para el mortero de reparación de cemento portland y para el mortero de reparación de cemento modificado con polímeros, respectivamente). Esto es debido al diferente módulo de deformabilidad de ambos materiales, con lo cual hace que se produzcan tensiones tangenciales en la interfase.

En cualquier caso, cuando se ensayan las probetas a compresión en serie, presentan un módulo de deformabilidad inferior, en cambio la deformación máxima y última aumentan, lo que significa que la ductilidad es mayor.

Resultados de los ensayos a compresión en serie

En este apartado se muestran los resultados más representativos para evaluar el comportamiento a compresión de las probetas mixtas hormigón-mortero en las distintas proporciones, con los materiales situados en serie.

En primer lugar se muestran los resultados de las probetas ensayadas a compresión de dos materiales con proporción 2/3 de mortero de reparación de cemento portland y 1/3 de hormigón (C.MC-2/3-s) y las formadas por 2/3 de mortero de reparación de cemento modificado con polímeros y 1/3 de hormigón (C.MP-2/3-s) colocadas en serie. La Figura 4.5 muestra un esquema de dichas probetas. La Figura 4.6 muestra un diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en las probetas y en la Tabla 4.6 aparecen los resultados más representativos de los ensayos.

En el anexo A, Tablas 9.2 y 9.3, se puede consultar los resultados de rotura a compresión en serie de cada probeta cúbica elaborada con los dos morteros en sus distintas proporciones. En este caso, las probetas mixtas realizadas con mortero de cemento modificado con polímeros alcanzan mayor resistencia para todas las proporciones. Además con una proporción de hormigón del 50% poseen mayor ductilidad que las de mortero de cemento portland.

Figura 4.5 Esquema de las probetas de dos materiales con proporción 2/3 colocadas en serie

Figura 4.6 Diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas realizadas con dos materiales con proporción 2/3 colocados en serie

Probetas	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\max}/$ $\sigma_{\max C}$	$\varepsilon_{\max}/$ $\varepsilon_{\max C}$	$E/$ E_C	$U_{\max}/$ $U_{\max C}$	$U_{ult}/$ $U_{ult C}$
C.MC-2/3-s	25,04	0,65	2,18	0,30	1,11	1,12
C.MP-2/3-s	29,31	0,76	2,58	0,29	1,01	0,96

Tabla 4.6 Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales con proporción 2/3 en serie

En segundo lugar se muestran los resultados de las probetas ensayadas a compresión de dos materiales con proporción 1/2 de hormigón y 1/2 de mortero de reparación de cemento portland (C.MC-1/2-s) y las formadas por 1/2 de hormigón y 1/2 de mortero de reparación de cemento modificado con polímeros (C.MP-1/2-s) con los materiales colocados en serie. La Figura 4.4 muestra un esquema de dichas probetas. La Figura 4.8 muestra un diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en las probetas y en la Tabla 4.7 aparecen los resultados más representativos de los ensayos.

Figura 4.7 Esquema de las probetas de dos materiales con proporción 1/2 colocadas en serie

Figura 4.8 Diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas realizadas con dos materiales con proporción 1/2 colocados en serie

Probetas	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\max}/$ $\sigma_{\max C}$	$\varepsilon_{\max}/$ $\varepsilon_{\max C}$	E/ E _C	$U_{\max}/$ $U_{\max C}$	$U_{ult}/$ $U_{ult C}$
C.MC-1/2-s	24,63	0,64	2,26	0,28	1,30	1,28
C.MP-1/2-s	31,75	0,82	2,79	0,29	1,84	1,63

Tabla 4.7 Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales con proporción 1/2 en serie

En tercer lugar se muestran los resultados de las probetas ensayadas a compresión de dos materiales con proporción 1/3 de mortero de reparación de cemento portland y 2/3 de hormigón (C.MC-1/3-s) y las formadas por 1/3 de mortero de reparación de cemento modificado con polímeros de y 2/3 de hormigón (C.MP-1/3-s) con los materiales en serie. La Figura 4.9 muestra un esquema de dichas probetas. La Figura 4.10 muestra un diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en las probetas y en la Tabla 4.8 aparecen los resultados más representativos de los ensayos.

Figura 4.9 Esquema de las probetas de dos materiales con proporción 1/3 colocadas en serie

Figura 4.10 Diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas realizadas con dos materiales con proporción 1/3 colocados en serie

Probetas	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\max}/$ $\sigma_{\max C}$	$\epsilon_{\max}/$ $\epsilon_{\max C}$	E/ E _C	U _{max} / U _{max C}	U _{ult} / U _{ult C}
C.MC-1/3-s	28,72	0,74	1,84	0,40	1,34	1,29
C.MP-1/3-s	34,02	0,88	2,24	0,39	1,41	1,24

Tabla 4.8 Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales con proporción 1/3 en serie

Por último, se muestran los resultados de las probetas mixtas ensayadas a compresión de dos materiales con las distintas proporciones: 1/3, 1/2 y 2/3 de mortero de reparación/hormigón, tanto de mortero de cemento portland (C.MC-1/3-s, C.MC-1/2-s, C.MC-2/3-s), como de mortero de cemento modificado con polímeros (C.MP-1/3-s, C.MP-1/2-s, C.MP-2/3-s) con los materiales dispuestos en serie. La Figura 4.11 muestra un esquema de dichas probetas y en la Tabla 4.9 aparecen los resultados más representativos de los ensayos.

En la gráfica 4.12 se muestra un diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en las probetas donde aparecen los resultados más representativos para evaluar el comportamiento a compresión de las probetas mixtas hormigón-mortero en las distintas proporciones, con los materiales situados en serie. Como se puede observar en dicha gráfica, la proporción de hormigón y mortero de reparación no influye de manera determinante en el comportamiento resistente de las probetas mixtas cuando los materiales se ensayan en serie, aunque sí disminuyen ligeramente las tensiones máximas a medida que disminuye la cantidad de hormigón en beneficio de la cantidad de mortero. En cambio, sí se muestra el mejor comportamiento de las probetas en las que se ha empleado morteros de reparación modificados con polímeros que en las que se han empleado morteros de cemento Portland.

Las probetas colocadas en serie y formadas por 1/3 de mortero de reparación de cemento modificado con polímeros son las que mayor resistencia alcanzan.

Figura 4.11 Esquema de las probetas de dos materiales con distintas proporciones colocadas en serie

Figura 4.12 Evolución de la tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en el ensayo a compresión de probetas mixtas, con los materiales situados en serie

Probetas	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\max}/$ $\sigma_{\max C}$	$\varepsilon_{\max}/$ $\varepsilon_{\max C}$	$E/$ E_C	$U_{\max}/$ $U_{\max C}$	$U_{ult}/$ $U_{ult C}$
C.MC-1/3-s	28,72	0,74	1,84	0,40	1,34	1,29
C.MC-1/2-s	24,63	0,64	2,26	0,28	1,30	1,28
C.MC-2/3-s	25,04	0,65	2,18	0,30	1,11	1,12
C.MP-1/3-s	34,02	0,88	2,24	0,39	1,41	1,24
C.MP-1/2-s	31,75	0,82	2,79	0,29	1,84	1,63
C.MP-2/3-s	29,31	0,76	2,58	0,29	1,01	0,96

Tabla 4.9 Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales con distintas proporciones colocados en serie

Resultados de los ensayos a compresión en paralelo

En este apartado se muestran los resultados más representativos para evaluar el comportamiento a compresión de las probetas mixtas hormigón-mortero en las distintas proporciones, con los materiales colocados en paralelo.

En primer lugar se muestran los resultados de las probetas ensayadas a compresión de dos materiales con proporción 2/3 de mortero de reparación de cemento portland y 1/3 de hormigón (C.MC-2/3-p) y las formadas por 2/3 de mortero de reparación de cemento modificado con polímeros y 1/3 de hormigón (C.MP-2/3-p) colocadas en paralelo. La Figura 4.13 muestra un esquema de dichas probetas. La Figura 4.14 muestra un diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en las probetas y en la Tabla 4.10 aparecen los resultados más representativos de los ensayos.

En el anexo A, Tablas 9.4 y 9.5, se puede consultar los resultados de rotura a compresión en paralelo de cada probeta cúbica elaborada con los dos morteros en sus distintas proporciones. Se observa una mayor dispersión de resultados en las probetas mixtas de cemento portland que en las de mortero de cemento modificado con polímeros.

Figura 4.13 Esquema de las probetas de dos materiales con proporción 2/3 colocadas en paralelo

Figura 4.14 Diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas realizadas con dos materiales con proporción 2/3 colocados en paralelo

Probetas	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\max}/$ $\sigma_{\max C}$	$\varepsilon_{\max}/$ $\varepsilon_{\max C}$	E/ E _C	$U_{\max}/$ $U_{\max C}$	$U_{ult}/$ $U_{ult C}$
C.MC-2/3-p	28,23	0,73	1,52	0,51	0,71	1,13
C.MP-2/3-p	36,55	0,94	1,83	0,52	1,32	1,22

Tabla 4.10 Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales con proporción 2/3 en paralelo

En segundo lugar se muestran los resultados de las probetas ensayadas a compresión de dos materiales con proporción 1/2 de hormigón y 1/2 de mortero de reparación de cemento portland (C.MC-1/2-p) y las formadas por 1/2 de hormigón y 1/2 de mortero de reparación de cemento modificado con polímeros (C.MP-1/2-p) con los materiales colocados en paralelo. La Figura 4.15 muestra un esquema de dichas probetas. La Figura 4.16 muestra un diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en las probetas y en la Tabla 4.11 aparecen los resultados más representativos de los ensayos.

Figura 4.15 Esquema de las probetas de dos materiales con proporción 1/2 colocadas en paralelo

Figura 4.16 Diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas realizadas con dos materiales con proporción 1/2 colocados en paralelo

Probetas	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\max}/$ $\sigma_{\max C}$	$\varepsilon_{\max}/$ $\varepsilon_{\max C}$	E/ E _C	$U_{\max}/$ $U_{\max C}$	$U_{ult}/$ $U_{ult C}$
C.MC-1/2-p	29,92	0,77	1,87	0,47	1,61	1,57
C.MP-1/2-p	30,54	0,79	1,81	0,44	1,21	1,14

Tabla 4.11 Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales con proporción 1/2 en paralelo

En tercer lugar se muestran los resultados de las probetas ensayadas a compresión de dos materiales con proporción 1/3 de mortero de reparación de cemento portland y 2/3 de hormigón (C.MC-1/3-p) y las formadas por 1/3 de mortero de reparación de cemento modificado con polímeros y 2/3 de hormigón (C.MP-1/3-p) con los materiales en paralelo. La Figura 4.17 muestra un esquema de dichas probetas. La Figura 4.18 muestra un diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en las probetas y en la Tabla 4.12 aparecen los resultados más representativos de los ensayos.

Figura 4.17 Esquema de las probetas de dos materiales con proporción 1/3 colocadas en paralelo

Figura 4.18 Diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas realizadas con dos materiales con proporción 1/3 colocados en paralelo

Probetas	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\max}/$ $\sigma_{\max C}$	$\varepsilon_{\max}/$ $\varepsilon_{\max C}$	$E/$ E_C	$U_{\max}/$ $U_{\max C}$	$U_{ult}/$ $U_{ult C}$
C.MC-1/3-p	26,67	0,69	1,79	0,39	0,99	0,99
C.MP-1/3-p	32,44	0,84	1,50	0,56	1,38	1,24

Tabla 4.12 Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales con proporción 1/3 en paralelo

Por último, se muestran los resultados de las probetas mixtas ensayadas a compresión de dos materiales con las distintas proporciones: 1/3, 1/2 y 2/3 de mortero de reparación/hormigón, tanto de mortero de cemento portland (C.MC-1/3-p, C.MC-1/2-p, C.MC-2/3-p), como de mortero de cemento modificado con polímeros (C.MP-1/3-p, C.MP-1/2-p, C.MP-2/3-p) con los materiales dispuestos en paralelo. La Figura 4.19 muestra un esquema de dichas probetas y en la Tabla 4.13 aparecen los resultados más representativos de los ensayos.

En la Figura 4.20 se muestra un diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en las probetas donde aparecen los resultados más representativos para evaluar el comportamiento a compresión de las probetas mixtas hormigón-mortero en las distintas proporciones, con los materiales situados en paralelo. Cuando los materiales se ensayan en paralelo (Figura 4.20) al igual que cuando se ensayaban en serie, también presentan mejor comportamiento los morteros modificados con polímeros, los cuáles presentan un aumento significativo de la deformación longitudinal unitaria máxima ($\epsilon_{m\acute{a}x}$), de la deformación longitudinal unitaria última (ϵ_u) y de la ductilidad respecto a los morteros a base de cemento Portland. Éstos resultados coinciden con los obtenidos por otros investigadores, que muestran la relación entre la rigidez y la cantidad de polímeros, en los elementos sometidos a compresión (Pascal, Alliche y Pilvin 2004).

Figura 4.19 Esquema de las probetas de dos materiales con distintas proporciones colocadas en paralelo

Figura 4.20 Evolución de la tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en el ensayo a compresión de probetas mixtas, con los materiales situados en paralelo

Probetas	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\max}/$ $\sigma_{\max C}$	$\varepsilon_{\max}/$ $\varepsilon_{\max C}$	$E/$ E_C	$U_{\max}/$ $U_{\max C}$	$U_{ult}/$ $U_{ult C}$
C.MC-1/3-p	26,67	0,69	1,79	0,39	0,99	0,99
C.MC-1/2-p	29,92	0,77	1,87	0,47	1,61	1,57
C.MC-2/3-p	28,23	0,73	1,52	0,51	0,71	1,13
C.MP-1/3-p	32,44	0,84	1,50	0,56	1,38	1,24
C.MP-1/2-p	30,54	0,79	1,81	0,44	1,21	1,14
C.MP-2/3-p	36,55	0,94	1,83	0,52	1,32	1,22

Tabla 4.13 Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales con distintas proporciones colocados en paralelo

4.3 Resultados de los ensayos mecánicos a flexión

En este apartado se recogen los resultados de cuatro vigas elaboradas con hormigón H-25 trabajando a flexión, dos de ellas armadas longitudinalmente con acero tradicional al carbono B500 S y otras dos con acero inoxidable AISI 2304, con cuantías de Ø8 y Ø16. También se recogen los resultados de las piezas estructurales sometidas a ensayos de flexión después de su reparación, considerando dos tipos de mortero, uno de cemento portland y otro de cemento modificado con polímeros, para comparar las diferencias obtenidas.

Con la totalidad de datos obtenidos en la prensa universal MIB 60/AM en los ensayos a flexión, se ha calculado el diagrama momento flector-flecha y la fisuración producida tras el ensayo a flexión. En las Tablas 4.14 y 4.15 aparecen los valores más característicos ($Q_{máx}$, w , M) de cada pieza sometida a flexión. La fuerza de rotura Q es la máxima desarrollada por la máquina durante el ensayo, su valor es $2 \cdot P$. El ancho máximo de fisura producido tras el ensayo a flexión, se denomina w . El momento flector de rotura es el obtenido en el centro del vano, de valor $M = Pl/3$. En la Figura 4.21 se representa el armado, los esquemas de aplicación de cargas y el diagrama de esfuerzos flectores de las vigas.

Figura 4.21 Armado, esquema de cargas y diagramas de esfuerzos flectores de las vigas ensayadas a flexión hasta la rotura

Para estudiar el comportamiento que tienen las vigas reparadas respecto a las vigas en su estado original, en las Tablas también se indican los valores de $Q_{\text{máx}}$ de cada viga reparada, poniéndolos en relación con los valores de $Q_{\text{máx}}$ de las vigas antes de reparar ($Q_{\text{máx}}/Q_{\text{máxC}}$).

En la Figura 4.22 se muestran imágenes en detalle de las roturas de dos vigas armadas con $\varnothing 8$ y $\varnothing 16$, reparadas durante los ensayos de flexión y en las Tablas 4.14- 4.15 se muestra un resumen de los esquemas y diagramas que aparecerán en este apartado.

Viga en el ensayo a flexión

Viga armada con $\varnothing 16$

Viga armada con $\varnothing 8$

Figura 4.22 Detalle de roturas en los ensayos de vigas sometidas a flexión

Tabla 4.14 Resumen esquemático de las vigas antes y después de la reparación

Tabla 4.15 Resumen de los diagramas momento flector-flecha del ensayo a flexión, en vigas antes y después de reparar

4.3.1 Resultados de los ensayos a flexión de las piezas sin reparar

Los resultados de los ensayos de rotura a flexión de las vigas antes de reparar, armadas longitudinalmente con Ø8 (B-SD-8, B-AISI-8) y Ø16 (B-SD-16, B-AISI-16) y dos tipos de acero, al carbono B500SD (B-SD) e inoxidable dúplex AISI 2304 (B-AISI), proceden de ensayos previos (Medina 2012).

Para poder realizar las comparaciones y evaluaciones correspondientes, en la Figura 4.24 se muestra un diagrama momento flector respecto a la flecha de las vigas ensayadas antes de su reparación y en la Tabla 4.16 aparecen los valores más característicos de cada pieza.

En los gráficos se observa cómo la diferencia de comportamiento entre las dos vigas armadas con 2Ø8, es muy superior a la diferencia que se aprecia entre las dos vigas armadas con 2Ø16.

En esta primera apreciación hay que tener en cuenta la forma de rotura de las vigas. Las vigas B-SD-8 y B-AISI-8 rompen por deformación excesiva de su armadura longitudinal (dos Ø8) al superar su límite elástico, con una flecha de más de dos centímetros y, finalmente, la rotura del hormigón de la cabeza de compresión al disminuir la profundidad de la fibra neutra por la deformación de la viga. Las vigas B-SD-16 y B-AISI-16 rompen por agotamiento del hormigón a compresión.

El comportamiento de las vigas B-SD-16 y B-AISI-16, armadas con dos barras Ø16, ha sido muy similar durante el ensayo. Una vez que se ha superado la carga máxima, la curva del gráfico que se corresponde con la armadura de acero al carbono presenta un descenso más brusco que la del acero inoxidable dúplex, mostrando menor ductilidad.

Figura 4.23 Esquema de la mitad de las vigas antes de reparar

Figura 4.24 Diagrama momento flector-flecha del ensayo a flexión, en vigas antes de reparar

Tipo	Probetas	Q máx (KN)	Q máx/Q máxC	w (mm)	M (kNm)
Antes de reparar	B-SD-8	47,46	1,00	0,30	7,91
	B-AISI-8	68,21	1,00	0,30	11,37
	B-SD-16	98,88	1,00	0,10	16,48
	B-AISI-16	103,71	1,00	0,10	17,28

Tabla 4.16 Resultados de los ensayos a flexión, en vigas antes de reparar

4.3.2 Resultados de los ensayos a flexión de las piezas reparadas

La Figura 4.26 muestra el diagrama momento flector-flecha de las dos vigas armadas con dos barras Ø8 (B-SD-8-MC y B-AISI-8-MP) reparadas con mortero de reparación de cemento portland y con mortero de cemento modificado con polímeros y el diagrama momento flector-flecha de las dos vigas armadas con dos barras Ø16 (B-SD-16-MC y B-AISI-16-MP) reparadas de igual forma. Siendo las vigas armadas con acero al carbono las que se han reparado con mortero de cemento portland y las vigas armadas con acero inoxidable las que se han reparado con mortero de cemento modificado con polímeros.

En la Figura 4.25 se muestra un esquema de las vigas ensayadas y en la Tabla 4.17 aparecen los valores más característicos ($Q_{m\acute{a}x}$, $Q_{m\acute{a}x}/Q_{m\acute{a}xC}$, w , M) de cada pieza reparada sometida a flexión hasta la rotura.

Era fácil de predecir, a la vista de los resultados de los ensayos de las vigas sin reparar, que presentaban mayores diferencias de comportamiento entre las dos vigas armadas con 2Ø8, que entre las dos vigas armadas con 2Ø16, al igual que ocurre con las vigas reparadas. Como se puede observar, las principales diferencias de capacidad resistente residen en la diferente cuantía de armadura que poseen las vigas, pero no existen diferencias significativas entre morteros de cemento Portland y morteros modificados con polímeros.

Figura 4.25 Esquema de la mitad de las vigas reparadas con morteros de cemento Portland o morteros modificados con polímeros

Figura 4.26 Diagrama momento flector-flecha del ensayo a flexión, en vigas reparadas con morteros de cemento Portland o morteros modificados con polímeros

Tipo	Probetas	$Q_{\text{máx}}$ (kN)	$Q_{\text{máx}}/Q_{\text{máxC}}$	w (mm)	M (kNm)
Reparadas	B-SD-8-MC	54,27	1,14	1,40	8,94
	B-AISI-8-MP	70,10	1,03	1,50	11,59
	B-SD-16-MC	123,82	1,25	0,50	20,63
	B-AISI-16-MP	124,39	1,20	0,40	20,62

Tabla 4.17 Resultados de los ensayos a flexión, en vigas reparadas con morteros de cemento Portland o morteros modificados con polímeros

5

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

1	Introducción		
2	Estado del conocimiento		
3	Trabajo Experimental	Ensayos a Compresión	Ensayos a Flexión
4
5	Resultados		
5	Análisis y Discusión		
6	Conclusiones y Futuras líneas de investigación		

5.1 Introducción

Debido a que el objetivo principal de esta tesis es evaluar las mejores opciones de reparación en secciones de hormigón sometidas a solicitaciones de compresión o flexión, es imprescindible comparar su comportamiento con el de probetas patrón de hormigón, para comprobar que ambos morteros de reparación (morteros de cemento Portland y morteros de cemento modificados con polímeros) son igualmente válidos.

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados, de rotura a compresión o flexión respectivamente. En el estudio de los resultados de compresión, se analizan la tensión/deformación, las pérdidas o ganancias de resistencia, los resultados máximos de tensión, deformación, módulo de elasticidad y la ductilidad. En el estudio de los resultados de rotura a flexión, se analizan los resultados momento flector-flecha y la fisuración. Para ello, se elaboran diversos gráficos que ayudan a interpretar los resultados.

Dicho análisis permite conocer la influencia de la colocación de los materiales empleados, de las proporciones de mortero-hormigón y del tipo de mortero de reparación aplicado en elementos de hormigón.

5.2 Estudio de los resultados de resistencia a compresión

En este apartado se incluyen los estudios comparativos realizados con los resultados de probetas cúbicas ensayadas a compresión para analizar el efecto producido por las proporciones de mortero (1/3, 1/2, 2/3) y la colocación en serie o en paralelo, para mortero de cemento portland y mortero de cemento modificado con polímeros.

Las gráficas 5.1-5.3 muestran un estudio comparativo de los dos tipos de mortero de reparación de todos los resultados máximos (σ_{max} , E/E_c , $\sigma_{max}/\sigma_{maxc}$, U_{max}/U_{maxc} y U_{ult}/U_{ultc}) de rotura a compresión de las probetas cúbicas mixtas en función de las proporciones (1/3, 1/2, 2/3) y de las probetas de un material.

Figura 5.1 Comparativa de valores máximos ($\sigma_{\max}/\sigma_{\max c}$, $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\max c}$, E/E_c , $U_{\max}/U_{\max c}$, U_u/U_{uc}) de cada proporción mortero-hormigón (1/3, 1/2, 2/3) en las probetas mixtas ensayadas a compresión en serie, con morteros de polímeros y de cemento portland

Figura 5.2 Comparativa de valores máximos ($\sigma_{\max}/\sigma_{\max c}$, $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\max c}$, E/E_c , $U_{\max}/U_{\max c}$, U_u/U_{uc}) de cada proporción mortero-hormigón (1/3, 1/2, 2/3) en las probetas mixtas ensayadas a compresión en paralelo, con morteros de polímeros y de cemento portland

Figura 5.3 Comparativa de valores máximos ($\sigma_{\max}/\sigma_{\max C}$, $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\max C}$, E/E_c , $U_{\max}/U_{\max C}$, $U_u/U_{u C}$) de las probetas de un solo material ensayadas a compresión, con morteros de polímeros y de cemento portland

Las proporciones de mortero-hormigón influyen en los resultados de rotura a compresión, resultando paradójico el hecho de que las roturas en serie y paralelo no se encuentren dentro del intervalo que comprende las curvas de hormigón y mortero de reparación, tanto a nivel de tensiones máximas cómo de deformaciones, obteniéndose deformaciones bajo carga máxima superiores en las probetas mixtas que en las probetas de un solo material. Además, con ninguna proporción se recupera la capacidad de carga del hormigón, ni es posible alcanzar las tensiones que resisten las probetas con solo mortero, debido a los diferentes módulos de elasticidad de los materiales.

Como cabía esperar, la posición en que se colocan los materiales influye también directamente en los resultados a compresión de las probetas, alcanzándose mayores valores de deformación bajo carga máxima en las probetas ensayadas en serie que ensayadas en paralelo. Éstos resultados se corroboran mediante el análisis de los módulos de elasticidad longitudinal, cuyos menores valores se alcanzan cuando su posición es perpendicular a la dirección de aplicación de la carga.

Y por último, el tipo de mortero de reparación empleado influye en los resultados de rotura a compresión de las probetas ensayadas, destacando que las mayores resistencias se obtienen con muestras de un sólo material, alcanzando un 28% más de resistencia los morteros modificados con polímeros que los morteros de cemento Portland, consiguiendo estos morteros de cemento modificados con polímeros resistencias y densidades de energía de deformación incluso mayores que las del hormigón y alcanzando valores de deformación bajo carga máxima mayores que en morteros de cemento Portland.

Las densidades de energía de deformación máxima y última mejoran respecto al hormigón en prácticamente todos los casos, no existiendo una correlación entre estos datos en función de las proporciones hormigón-mortero de reparación, del tipo de ensayo (en serie o en paralelo) ni del tipo de mortero empleado.

La Tabla 5.1 muestra los resultados más significativos de las ensayos a compresión tanto en las probetas con un solo material como en las probetas mixtas, obtenidos a partir de la gráfica 5.4, obteniéndose como datos la tensión máxima (σ_{max}), la relación entre los módulos de elasticidad de las probetas respecto al del hormigón (E/E_c), la relación entre la tensión máxima de las distintas probetas respecto a las del hormigón ($\sigma_{max}/\sigma_{maxc}$) y la relación entre la densidad de energía de deformación máxima y última respecto a las del hormigón (U_{max}/U_{maxc} y U_{ult}/U_{ultc}).

Figura 5.4 Diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas realizadas con uno y dos materiales

En cuanto a las probetas mixtas, con ningún tipo de mortero y con ninguna disposición, se recupera la capacidad de carga del hormigón, ni es posible alcanzar las tensiones que resisten las probetas con solo mortero, debido a que las curvas son modelos no lineales y los materiales poseen diferente módulos de elasticidad.

Tabla 5.1 Resultados del ensayo a compresión de las probetas cúbicas de hormigón-mortero de reparación

Probetas	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\max}/$ $\sigma_{\max C}$	$\varepsilon_{\max}/$ $\varepsilon_{\max C}$	E/ E _C	U _{max} / U _{max C}	U _{ult} / U _{ult C}
C	38,73	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
C.MC-1/3-s	28,72	0,74	1,84	0,40	1,34	1,29
C.MC-1/2-s	24,63	0,64	2,26	0,28	1,30	1,28
C.MC-2/3-s	25,04	0,65	2,18	0,30	1,11	1,12
C.MC-1/3-p	26,67	0,69	1,79	0,39	0,99	0,99
C.MC-1/2-p	29,92	0,77	1,87	0,47	1,61	1,57
C.MC-2/3-p	28,23	0,73	1,52	0,51	0,71	1,13
MC	34,41	0,89	1,30	0,71	0,87	0,88
C.MP-1/3-s	34,02	0,88	2,24	0,39	1,41	1,24
C.MP-1/2-s	31,75	0,82	2,79	0,29	1,84	1,63
C.MP-2/3-s	29,31	0,76	2,58	0,29	1,01	0,96
C.MP-1/3-p	32,44	0,84	1,50	0,56	1,38	1,24
C.MP-1/2-p	30,54	0,79	1,81	0,44	1,21	1,14
C.MP-2/3-p	36,55	0,94	1,83	0,52	1,32	1,22
MP	45,39	1,17	1,33	0,88	1,34	1,35

Las roturas en serie y paralelo no se encuentran dentro del intervalo que comprende las curvas de hormigón y mortero de reparación, tanto a nivel de tensiones máximas como de deformaciones. Esto es debido al diferente módulo de elasticidad de ambos materiales, que genera tensiones tangenciales en la interfase, mostrando dispersión de resultados.

5.2.1. Análisis de los resultados tensión/deformación

Se elaboran unas gráficas con los resultados tensión-deformación que permiten apreciar cuál es el comportamiento de las probetas cúbicas para cada tipo de mortero de reparación empleado, con las distintas proporciones (1/3, 1/2, 2/3) ensayadas a compresión en serie y en paralelo.

Los resultados obtenidos tras los ensayos de rotura a compresión de las probetas mixtas para cada tipo de mortero de reparación, se observan en las gráficas 5.5 y 5.6. En la gráfica 5.5 aparece la evolución de la tensión respecto a la deformación longitudinal

unitaria para las distintas proporciones y para las dos formas de colocación de la carga, de las probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación de cemento portland y la gráfica 5.6 muestra la evolución de la tensión respecto a la deformación longitudinal unitaria para las distintas proporciones y para las dos formas de colocación de la carga, de las probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación de cemento modificado con polímeros.

Figura 5.5 Evolución de la tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en el ensayo a compresión de probetas mixtas hormigón-mortero de reparación de cemento portland

Figura 5.6 Evolución de la tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en el ensayo a compresión de probetas mixtas hormigón-mortero de cemento modificado con

polímeros

Los resultados obtenidos en el ensayo a compresión de las probetas mixtas, muestran que cuando las probetas se realizan con mortero de cemento modificado con polímeros, la tensión máxima es superior a cuando las probetas se realizan con mortero de cemento portland y en ambos casos, las mayores deformaciones se producen con los materiales colocados en serie.

5.2.2 Análisis de variación de la capacidad de carga

En este apartado se muestra la variación de la capacidad de carga entre los elementos de hormigón (probetas) y sus correspondientes en probetas mixtas, y por tanto la relación del comportamiento de elementos mixtos ensayados a compresión (Gráfica 5.7).

Figura 5.7 Relación entre la capacidad de carga de probetas mixtas sometidas a compresión respecto a sus homólogas de hormigón

Como se puede observar, cuando los materiales se encuentran en serie y sometidos a compresión, la capacidad de carga disminuye a medida que aumenta la cantidad de mortero de reparación. Cuando los materiales se encuentran en paralelo respecto a la carga aplicada, este efecto no es tan acusado, pero se producen mayores pérdidas de capacidad resistente cuando se han empleado morteros de cemento Portland que cuando se ha reparado con morteros modificados con polímeros.

De los resultados obtenidos en los ensayos a compresión de probetas elaboradas con un material, se desprende que la resistencia máxima alcanzada por los tres tipos de materiales ensayados, presenta diferencias significativas entre ambos morteros de reparación. En cambio no se produce tanta diferencia entre el hormigón y cada tipo de mortero individualmente.

5.2.3 Análisis de la deformación máxima, ϵ

A continuación se presentan las gráficas comparativas de los valores obtenidos de deformación máxima $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\max C}$.

En la gráfica 5.8 se muestran los datos de deformación máxima en relación al hormigón $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\max C}$, de los resultados a compresión que corresponden con la tensión máxima de las probetas cúbicas realizadas con un material y mixtas en serie o paralelo, comparando los resultados del mortero de cemento portland y del mortero de cemento modificado con polímeros y en la gráfica 5.9 se representa un diagrama comparativo de la deformación máxima de las probetas mixtas con un mejor comportamiento en la colocación en serie y en paralelo frente a las probetas de un material y el hormigón.

Figura 5.8 Deformación máxima en relación al hormigón $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\max C}$ /Probetas cúbicas, comparando los resultados de cada tipo de mortero

En la gráfica 5.8 se observan valores de deformación máxima en general superiores para las probetas elaboradas con mortero de cemento modificado con polímeros en relación con los de las probetas elaboradas con mortero de cemento portland. En ambos casos, la deformación máxima es superior a la del hormigón.

Figura 5.9 Deformación máxima en relación al hormigón $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\max C}$ /Probetas cúbicas, comparando el mejor comportamiento en serie y en paralelo de las probetas mixtas con las de un material

Las deformaciones bajo carga máxima son superiores en las probetas mixtas que en las probetas de un solo material, alcanzándose mayores valores en las probetas ensayadas en serie que ensayadas en paralelo y mayores en morteros modificados con polímeros que en morteros de cemento Portland. Éstos resultados se corroboran mediante el análisis de los módulos de elasticidad longitudinal, cuyos menores valores se alcanzan, en las probetas ensayadas en serie.

Además, con la colocación en serie y en paralelo, los valores de deformación máxima son mayores para la proporción mortero-hormigón 1/2. Los resultados de deformación correspondiente a la tensión máxima de las probetas de un material, son similares para los dos morteros (mortero de cemento portland y mortero de cemento modificado con polímeros).

5.2.4 Análisis porcentual de resistencia

Se analiza la resistencia de las probetas cúbicas de dos materiales y de un material en función del tipo de mortero de reparación empleado, de las proporciones de mortero-hormigón y de la colocación de la carga.

Análisis porcentual de resistencia de probetas mixtas de un material

En la Tabla 5.2 y la Figura 5.10 se muestran los porcentajes de las pérdidas o ganancias de resistencia en relación al hormigón, para cada tipo de mortero de reparación.

ENSAYO DE COMPRESIÓN 1 Material		↓ MC	↓ MP
PÉRDIDAS/GANANCIAS DE RESISTENCIA (%)	TIPO DE MORTERO DE REPARACIÓN		
-11	MC		
+17	MP		

Tabla 5.2 Pérdidas o ganancias de resistencia en relación al hormigón, en tanto por ciento en morteros de cemento portland (MC) y morteros modificados con polímeros (MP), ensayados a compresión

Figura 5.10 Análisis porcentual de pérdidas o ganancias de resistencia para cada tipo de mortero de reparación, de cemento portland y modificado con polímeros

Como se puede observar, los morteros de cemento portland experimentan pérdidas de resistencia en relación al hormigón del 11% mientras que los morteros de cemento modificados con polímeros ganan un 17% de resistencia.

Se obtiene un 28% más de resistencia con los morteros de reparación de cemento modificado con polímeros frente a los morteros de cemento portland, esto es debido a que durante el ensayo su capacidad de deformación fue mayor.

Análisis porcentual de resistencia de probetas mixtas de dos materiales

En la Tabla 5.3 y la Figura 5.11 se muestra la relación entre la pérdida de resistencia y la proporción de mortero-hormigón, para los dos tipos de morteros de reparación con la colocación de los materiales en paralelo respecto a la carga.

ENSAYO DE COMPRESIÓN 2 Materiales en paralelo		
PROPORCIONES MORTERO- HORMIGÓN	PÉRDIDAS DE RESISTENCIA (%)	TIPO DE MORTERO DE REPARACIÓN
1/3	31	MC
	16	MP
1/2	23	MC
	21	MP
2/3	27	MC
	6	MP

Tabla 5.3 Pérdidas de resistencia en relación al hormigón, en tanto por ciento en morteros de cemento portland (MC) y morteros modificados con polímeros (MP), ensayados a compresión en paralelo, en función de la proporción mortero-hormigón

Figura 5.11 Análisis porcentual de pérdidas de resistencia en función de la proporción de mortero-hormigón, para cada tipo de mortero de reparación, de cemento portland y modificado con polímeros con la colocación en paralelo

En la Tabla 5.4 y la Figura 5.12 se muestra la relación entre la pérdida de resistencia y la proporción de mortero-hormigón, para los dos tipos de morteros de reparación con la colocación de los materiales en paralelo respecto a la carga.

<div> <div>ENSAYO DE COMPRESIÓN</div> <div>2 Materiales en serie</div> <div> </div> </div>		
PROPORCIONES MORTERO-HORMIGÓN	PÉRDIDAS DE RESISTENCIA (%)	TIPO DE MORTERO DE REPARACIÓN
1/3	26	MC
	12	MP
1/2	36	MC
	18	MP
2/3	35	MC
	24	MP

Tabla 5.4 Pérdidas de resistencia en relación al hormigón, en tanto por ciento en morteros de cemento portland (MC) y morteros modificados con polímeros (MP), ensayados a compresión en serie, en función de la proporción mortero-hormigón

Figura 5.12 Análisis porcentual de pérdidas de resistencia en función de la proporción de hormigón-mortero, para cada tipo de mortero de reparación, de cemento portland y modificado con polímeros con la colocación en serie

Del análisis se desprende cómo la incorporación de distintas proporciones de mortero de reparación en el hormigón produce una disminución de la resistencia en las probetas mixtas. Cuando los materiales se colocan en paralelo, las mayores pérdidas se producen para proporciones de mortero de cemento portland-hormigón 1/3 y para proporciones mortero de cemento modificado con polímeros-hormigón 1/2. Cuando los materiales se disponen en serie, las mayores pérdidas se dan en proporciones de mortero de cemento portland-hormigón 1/2 y para proporciones mortero de cemento modificado con polímeros-hormigón 2/3.

De la comparación de las gráficas 5.11 y 5.12 se desprende que en las probetas mixtas de mortero de cemento portland las mayores pérdidas de resistencia se producen con la colocación de los materiales en serie con proporciones 1/2 y 2/3. En las probetas mixtas de cemento modificado con polímeros, las mayores pérdidas de resistencia se producen con las proporciones 2/3 en serie y 1/2 con la disposición de los materiales en paralelo.

Es importante destacar, que las mayores resistencias se obtienen con muestras de un sólo material, alcanzando un 28% más de resistencia los morteros modificados con polímeros que los morteros de cemento Portland, consiguiendo estos morteros modificados con polímeros resistencias incluso mayores que las del hormigón.

5.2.5 Análisis del módulo de elasticidad, E

A continuación se presentan las gráficas comparativas de los valores obtenidos del módulo de elasticidad longitudinal E_{max}/E_{maxC} .

En la gráfica 5.13 se muestran los datos del módulo de elasticidad longitudinal en relación al hormigón E/E_c , de los resultados a compresión de las probetas cúbicas realizadas con un material y mixtas en serie o paralelo, comparando los resultados de los dos tipos de mortero.

Figura 5.13 Módulo de elasticidad longitudinal en relación al hormigón E/E_c / Probetas cúbicas, comparando los resultados de cada tipo de mortero

Los datos observados en la gráfica 5.13 muestran en general similitud de resultados del módulo de elasticidad en las probetas mixtas ensayadas en serie o en paralelo para cualquier tipo de mortero. El módulo de elasticidad para cualquier tipo de mortero de reparación es inferior al hormigón y las probetas elaboradas con mortero de cemento modificado con polímeros poseen un módulo de elasticidad superior en relación con el de las probetas elaboradas con mortero de cemento portland.

Figura 5.14 Módulo de elasticidad longitudinal en relación al hormigón E/E_c /Probetas cúbicas, comparando el mejor comportamiento en serie y en paralelo de las probetas mixtas con las de un material

El módulo de elasticidad longitudinal es superior en las probetas de un solo material que en las probetas mixtas, alcanzándose mayores valores en las probetas ensayadas en paralelo que ensayadas en serie y mayores en morteros modificados con polímeros que en morteros de cemento Portland.

Además, con la colocación en serie y en paralelo, los valores del módulo de elasticidad son superiores para la proporción mortero-hormigón 1/3.

5.2.6 Análisis comparativo de la densidad de energía de deformación, $U_{\max}$ y U_u

En las gráficas 5.15 y 5.16 aparecen los resultados de densidad de energía de deformación máxima y última con gran dispersión de resultados.

Figura 5.15 Densidad de energía de deformación máxima en relación al hormigón $U_{\max}/U_{\max C}$ / Probetas cúbicas, comparando los resultados de cada tipo de mortero

Figura 5.16 Densidad de energía de deformación última en relación al hormigón $U_u/U_{u C}$ / Probetas cúbicas, comparando los resultados de cada tipo de mortero

Las densidades de energía de deformación máxima y última mejoran respecto al hormigón en prácticamente todos los casos, no existiendo una correlación entre estos datos en función del tipo ensayo (en serie o en paralelo), de las proporciones hormigón-mortero de reparación ni del tipo de mortero empleado. La ductilidad mayor corresponde a las probetas que poseen la proporción 1/2 de ambos materiales, por ser las que mayor energía acumulan bajo las curvas máxima y última.

Figura 5.17 Densidad de energía de deformación máxima y última en relación al hormigón U_{max}/U_{maxc} y U_u/U_{uc} / Probetas cúbicas, comparando el mejor comportamiento en serie y en paralelo de las probetas mixtas con las de un material

Comparando el mejor comportamiento de las probetas en serie y en paralelo de las probetas mixtas con las de un material, se observa que los valores de energía para tensión máxima y última de rotura son superiores en las probetas mixtas que en las probetas de un material y se produce un descenso de valores para las probetas de cemento portland en relación a las probetas de hormigón.

Se observa cómo los valores obtenidos para el mortero de reparación de cemento modificado con polímeros, es superior a los obtenidos para el mortero de cemento portland, en probetas de un material y mixtas, lo que indica que poseen una mayor ductilidad.

5.3 Estudio de los resultados de resistencia a flexión

En este apartado se incluyen los estudios comparativos realizados con los resultados de los ensayos de rotura a flexión de las vigas de hormigón para analizar el comportamiento mecánico y estructural de las vigas ensayadas a flexión antes y después de reparar, observando el efecto producido por el tipo de acero de las armaduras (acero al carbono B500SD y acero inoxidable dúplex AISI 2304) y las cuantías de 8 o 16 mm, antes y después de la reparación con mortero de cemento portland y mortero de cemento modificado con polímeros.

En la gráfica 5.18 se representa el diagrama momento flector-flecha en vigas armadas con Ø8 y Ø16, de acero al carbono B.SD-8 y de acero inoxidable B.AISI-8 antes y después de reparar. La Tabla 5.5 permite comparar los resultados obtenidos en los ensayos a flexión en las vigas originales y en las vigas reparadas.

Figura 5.18 Diagrama momento flector-flecha en vigas antes y después de reparar, con dos tipos de aceros y diámetros de Ø8 y Ø16

Tabla 5.5

Resultados de los ensayos de rotura a flexión en las vigas de hormigón

Vigas (Ensayo a flexión)				
Tipo	Probetas	Q _{máx} (KN)	w (mm)	M (kNm)
Antes de reparar	B-SD-8	47,46	0,30	7,9095
	B-SD-16	98,88	0,10	16,4782
	B-AISI-8	68,21	0,30	11,367
	B-AISI-16	103,71	0,10	17,2839
Reparadas	B-SD-8-MC	54,27	1,40	8,9443
	B-SD-16-MC	123,82	0,50	20,6357
	B-AISI-8-MP	70,10	1,50	11,5860
	B-AISI-16-MP	124,39	0,40	20,6183

Como se puede observar, las vigas reparadas tienen mayor capacidad de carga (Q_{max}) y presentan mayores momentos de rotura (M) independientemente del tipo de mortero de reparación. Por otro lado, las reparadas con morteros modificados con polímeros, resisten mayores cargas que las reparadas con morteros de cemento Portland, apreciándose menos diferencia de comportamiento a medida que aumenta el diámetro de las armaduras. En cambio, la abertura de fisura (w) es del orden de 5 veces mayor en las probetas reparadas que en las probetas originales, independientemente del tipo de mortero de reparación empleado y del diámetro de la barra, lo que influye en su durabilidad.

Por último se puede observar, que la reparación de las vigas mediante morteros de cemento Portland o morteros modificados con polímeros, aumentan la ductilidad respecto a las vigas en su estado inicial. La única excepción fue la viga B-SD-8-MC, en la que sucede lo contrario. También se observa la superior ductilidad y resistencia de las piezas armadas con acero inoxidable, respecto a las armadas con acero al carbono. Por otro lado, en las vigas B-SD-16-MC y B-AISI-16-MP, armadas con dos $\varnothing 16$, se produce un aumento importante de la ductilidad en las vigas reparadas respecto a las mismas vigas en su estado inicial.

5.3.1 Análisis de los resultados momento flector-flecha

Se elaboran unas gráficas con los resultados momento flector-flecha que permiten apreciar cuál es el comportamiento de las vigas para cuantías de Ø8 y Ø16 antes y después de ser reparadas con cada tipo de mortero y para cada acero.

Los resultados obtenidos tras los ensayos de rotura a flexión de las vigas de hormigón para cada cuantía, se observan en las gráficas 5.19 y 5.20. En la gráfica 5.19 aparece el diagrama momento flector-flecha en vigas armadas con Ø8, de acero al carbono B.SD-8 y de acero inoxidable B.AISI-8 antes y después de reparar y la gráfica 5.20 muestra el diagrama momento flector-flecha en vigas armadas con Ø16 de acero al carbono B.SD-16 y de acero inoxidable B.AISI-16 antes y después de la reparación.

Figura 5.19 Diagrama momento flector-flecha en vigas antes y después de reparar y con diámetros de Ø8

Figura 5.20 Diagrama momento flector-flecha en vigas antes y después de reparar y con diámetros de Ø16

Las vigas de hormigón sin reforzar ensayadas por Medina (2012) y realizadas con armaduras longitudinales de diámetro 8mm, rompieron por flexión, debido a un alargamiento excesivo de su armadura longitudinal al superar su límite elástico, produciéndose importantes fisuras en la cara inferior de la pieza. En cambio, las vigas con armaduras longitudinales de diámetro 16mm fallaron por agotamiento del hormigón a compresión en el tramo central y las armaduras no pudieron deformarse en exceso por lo que el ancho de fisuras no era significativo.

Las gráficas 5.19 y 5.20 muestran el comportamiento de las vigas con diámetros de 8 y 16mm, antes y después de reparar y con los dos morteros empleados. Se observa que el ensayo a flexión de las vigas reparadas presenta mayores diferencias de comportamiento entre las dos vigas armadas con Ø8, que entre las dos vigas armadas con Ø16, al igual que ocurre con las vigas sin reparar. Las vigas reparadas presentan mayores momentos de rotura independientemente del tipo de mortero de reparación y se puede constatar que existe un aumento homogéneo de la resistencia en comparación de las vigas sin reparar y reparadas para los dos tipos de mortero. Por otro lado, las vigas reparadas alcanzan mayor deformación máxima y última.

5.3.2 Análisis de variación de la capacidad de carga

En la gráfica 5.21 se muestra la variación de la capacidad de carga entre los elementos de hormigón (vigas) y sus correspondientes en vigas reparadas, y por tanto la relación del comportamiento de elementos mixtos ensayados a flexión.

Figura 5.21 Relación entre la capacidad de carga de vigas reparadas sometidas a flexión respecto a sus homólogas de hormigón

En cuanto a los ensayos a flexión, todas las vigas reparadas aumentan su capacidad de carga, siendo el efecto más acentuado en las vigas de mayor cuantía, que para aceros al carbono aumenta valores de carga de aproximadamente un 25%. A la vista de estos resultados, se puede concluir que es posible incrementar la capacidad de carga en vigas reparadas respecto de la original, siendo este incremento de carga superior cuando se emplea un mortero de cemento Portland en vez de un mortero modificado con polímeros.

5.3.3 Análisis de la ductilidad

Las gráficas 5.22-5.25 muestran la ductilidad de las vigas armadas con 2Ø8 y 2Ø16 reparadas respecto a las vigas en su estado inicial y en las gráficas 5.26 y 5.27 se observa la ductilidad de las vigas armadas con 2Ø8 y 2Ø16 por tipo de acero (al carbono B500SD o inoxidable AISI 2304).

Figura 5.22 Ductilidad vigas armadas con Ø8 de acero al carbono

Figura 5.23 Ductilidad vigas armadas con Ø8 de acero inoxidable

Las vigas reparadas con morteros de cemento Portland o morteros modificados con polímeros, aumentan la ductilidad respecto a las vigas antes de la reparación. La única excepción fue la viga B-SD-8-MC, en la que sucede lo contrario.

Figura 5.24 Ductilidad vigas armadas con Ø16 de acero al carbono

Figura 5.25 Ductilidad vigas armadas con Ø16 de acero inoxidable

En cuanto a las vigas armadas con dos Ø16 (B-SD-16-MC y B-AISI-16-MP), se produce un aumento importante de la ductilidad en las vigas reparadas respecto a las mismas vigas en su estado inicial.

Figura 5.26 Ductilidad vigas armadas con Ø8 por tipo de acero

Figura 5.27 Ductilidad vigas armadas con Ø16 por tipo de acero

También se observa mayor ductilidad y resistencia de las vigas armadas con acero inoxidable, respecto a las armadas con acero al carbono.

5.3.4 Análisis de la fisuración

Para analizar los resultados de fisuración, se plasman en varias imágenes las fisuras producidas en cada una de las vigas ensayadas y su anchura. Las Figuras 5.1-5.8 muestran la fisuración obtenida tras los ensayos de rotura a flexión para cada viga antes y después de reparar. Los anchos de fisura se midieron mediante fisurómetro después del ensayo, teniendo en cuenta las fisuras aparecidas durante el ensayo antes de alcanzar la carga máxima.

Figura 5.28 Fisuración en el tramo central de la viga B-SD-8 antes de reparar

Figura 5.29 Fisuración en el tramo central de la viga B-AISI-8 antes de reparar

Figura 5.30 Fisuración en el tramo central de la viga B-SD-16 antes de reparar

Figura 5.31 Fisuración en el tramo central de la viga B-AISI-16 antes de reparar

Figura 5.32 Fisuración en el tramo central de la viga B-SD-8 después de reparar con mortero de cemento portland

Figura 5.34 Fisuración en el tramo central de la viga B-SD-16 después de reparar con mortero de cemento portland

Tras plantear los esquemas de fisuración para cada viga ensayada y medido el ancho de las fisuras, a continuación se realiza un análisis de los valores experimentales obtenidos viendo la influencia que han tenido los siguientes parámetros en los valores de ancho de fisuras:

- Cuantía de armadura longitudinal dispuesta
- Tipo de acero de armadura
- Tipo de mortero de reparación

La formación de fisuras en el hormigón traccionado, modifica sustancialmente el comportamiento del elemento estructural, de modo que entre labios de fisura, el acero absorbe todo el esfuerzo de tracción, pero entre fisuras, se produce el anclaje de la armadura en el hormigón y se transfiere a éste parte de la tracción. Si ésta tracción supera la resistencia a tracción del hormigón, se forma una nueva fisura. Como se puede observar, en todos los casos, el mayor número de fisuras se concentra en el centro del vano, fisurándose además del hormigón, el mortero de reparación, en el caso de las vigas reparadas.

Con los datos de la Tabla 5.5, en la Figura 5.28 se muestra la relación entre el ancho de fisura de vigas reparadas sometidas a flexión respecto a sus homólogas de hormigón, de cuantías de 8 y 16 mm.

Gráfica 5.36 Relación entre el ancho de fisura de vigas reparadas sometidas a flexión respecto a sus homólogas de hormigón

En las vigas reparadas se producen anchos de fisura importantes en la zona central cuando las vigas son de menor cuantía (B-AISI-8-MP y B-SD-8-MC). El tipo de acero no parece influir de manera determinante en el ancho de fisura.

En cambio, la abertura de fisura (w) es del orden de 5 veces mayor en las probetas reparadas que en las probetas originales, independientemente del tipo de mortero de reparación empleado y del diámetro de la barra, lo que influye en su durabilidad.

6

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

1	Introducción		
2	Estado del conocimiento		
3	Trabajo Experimental	Ensayos a Compresión	Ensayos a Flexión
4
5		Resultados	
6	Análisis y Discusión	Conclusiones y Futuras líneas de investigación	

6.1 Conclusiones

En respuesta a los objetivos propuestos al comienzo del presente trabajo, se puede concluir de forma general, que:

- En la reparación de estructuras de hormigón armado mediante morteros de reparación, el mejor comportamiento referente a las características mecánicas, se produce cuando el elemento estructural se encuentra sometido a flexión y la reparación se realiza con morteros de cemento Portland.
- En estructuras sometidas a compresión, es mejor emplear morteros de reparación modificados con polímeros, los cuales aumentan su ductilidad cuando la reparación se sitúa en serie respecto a la carga.
- El sobrecoste económico que supone la reparación de estructuras de hormigón, mediante el empleo de morteros de reparación de cemento portland modificado con polímeros, frente a la reparación mediante mortero de cemento portland, se ve compensado con la superior vida útil alcanzada por la estructura sin necesidad de mantenimiento ni costes de reparación.

6.1.1 Conclusiones sobre el estudio del comportamiento a compresión de probetas de hormigón y morteros de reparación

Del análisis de los resultados obtenidos en los ensayos a compresión, de elementos estructurales mixtos (hormigón-morteros de reparación, a base de cemento Portland o modificados con polímeros), se han extraído las siguientes conclusiones:

- El comportamiento mecánico a compresión de las probetas de un solo material, presenta importantes diferencias respecto a las probetas mixtas hormigón-mortero de reparación, debido no sólo a su composición, sino también al tipo de rotura (en serie y en paralelo) y al diferente módulo de elasticidad de ambos materiales.
- Los morteros modificados con polímeros son capaces de alcanzar resistencias y densidades de energía de deformación mayores que las del hormigón, lo que no sucede en los morteros de cemento Portland.

- Las probetas mixtas no son capaces de recuperar la capacidad de carga del hormigón, independientemente del tipo de mortero y la disposición de la reparación respecto a la carga, mostrando el comportamiento más dúctil en morteros modificados con polímeros, cuando la reparación se encuentra en serie respecto a la carga.
- El tipo de mortero de reparación empleado influye en los resultados de rotura a compresión de las probetas ensayadas, destacando que las mayores resistencias se obtienen con muestras de un sólo material, alcanzando un 28% más de resistencia los morteros modificados con polímeros que los morteros de cemento Portland,

6.1.2 Conclusiones sobre el estudio del comportamiento a flexión de piezas estructurales de hormigón armado reparadas con morteros de reparación

Tras analizar los resultados obtenidos en los ensayos a flexión, de elementos estructurales mixtos (hormigón-morteros de reparación, a base de cemento Portland o modificados con polímeros), se concluye:

- Los resultados de los ensayos mecánicos a flexión han corroborado que las vigas reparadas son capaces de alcanzar las cargas de rotura de las vigas iniciales, e incluso mayores. Además, la ductilidad de las vigas reparadas con mortero de reparación modificado con polímeros es superior a la de las vigas reparadas con mortero de cemento y a la de las vigas en su estado inicial.
- Todas las vigas reparadas aumentan su capacidad de carga en los ensayos a flexión, siendo el efecto más acentuado en las vigas de mayor cuantía, que para aceros al carbono aumenta valores de carga de aproximadamente un 25%.
- Los resultados de los ensayos de rotura a flexión de las cuatro vigas de hormigón reparadas y su comparación con las vigas antes de reparar, han mostrado la efectividad de la reparación con ambos tipos de mortero de reparación: de cemento Portland y modificado con polímeros, si bien es cierto que la viga armada con barras de acero al carbono B500 SD de menor cuantía, ha tenido un comportamiento frágil tras ser reparada con mortero de cemento Portland.

- Respecto al estudio de la fisuración producida en las cuatro vigas ensayadas a flexión, se ha observado que tanto la anchura media entre fisuras como su número, se ha visto incrementado respecto a las vigas antes de reparar. La abertura de fisura es del orden de 5 veces mayor en las piezas reparadas que en las probetas originales, independientemente del tipo de mortero de reparación empleado y del diámetro de la barra, lo que influye en su durabilidad.

6.2 Futuras líneas de investigación

En este apartado se exponen futuras líneas que permitan continuar con el trabajo desarrollado en la presente tesis. Se citan por un lado, las futuras líneas de investigación de los estudios a compresión y por otro lado, de los estudios a flexión.

6.2.1 Futuras líneas de investigación sobre el estudio del comportamiento a compresión de probetas de hormigón y morteros

- Los resultados obtenidos en éste trabajo proceden de un limitado número de ensayos y sería conveniente ampliar la campaña experimental para confirmar algunas de las conclusiones extraídas, especialmente las referentes al valor de resistencia de las probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación en proporción de hormigón 33,3% y 50% sometidas a compresión en paralelo y las relativas a un solo material de hormigón o mortero reparación, debido a que la ductilidad obtenida en dichas probetas resulta inferior al resto de casos.
- La campaña de ensayos debería contemplar también un mayor número de proporciones de hormigón-mortero de reparación en las probetas cúbicas, tanto de mortero modificado con polímeros como de cemento Portland, para poder detectar posibles diferencias debidas a esa variable.
- Estudiar el comportamiento mecánico del hormigón frente a otras tipologías de morteros de reparación, evaluando la influencia de cada mortero.
- Analizar el comportamiento estructural de piezas a escala real.

- Las diferencias de dosificación influyen en la durabilidad de las estructuras de hormigón, por tanto, se propone relacionar distintas dosificaciones tanto en el hormigón como en el mortero para una misma tipología de mortero de reparación.

6.2.2 Futuras líneas de investigación sobre el estudio del comportamiento a flexión de piezas estructurales de hormigón armado reparadas con morteros

- Para confirmar los datos expuestos, es necesario incrementar el número de piezas estructurales a ensayar para comparar diferentes piezas entre sí.
- Igualmente sería interesante ampliar el número de probetas realizadas, estableciendo distintas cuantías de armado.
- Se propone contemplar las diferencias mecánicas del armado longitudinal de acero inoxidable con respecto al acero al carbono.
- Estudiar el comportamiento de elementos estructurales de hormigón frente a otras tipologías de morteros de reparación, para evaluar la influencia del mortero en el comportamiento mecánico y estructural en cada caso.
- Analizar el comportamiento de vigas a escala real.
- Por último, para un conocimiento más profundo sobre las reparaciones de elementos estructurales de hormigón, convendría estudiar nuevas técnicas de reparación de dichos elementos.

B IBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

ACI-318S-08. (2008): *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

AENOR (1994): *UNE 83702:1994 IN. Materiales de reparación. Preparación de superficies de hormigón armado para su reparación. Recomendaciones de uso*. España: Asociación Española de Normalización y Certificación AEN/CTN 83.

AENOR (2001): *UNE-EN 10020 Definición y clasificación de los tipos de aceros*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.

AENOR (2004): *UNE-EN 13139/AC:2004. Áridos para morteros*. AEN/CTN 146 – Áridos, España.

AENOR (2006): *UNE-EN 1504-3:2006, 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*, AEN/CTN 83 – Hormigón, España.

AENOR (2009): *UNE-EN 12390-2:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia*. AEN/CTN 83 - Hormigón.

AENOR (2009): *UNE-EN 12390-3:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas*. España: Asociación Española de Normalización y Certificación AEN/CTN 83.

AENOR (2009): *UNE-EN 12390-5:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas*. España: Asociación Española de Normalización y Certificación AEN/CTN 83.

AENOR (2009 a): *UNE-EN 12620:2003+A1:2009. Áridos para hormigón*. AEN/CTN 146 – Áridos, España.

AENOR (2011): *UNE-EN 197-1:2011, Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes*. AEN/CTN 80 - Cementos y cales, España.

AENOR (2011): *UNE-UNE 36065:2011: Barras corrugadas de acero soldable con características especiales de ductilidad para armaduras de hormigón armado*. AEN/CTN 36 - Siderurgia, España.

AENOR (2013): *UNE-EN 12390-1:2013: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes*. AEN/CTN 83 - Hormigón, España.

AENOR (2015): *UNE-EN 10088-1:2015: Aceros inoxidables. Parte 1: Relación de aceros inoxidables*. AEN/CTN 36 - Siderurgia, España.

AFRIDI, M., et al. (2003): "Development of polymer particles in powdered and aqueous polymer-modified mortars". *Cement and Concrete Research*, Vol. 33 (11), 1715-1721.

AGGELIS, D. y SHIOTANI, T. (2007): "Repair evaluation of concrete cracks using surface and through-transmission wave measurements". *Cement and Concrete Composites*. Vol. 29, 700-711.

AGUADO, A. y AGULLÓ, L. (1995): *Interacción entre los materiales de reparación, la zona objeto de reparación y la técnica de reparación*. Madrid: Jornadas sobre El estado del arte en reparación y refuerzo de estructuras de hormigón, Grupo Español del Hormigón.

AGUADO, A., AGULLÓ, L. y FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M. (1996): *Diagnóstico de daños y reparación de obras hidráulicas de hormigón*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, cap. II, pp. 25-36.

AHMAD, S., et al. (2012) "Use of polymer modified mortar in controlling cracks in reinforced concrete beams". *Construction and Building Materials*, Vol. 27, 91-96.

ALBITAR, M., ALI, M. y VISINTIN, P. (2018): "Evaluation of tension-stiffening, crack spacing and crack width of geopolymer concretes". *Construction and Building Materials*, Vol. 160, 408-414.

ALI, M.S. et al. (2018): "An experimental study of electrochemical incompatibility between repaired patch concrete and existing old concrete". *Construction and Building Materials*, Vol. 174, 159-172.

AL-ZAHRANI, M., et al. (2003): "Mechanical properties and durability characteristics of polymer and cement-based repair materials". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25 (4-5), 527-537.

ANDRADE, C., ALONSO, C. y MOLINA, F: (1993): "Cover cracking as a function of bar corrosion". Part I Experimental test. *Materials and Structures*, Vol .26, 453-464.

ARIFFIN, N. (2015): "Strength properties and molecular composition of epoxy-modified mortars". *Construction and Building Materials*, Vol. 94, 315-322.

ASSAAD, J. (2018): "Development and use of polymer-modified cement for adhesive and repair applications". *Construction and Building Materials*, Vol. 163, 139-148.

AZAD, A. y AHMAD, S. (2007): "Residual strength of corrosion-damaged reinforced concrete beams", *American Concrete Institute Materials Journal*, Vol. 104 (1), 40-47.

BADOO, N. (2008): "Stainless steel in construction: a review of research, applications, challenges and opportunities". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 64, 1199-1206.

BARBERENA, A.M. (2015): *Conservación de esculturas de hormigón: efecto de consolidantes en pastas y morteros de cemento*. Tesis Doctoral. Facultad de Bellas Artes. Universidad Complutense de Madrid, España, 21-95.

BEELDENS, A., et al. (2005): "From microstructure to macrostructure: an integrated model of structure formation in polymer-modified concrete". *Materials and Structures*, Vol. 38 (6), 601-607.

BERTO, L., SIMIONI, P. y SAETTA, A. (2008): "Numerical modelling of bond behaviour in RC structures affected by reinforcement corrosion". *Engineering Structures*, Vol. 30 (5), 1375–1385.

BILURBINA, L., LIESA, F. e IRIBARREN, J.I. (2003): "Corrosión y protección". Ediciones UPC, ISBN: 9788483017111, pp. 238-245.

BLEVOT, J. (1977): *Patología de las construcciones de hormigón armado: enseñanzas extraídas de la práctica*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados. ISBN : 84-7146-091-2, pp. 76-82.

BROTO, C. (2005): *Enciclopedia Broto de patologías de la construcción*. Barcelona: Editores Barcelona Structure. ISBN : 84-96424-37-5, pp. 113-205.

BURÓN, M. (2004): "El hormigón duradero: recubrimientos para una vida útil superior a 50 años. Durabilidad en la instrucción de hormigón estructural (EHE)". *Cemento Hormigón*, Vol. 75 (860), 62-69.

CABRERA, J. y AL-HASAN, A. (1997): "Performance properties of concrete repair materials" (1997). *Construction and Building Materials*, Vol. 11 (5-6), 283-290.

CALAVERA, J., et al. (1977). *Influencia de las compresiones previas en el hormigón sobre su microfisuración y resistencia a compresión*. A.S.I.C., INTEMAC, ISBN: 84-500-2280-0.

CALAVERA, J. (2005): *Patología de estructuras de hormigón armado y pretensado*. Madrid: Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC), ISBN: 8488764219, 2ª edición.

CALDERÓN, E. (2008): *Estudio experimental de la fisuración en piezas de hormigón armado sometidas a flexión pura*. Tesis Doctoral. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, España, 390 p.

CALMON, J., et al. (2014): "Effects of windshield waste glass on the properties of structural repair mortars". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 53, 88-96.

CARRASCO, D. (2017): *Las capacidades primitivas del hormigón armado*. Tesis Doctoral. E.T.S. de Arquitectura de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid, España, 47-188.

CEB (1995): *Código Modelo CEB-FIP 1990 para hormigón estructural*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

CEB (1998): *Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures*. Stuttgart: Comité Euro-International du Béton, Boletín nº 243, Cap. VI, pp. 93-109.

CHANG, P., PENG, Y. y HWANG, C. (2001): "A design consideration for durability of high-performance concrete". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23 (4-5), 375-380.

CHELLAPANDIAN, M. y PRAKASH, S. (2018): "Rapid repair of severely damaged reinforced concrete columns under combined axial compression and flexure: An experimental study". *Construction and Building Materials*, Vol. 173, 368-380.

COBO ESCAMILLA, A. (2001 a): *Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado: causas y procedimientos de rehabilitación*. Madrid: Fundación Escuela de la Edificación, 382 p., ISBN: 8486957885, pp. 109-161.

COBO ESCAMILLA, A. (2001 b): *Comprobación de la eficacia de la realcalinización y de la extracción electroquímica de cloruros como métodos de rehabilitación de las estructuras corroídas de hormigón armado*. Tesis Doctoral. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, España, 284 p.

COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. (2008): *EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural*. Madrid: Ministerio de Fomento.

COMETT. (1995): *Concrete repair technology, Proceedings of the short course at Taywood Engineering*. Southall, UK: Project 7352/Cb.

COURARD, L., et al. (2011): "Saturation level of the superficial zone of concrete and adhesion of repair systems". *Construction and Building Materials*, Vol. 25 (5), 2488-2494.

DAWOOD, E. y RAMLI, M. (2011): "High strength characteristics of cement mortar reinforced with hybrid fibres". *Construction and Building Materials*, Vol. 25 (5), 2240-2247.

DRIZORO (2011): *Mortero fluido sin retracción, de alta resistencia mecánica y adherencia, modificado con polímeros e inhibidores de corrosión*. Madrid: Construction Products Maxrite Injection. Boletín técnico nº: 176.01, certificación nº: ES021542/ES021543. 4 p.

EMBERSON, N. y MAYS, G. (1990): "Significance of property mismatch in the patch repair of structural concrete, part I: properties of repair systems". *Magazine of Concrete Research*, Vol. 42 (152), 147-160.

EMMONS, E., VAYSBURD, A. y MCDONALD, J. (1993): "A rational approach to durable concrete repairs". *Concrete International*, Vol. 15 (9), 40-45.

EMMONS, P.H. y SORDYL, D.J. (2006): "The state of the concrete repair industry, and a vision for its future". *Concrete Repair, Bulletin*; 7-14.

EUROCODE 2 – EN 1992. (2004): *Design of concrete structures. Part 1.1: General rules and rules for buildings*. 4. Brussels: European Committee for Standardization.

FENG, Q. (2018): "A feasibility study on real-time evaluation of concrete surface crack repairing using embedded piezoceramic transducers". *Measurement*, Vol. 122, 591-596.

FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M. (1994): *Patología y terapéutica del hormigón armado*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Cap XI, 279-327, ISBN: 8474932025, 3ª edición.

FERNÁNDEZ, J., LÓPEZ, P. y DELIBES, A. (1998): "Una investigación sobre la eficacia de los distintos sistemas de reparación de estructuras dañadas por corrosión". Madrid: Intemac, 30.

- FORABOSCHI, P. (2015): "Analytical model to predict the lifetime of concrete members externally reinforced with FRP". *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. Vol. 75, 137-145.
- FOWLER, D. (1999): "Polymers in concrete: a vision for 21st century". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21 (5-6), 449-452.
- FUENTES, A. (1995): *Reinforced concrete after cracking*. New Delhi: Oxford and IBH Publishing Co. Pvt. Ltd, cap. II, pp. 77-119.
- FUKUYAMA, K., HIGASHIBATA, Y. y MIYAUCHI, Y. (2000): "Studies on repair and strengthening methods of damaged reinforced concrete columns". *Cement and Concrete Composites*. Vol. 22, 81-88.
- GADEA, J., et al. (2010): "Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32, 672-677.
- GARBACZ, A., et al. (2017): "On the evaluation of interface quality in concrete repair system by means of impact-echo signal analysis". *Construction and Building Materials*, Vol. 134 (1), 311-323.
- GARCÍA-ALONSO, M.C., et al. (2007 b): "Corrosion behaviour of innovative stainless steels in mortar". *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, 1562-1569.
- GARCÍA, A. (1998): *Estructuras de hormigón armado: Materiales, ejecución, control y patología*. Madrid: Fundación Escuela de la Edificación. ISBN: 84-86957-72-9, 476 p.
- GEDGE, G. (2000): Structural properties of stainless steel rebar. Symposium "Structural applications of stainless steel in building and architecture". EUROINOX. Bruselas. (www.euro-inox.org).
- GILBERT, R.I. (2017): "Cracking caused by early-age deformation of concrete-prediction and control". *Procedia Engineering*, Vol. 172, 13-22.
- GONZÁLEZ, A. (2014): *Comportamiento frente a la durabilidad de morteros de reparación de cemento modificados con polímeros*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, España, 20-151.
- GONZÁLEZ, J.A. (1989): "Control de la corrosión. Estudio y medida por técnicas electroquímicas". Madrid: CSIC, cap. XII, pp. 323-365.
- GONZÁLEZ, J.A. y MIRANDA, J. (2007): "Corrosión en las estructuras de hormigón armado: Fundamento, medida, diagnosis y prevención". Madrid: CSIC.

GOWRIPALAN, N., SIRIVIVATNANON, V. y LIM, C. (2000): "Chloride diffusivity of concrete cracked in flexure". *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 725-730.

GRINDA, E. (1995): "El hormigón armado". *Tectónica*, nº 3, Madrid, 4-13.

GRUPO ESPAÑOL DEL HORMIGÓN, (GEHO) (1989): "Morteros de reparación". Madrid: Boletín nº 4.

GRUPO ESPAÑOL DEL HORMIGÓN, (GEHO) (1992): "Encuesta sobre patología de estructuras de hormigón". Madrid: Boletín nº 10.

GRUPO ESPAÑOL DEL HORMIGÓN, (GEHO) (1993): "Durabilidad de estructuras de hormigón". *Guía de diseño CEB*, Boletín nº 12, Cap. VI, 45-57.

HASSAN, K., BROOKS, J. y AL-ALAWI, L. (2001). "Compatibility of repair mortars with concrete in a hot-dry environment". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23, 93-101.

HEIDARI, M. y BASHANDEH, K. (2018): "Micromechanics based damage model for predicting compression behavior of polymer concretes". *Mechanics of Materials*, Vol. 117, 126-136.

HEMANTH, J. (2006): "Compressive strength and microstructural properties of lightweight high-strength cement mortar reinforced with eloxal". *Materials and Design*, Vol 27, 657-664.

HONGYAN, M. y ZONGJIN, L. (2013): "Microstructures and mechanical properties of polymer modified mortars under distinct mechanisms". *Construction and Building Materials*, Vol. 47, 579-587.

HUSEIEN, G., et al. (2017): "Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 80, 54-74.

ISSA, C. y DEBS, P. (2007): "Experimental study of epoxy repairing of cracks in concrete". *Construction and Building Materials*, Vol. 21 (1), 157-163.

JAFARI, K. (2018): "Optimizing the mixture design of polymer concrete: An experimental investigation". *Construction and Building Materials*, Vol. 167, 185-196.

JENNI A, et al. (2006): "Changes in microstructures and physical properties of polymer-modified mortars during wet storage". *Cement and Concrete Research*, Vol. 36(1), 79-90.

JO, Y.K. (2008): "Basic properties of epoxy cement mortars without hardener after outdoor exposure". *Construction and Building Materials*, Vol. 22, 911-920.

JOHNSON SYDNEY, M. (1973): *Deterioro, conservación y reparación de estructuras*. Editor: Blume, ISBN: 8472140458, 334 p.

KAMAL, A., et al. (2008): "Evaluation of crack opening performance of a repair material with strain hardening behavior". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30 (10), 863-871.

KANG, W.H., et al. (2018): "Design resistance evaluation for steel and steel-concrete composite members". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 147, 523-548.

KIANI, B., LIANG, R. y GROSS, J. (2018): "Material selection for repair of structural concrete using VIKOR method". *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 8, 489-497.

KONG, X., et al. (2013): "The influence of silanes on hydration and strength development of cementitious systems". *Cement and Concrete Research*, Vol. 67, 168-178.

KONG, X., et al. (2013): "Polymer-modified mortar with a gradient polymer distribution: Preparation, permeability, and mechanical behaviour". *Construction and Building Materials*, Vol. 38, 195-203.

KRAJCI, L. y JANOTKA, I. (2000): "Measurement techniques for rapid assessment of carbonation in concrete", *American Concrete Institute Materials Journal*, Vol. 97 (2), 168-171.

LANZONI, L., et al. (2016): "Concrete beams stiffened by polymer-based mortar layers: Experimental investigation and modeling". *Construction and Building Materials*, Vol. 105 (15), 321-335.

LEE, M., WANG, Y. y CHIU, C. (2007): "A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material". *Construction and Building Materials*, Vol. 21, 182-189.

LEFEBURE, V. (1924): *Improvements in or relating to concrete, cements, plasters and the like*. British Patent. 217(279):5.

LI, C., et al. (2007): "Concrete delamination caused by steel reinforcement corrosion". *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, 591-600.

Li, H. (2018): "Influence of superfine ettringite on the properties of sulphoaluminate cement-based grouting materials". *Construction and Building Materials*, Vol. 166, 723-731.

LI, J.H., et al. (2013): "Investigations on phase constitution, mechanical properties and hydration kinetics of aluminous cements containing magnesium aluminate spinel". *Ceramics International*, Vol. 39 (7), 8393-8400.

LI, L. et al (2018): "A method of detecting the cracks of concrete undergo high-temperature". *Construction and Building Materials*, Vol. 162, 345-358.

LIANG, M. y WANG, K. (1999): "Service life prediction of reinforced concrete structures". *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 1411-1418.

LIU, J., TAN, K. y YAO, Y. (2018): "A new perspective on nature of fire-induced spalling in concrete". *Construction and Building Materials*, Vol. 184, 581-590.

MALLAT, A. y ALLICHE, A. (2011): "Mechanical investigation of two fiber-reinforced repair mortars and the repaired system". *Construction and Building Materials*, Vol. 25 (4), 1587-1595.

MANGAT, P. y LIMBACHIYA, M. (1997): "Repair material properties for effective structural application". *Cement and Concrete Research*, Vol. 27 (4), 601-617.

MARTINEZ, R. (1998): "Inhibidores de corrosión para hormigón armado". *Hormigón Preparado*, Vol. 12 (38), 48-50.

MAYA, E. (1998): Hormigón armado. Estrategias de durabilidad frente al proceso patológico. *Revista de Edificación*, 28, p. 25-31.

MAYS, G. y WILKINSON, W. (1987): "Polymer repairs to concrete: their influence on structural performance". American Concrete Institute Special Publication, Vol. 100, 351-375.

MECHTCHERINE, V. (2013): "Novel cement-based composites for the strengthening and repair of concrete structures". *Construction and Building Materials*, Vol 41, 365-373.

MEDEIROS M., et al. (2009): "Influence of EVA and acrylate polymers on some mechanical properties of cementitious repair mortars". *Construction and Building Materials*, Vol. 23, 2527-2533.

MEDINA, E. (2012): *Evaluación del comportamiento mecánico, estructural y frente a la corrosión, de una nueva armadura de acero inoxidable dúplex bajo en níquel*. Tesis Doctoral. E.T.S. de Edificación de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid, España, 194 p.

MENHOSH, A. et al (2018): "Long term durability properties of concrete modified with metakaolin and polymer admixture". *Construction and Building Materials*, Vol. 172, 41-51.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS. (1939): *Instrucción para el proyecto y ejecución de obras de hormigón*. Burgos, España.

MIRZA, J. y DURAND, B. (1992): "Field evaluation of surface repair mortars for concrete hydraulic structures damaged by erosion". *Canadian Electrical Association Interim Report 902 G 738*.

MIRZA, J., MIRZA, M. y LAPOINTE, R. (2002): "Laboratory and field performance of polymer-modified cement based repair mortars in cold climates". *Construction and Building Materials*, Vol. 16 (6), 365-374.

MO, L., et al. (2014): "MgO expansive cement and concrete in China: Past, present and future". *Cement and Concrete Research*, Vol. 57, 1-12.

MO, L., et al. (2015): "Deformation and mechanical properties of the expansive cements produced by inter-grinding cement clinker and MgOs with various reactivities". *Construction and Building Materials*, Vol. 80, 1-8.

MORENO, E. (2008): *Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón: Estudio experimental de la variación de la ductilidad en armaduras corroídas aplicando el criterio de acero equivalente*. Tesis Doctoral. Universidad Carlos III de Madrid, España, 13-123.

MORGAN, D. (1996): "Compatibility of concrete repair materials and systems". *Construction and Building materials*, Vol. 10 (1), 57-67.

MÜLLER, H., HAIST, M y VOGEL, M. (2014): "A Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime". *Construction and Building Materials*. Vol. 67, 321-337.

MUÑOZ, A. (2009): *Comportamiento de vigas hiperestáticas de hormigón armado corroídas y reparadas con mortero. Pérdida de propiedades mecánicas del acero de refuerzo y fisuración del recubrimiento de hormigón por corrosión*. Tesis Doctoral. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, España, 1-51.

NOUNU, G. y CHAUDHARY, Z. (1999): "Reinforced concrete repairs in beams". *Construction and Building Materials*, Vol. 13, 195-212.

OHAMA, Y. (1996): "Polymer-based materials for repair and improved durability: Japanese experience". *Construction and Building Materials*, Vol. 10 (1), 77-82.

OTERO, E. (1997): *Corrosión y degradación de materiales*. Madrid: Editorial Síntesis, S.A., cap I, 17-30.

PARK, D., Et al. (2012): "Water absorption and constraint stress analysis of polymer-modified cement mortar used as a patch repair material". *Construction and Building Materials*, Vol. 28 (1), 819-830.

PASCAL, S., ALLICHE, A. y PILVIN, PH. (2004): "Mechanical behaviour of polymer modified mortars". *Materials Science and Engineering*, Vol. 380 (1-2), 1-8.

PÉREZ, O., COBO, A. y MORENO, E. (2013): *Estudio del comportamiento de secciones mixtas de hormigón-mortero de reparación bajo solicitaciones de compresión*. Workshop investigación e innovación en evaluación, reparación y refuerzo de estructuras de hormigón. E.T.S. de Edificación de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid, España. ISSN: 978-84-695-7351-8, 100-109.

PÉREZ, O., COBO, A. y MORENO, E. (2013): *Estudio del comportamiento de secciones mixtas de hormigón-mortero de reparación bajo solicitaciones de flexión*. Workshop investigación e innovación en evaluación, reparación y refuerzo de estructuras de hormigón. E.T.S. de Edificación de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid, España. ISSN: 978-84-695-7351-8, 89-99.

PHOO-NGERNKHAM, T., et al. (2015): "High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material". *Construction and Building Materials*, Vol. 48, 482-488.

PLUM, D. (1991): "Materials - what to specify". *Construction Maintenance and Repair*, Vol. 6 (2), 3-7.

PRIETO, M.I. (2012): *Análisis del comportamiento a corrosión de armaduras embebidas en probetas de mortero, con sustitución parcial de áridos y cemento por escorias blancas de horno cuchara*. Tesis Doctoral. E.T.S. de Edificación de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid, España, 3-47.

QIAN, J., et al. (2014): "A method for assessing bond performance of cement-based repair materials". *Construction and Building Materials*, Vol. 68 (15), 307-313.

- QUANBIN, Y., et al (2000): "Properties and applications of magnesia-phosphate cement mortar for rapid repair of concrete". *Cement and Concrete Research*, Vol. 30 (11), 1807-1813.
- QUIAO, F. y CHAU, C. (2010): "Property evaluation of magnesium phosphate cement mortar as patch repair material". *Construction and Building Materials*, Vol. 24, 695-700.
- RASHID, H., et al. (2015): "Experimental and analytical investigations on the behavior of interface between concrete and polymer cement mortar under hygrothermal conditions". *Construction and Building Materials*, Vol. 94, 414-425.
- RC-08 (2009): *Instrucción para la recepción de cementos*. Secretaría Técnica, España.
- ROBERY, P. y SHAW, J. (1997): "Materials for the repair and protection of concrete". *Construction and Building Materials*, Vol. 11 (56), 275-281.
- RODRÍGUEZ GARCÍA, F. (1998): *Actualización de la estrategia preventiva en la reglamentación española sobre el hormigón*. Valencia: Curso Estrategias preventivas en el hormigón. IECA Levante.
- ROSSIGNOLO, J. y AGNESINI, M. (2004): "Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete". *Cement and Concrete Research*, Vol. 26 (4), 375-380.
- SAKAI, E. y SUGITA, J. (1995): "Composite mechanism of polymer modified cement". *Cement and Concrete Research*, Vol. 25 (1), 127-35.
- SALIGER, R. (1944): *El hormigón armado*. Buenos Aires: Editorial Tecnológica, cap. I, pp. 1-7.
- SCHIESSL, P. (1984): *Protection of reinforcement*. Durability of concrete structures. Comité Euro-International du Béton, CEB, Boletín nº 152, pp. 241-297.
- SCHIESSL, P. y RAUPACH, M. (1997): "Laboratory studies and calculations on the influence of crack width on chloride induced corrosion of Steel in concrete". *ACI Materials Journal*, Vol. 94 (1), 56-62.
- SCHMITT, G. (2009): *Global Needs for Knowledge Dissemination, Research, and Development in Materials Deterioration and Corrosion Control*. New York: World Corrosion Organization.
- SCHULZE, J. (1999): "Influence of water-cement ratio and cement content on the properties of polymer-modified mortars". *Cement and Concrete Research*, Vol. 29 (6), 909-915.

SHAKER F., EL DIEB, A. y REDA, M. (1997): "Durability of styrene-butadiene latex modified concrete". *Cement and Concrete Research*, Vol. 27 (5), 711-720.

SHARDAKOV, I., et al. (2017): "Crack control in concrete using shock wave techniques". *Procedia Structural Integrity*, Vol. 5, 210-216.

SHASH, A. (2005): "Repair of concrete beams-a case study". *Construction and Building Materials*, Vol.19, 75-79.

SIAD, A., BENCHEIKH, M. y HUSSEIN, L. (2017): "Effect of combined pre-cracking and corrosion on the method of repair of concrete beams". *Construction and Building Materials*, Vol. 132, 462-469.

SIRVENT CASANOVA, I. (1997): *Tecnología y terapéutica del hormigón armado*. Alicante: Instituto Técnico de la Construcción, Tomo I, cap. VIII, pp. 749-823.

ŠOMODÍKOVÁ, M., et al. (2016): "Modeling of degradation processes in concrete: Probabilistic lifetime and load-bearing capacity assessment of existing reinforced concrete bridges". *Engineering Structures*. Vol. 119, 49-60.

SOUSA, S. (2017): "Mechanical behaviour analysis of polyester polymer mortars reinforced with tire rubber fibres". *Ciência and Tecnologia dos Materiais*, Vol. 29 (1), 162-166.

TALERO, R. (1991): *Patologías y terapias preventivas del hormigón*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. ISBN: 84-7292-353-3. 73 p.

TAYEH, B. et al. (2013): "Evaluation of bond strength between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete as a repair material". *Procedia Engineering*, Vol. 54, 554-563.

TUUTTI, K. (1982): "Service Life of Structures with Regard to Corrosion Embedded Steel". *Performance of Concrete in Marine Environment*, American Construction SP-65, 223-236.

URTUBEY, E. y LOREFICE, R. (2004): "Estudio de la propagación de una onda ultrasónica a través del hormigón considerado como material heterogéneo". Argentina: *Grupo de mecánica Computacional de la Universidad Nacional de Santiago del Estero*, Vol. 23, 941-954.

VALCUENDE PAYÁ, M.O. (1994): *Reparación de elementos lineales de hormigón armado. Comportamiento en servicio*. Tesis Doctoral. E.T.S. de Arquitectura de Valencia. Universidad Politécnica de Valencia, España, 33-54.

VARHEN, C. et al (2016): "Effect of the substitution of cement by limestone filler on the rheological behaviour and shrinkage of microconcretes". *Construction and Building Materials*, Vol. 125, 375-386.

VÁZQUEZ, J. (2010): *Adherencia al hormigón de morteros de diferentes bases químicas*. Tesis Doctoral. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, España, 79-114.

WANG, R., WANG, P. y LI, X.G. (2005): "Physical and mechanical properties of styrene-butadiene rubber emulsion modified cement mortars". *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 900-906.

WANG, R. y WANG, P. (2010): "Function of styrene-acrylic ester copolymer latex in cement mortar". *Materials and Structures*, Vol. 43 (4), 443-51.

WANG, X. y LIU, X. (2006): "Bond strength modelling for corroded reinforcements", *Construction and Building Materials*, Vol. 20, 177-186.

WU, R. y PANTELIDES, C. (2017): "Rapid repair and replacement of earthquake-damaged concrete columns using plastic hinge relocation". *Composite Structures*. Vol. 180, 467-483.

YANG, Z., et al. (2008): "Effect of styrene-butadiene rubber latex on the chloride permeability and microstructure of Portland cement mortar". *Construction and Building Materials*, Vol. 23 (6), 2283-2290.

ZHONG, S. y CHEN, Z. (2002): "Properties of latex blends and its modified cement mortars". *Cement and Concrete Research*, Vol. 32 (10), 1515-1524.

ZHONG, S., SHI, M. y CHEN, Z. (2002): "The AC response of polymer-coated mortar specimens". *Cement and Concrete Research*, Vol. 32 (6), 983-987.

ZHOU, J., YE, G. y VAN BREGUEL, K. (2016): "Cement hydration and microstructure in concrete repairs with cementitious repair materials". *Construction and Building Materials*, Vol. 112, 765-772.

ANEXO A

Tablas de resultados

Tabla 9.1 Resultados de los ensayos a compresión de las probetas de un material: hormigón, mortero de reparación de cemento Portland y mortero de reparación de cemento modificado con polímeros

Probetas	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\max}/$ $\sigma_{\max C}$	$\varepsilon_{\max}/$ $\varepsilon_{\max C}$	E/ E _C	U _{max} / U _{max C}	U _{ult} / U _{ult C}
C-1	38,05	0,98	1,02	0,96	0,93	0,87
C-2	38,42	0,99	1,05	0,94	1,09	1,09
C-3	39,73	1,02	0,93	1,10	0,98	1,03
MP-1	45,04	1,16	1,20	0,97	1,42	1,31
MP-2	44,89	1,16	1,42	0,81	1,33	1,41
MP-3	46,25	1,19	1,38	0,86	1,27	1,31
MC-1	33,80	0,87	1,44	0,60	0,84	0,81
MC-2	35,47	0,91	1,01	0,90	0,95	0,96
MC-3	33,97	0,88	1,43	0,61	0,82	0,84

Descripción de las abreviaturas: **C-1, C-2 y C-3**: Probetas de hormigón **MP-1, MP-2 y MP-3**: Probetas de mortero de cemento modificado con polímeros **MC-1, MC-2 y MC-3**: Probetas de mortero de cemento Portland.

Tabla 9.2 Resultados de los ensayos a compresión de las probetas de dos materiales: hormigón-mortero de cemento modificado con polímeros, colocados en serie

Probetas	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\max}/$ $\sigma_{\max C}$	$\varepsilon_{\max}/$ $\varepsilon_{\max C}$	E/ E _C	U _{max} / U _{max C}	U _{ult} / U _{ult C}
C.MP-2/3-s1	29,32	0,76	2,57	0,29	1,01	0,96
C.MP-1/2-s2	31,75	0,82	2,78	0,29	1,84	1,63
C.MP-1/3-s3	34,03	0,88	2,23	0,38	1,41	1,24

Descripción de las abreviaturas: **C.MP-2/3-s1, C.MP-1/2-s2, C.MP-1/3-s3**: Probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación de cemento modificado con polímeros, colocadas en serie.

Tabla 9.3 Resultados de los ensayos a compresión de las probetas de dos materiales: hormigón-mortero de cemento modificado con polímeros, colocados en serie

Probetas	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\max}/$ $\sigma_{\max C}$	$\varepsilon_{\max}/$ $\varepsilon_{\max C}$	E/ E _C	U _{max} / U _{max C}	U _{ult} / U _{ult C}
C.MC-2/3-s1	25,04	0,65	2,17	0,30	1,11	1,12
C.MC-1/2-s2	24,64	0,64	2,25	0,28	1,30	1,28
C.MC-1/3-s3	28,73	0,74	1,83	0,40	1,02	1,29

Descripción de las abreviaturas: **C.MC-2/3-s1, C.MC-1/2-s2, C.MC-1/3-s3**: Probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación de cemento Portland, colocadas en serie.

Tabla 9.4 Resultados de los ensayos a compresión de las probetas de dos materiales: hormigón-mortero de cemento modificado con polímeros, colocados en paralelo

Probetas	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\max}/$ $\sigma_{\max C}$	$\varepsilon_{\max}/$ $\varepsilon_{\max C}$	E/ E _C	U _{max} / U _{max C}	U _{ult} / U _{ult C}
C.MP-2/3-p1	35,30	0,91	1,84	0,49	1,31	1,16
C.MP-2/3-p2	37,80	0,97	1,80	0,54	1,34	1,29
C.MP-1/2-p1	31,87	0,82	1,80	0,45	1,19	1,09
C.MP-1/2-p2	29,23	0,75	1,80	0,42	1,23	1,18
C.MP-1/3-p1	35,98	0,93	1,42	0,65	1,45	1,37
C.MP-1/3-p2	28,90	0,75	1,56	0,47	1,30	1,10

Descripción de las abreviaturas: **C.MP-2/3-p1**, **C.MP-1/2-p1**, **C.MP-1/3-p1**: Probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación de cemento modificado con polímeros, colocadas en paralelo

Tabla 9.5 Resultados de los ensayos a compresión de las probetas de dos materiales: hormigón-mortero de cemento portland, colocados en paralelo

Probetas	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\max}/$ $\sigma_{\max C}$	$\varepsilon_{\max}/$ $\varepsilon_{\max C}$	E/ E _C	U _{max} / U _{max C}	U _{ult} / U _{ult C}
C.MC-2/3-p1	22,83	0,59	1,75	0,33	0,56	1,40
C.MC-2/3-p2	33,63	0,87	1,27	0,68	0,86	0,87
C.MC-1/2-p1	25,84	0,67	2,40	0,28	2,23	2,11
C.MC-1/2-p2	34,01	0,88	1,32	0,66	0,98	1,04
C.MC-1/3-p1	30,54	0,79	1,76	0,45	1,25	1,28
C.MC-1/3-p2	22,80	0,59	1,80	0,33	0,74	0,71

Descripción de las abreviaturas: **C.MC-2/3-p1**, **C.MC-1/2-p1**, **C.MC-1/3-p1**: Probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación de cemento portland, colocadas en paralelo.

ANEXO B

Índices de calidad de la tesis

B.1 Workshops

WORKSHOP INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN EVALUACIÓN, REPARACIÓN Y REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

[Celebrado en la ETSEM de la UPM. 12-14/Febrero/2013]

Título: Estudio del comportamiento de secciones mixtas de hormigón-mortero de reparación bajo solicitaciones de compresión

Autores: Pérez Casal, O.; Cobo Escamilla, A; Moreno Fernández, E.

Tipo de participación: 960.

Revisores: Sí.

ISBN o ISSN: 978-84-695-7351-8.

P. 100-109.

Grupo de Investigación: Patología de estructuras, protecciones colectivas y medios auxiliares de edificación.

Departamento: Tecnología de la Edificación.

WORKSHOP INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN EVALUACIÓN, REPARACIÓN Y REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

[Celebrado en la ETSEM de la UPM. 12-14/Febrero/2013]

Título: Estudio del comportamiento de secciones mixtas de hormigón-mortero de reparación bajo solicitaciones de flexión

Autores: Pérez Casal, O.; Cobo Escamilla, A; Moreno Fernández, E.

Tipo de participación: 960.

Revisores: Sí.

ISBN o ISSN: 978-84-695-7351-8.

P. 89-99.

Grupo de Investigación: Patología de estructuras, protecciones colectivas y medios auxiliares de edificación.

Departamento: Tecnología de la Edificación.

B.2 Congresos

CITE 2018

[Celebrado en la ETSEM de la UPM. 7-9/Marzo/2018]

Título: Influencia del tipo de mortero de reparación en el comportamiento mecánico de secciones mixtas

Autores: Pérez Casal, O.; Cobo Escamilla, A; Moreno Fernández, E.; Prieto Barrio, I.

ISBN o ISSN: 978-84-1639-771-6

294 p.

Departamento: Tecnología de la Edificación.

B.3 Artículo

REVISTA ANALES DE EDIFICACIÓN

[Aceptado el 18/05/18 a la espera de publicación en revista indexada en AVERY]

Título: Mechanical behavior of concrete-mortar sections

Autores: Pérez Casal, O.; Cobo Escamilla, A; Moreno Fernández, E.; Prieto Barrio, I.

Revisores: Sí.

ISSN: 2444-1309.

8p.

ANEXO C

Índice de figuras y tablas

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Origen de la patología del hormigón.....	13
Figura 2.2: Deterioro de estructuras de hormigón armado	15
Figura 2.3: Proceso Proceso de carbonatación del hormigón.....	18
Figura 2.4: Penetración de cloruros por difusión en el hormigón	19
Figura 2.5: Fases de reparación de una viga dañada por corrosión.....	24
Figura 2.6: Representación esquemática del proceso de corrosión del acero en hormigón (Modelo de Tuutti).....	27
Figura 2.7: Factores que afectan a la durabilidad de reparaciones de hormigón	36
Figura 2.8: Clasificación de los tipos de morteros de reparación	37
Figura 2.9: Comparación de las curvas de curado para pastas de cemento portland, pastas de cementos expansivos y pastas de cemento con la expansión controlada ...	43
Figura 2.10: Componentes de un mortero epoxi	46
Figura 2.11: Ancho de fisura	52
Figura 3.1: Esquema analítico del trabajo experimental a compresión	59
Figura 3.2: Esquema analítico del trabajo experimental a flexión	59
Figura 3.3: Esquema de las probetas cúbicas hormigón-mortero	65
Figura 3.4: Esquema de reparación de las vigas	65
Figura 3.5: Componentes del hormigón.-Grava, arena, cemento y agua-.....	67
Figura 3.6: Amasadora planetaria utilizada en la fabricación del hormigón	68
Figura 3.7 y 3.8: Relleno de los moldes y picado con barra del hormigón	69
Figuras 3.9 y 3.10: Desmoldado de probetas de hormigón y curado en cámara húmeda.....	69
Figura 3.11: Componentes del mortero.-Cemento, arena y agua-	69

Figuras 3.12 y 3.13: Relleno total de los moldes con mortero de reparación	70
Figura 3.14: Probetas mixtas cúbicas en diferentes proporciones	70
Figura 3.15: Barras corrugadas de acero B 500-SD e inoxidable dúplex AISI 2304, de diámetros 16 y 8 mm.....	73
Figura 3.16: Armados y encofrados de las vigas ensayadas a flexión	73
Figura 3.17: Esquema del armado de los dos modelos de vigas	74
Figura 3.18: Ensayo previo a flexión de una viga de hormigón.....	74
Figura 3.19: Estado de las vigas antes de la reparación	75
Figura 3.20: Limpieza y saneado de las vigas	75
Figura 3.21: Proceso de reparación de vigas: 1. encofrado de madera. 2. picado con barra	76
Figura 3.22: Proceso de reparación de vigas: 3. enrasado del mortero. 4. vanos centrales reparados. 5. humectación de las vigas	76
Figura 3.23: Esquema de cargas del ensayo a compresión	77
Figura 3.24: Máquina de ensayo a compresión.....	78
Figura 3.25: Formas de disposición de las probetas en el ensayo a compresión.....	78
Figura 3.26: Esquema de cargas del ensayo a flexión.....	79
Figuras 3.27 y 3.28: Disposición y detalle de las vigas en el ensayo de rotura a flexión ..	80
Figura 4.1: Representación esquemática del diagrama Tensión–Deformación del hormigón ensayado a compresión.....	83
Figura 4.2: Imágenes representativas de roturas en los ensayos a compresión.....	84
Figura 4.3: Esquema de las probetas de un material: Hormigón (C), mortero de cemento portland (MC) y mortero modificado con polímeros (MP)	90
Figura 4.4: Diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas realizadas con un solo material	90
Figura 4.5: Esquema de las probetas de dos materiales con proporción 2/3 colocadas en serie.....	93

Figura 4.6: Diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas realizadas con dos materiales con proporción 2/3 colocados en serie	93
Figura 4.7: Esquema de las probetas de dos materiales con proporción 1/2 colocadas en serie.....	94
Figura 4.8: Diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas realizadas con dos materiales con proporción 1/2 colocados en serie	94
Figura 4.9: Esquema de las probetas de dos materiales con proporción 1/3 colocadas en serie.....	95
Figura 4.10: Diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas realizadas con dos materiales con proporción 1/3 colocados en serie	95
Figura 4.11: Esquema de las probetas de dos materiales con distintas proporciones colocadas en serie.....	97
Figura 4.12: Evolución de la tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en el ensayo a compresión de probetas mixtas, con los materiales situados en serie	97
Figura 4.13: Esquema de las probetas de dos materiales con proporción 2/3 colocadas en paralelo.....	99
Figura 4.14: Diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas realizadas con dos materiales con proporción 2/3 colocados en paralelo	99
Figura 4.15: Esquema de las probetas de dos materiales con proporción 1/2 colocadas en paralelo.....	100
Figura 4.16: Diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas realizadas con dos materiales con proporción 1/2 colocados en paralelo	100
Figura 4.17: Esquema de las probetas de dos materiales con proporción 1/3 colocadas en paralelo.....	101

Figura 4.18: Diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas realizadas con dos materiales con proporción 1/3 colocados en paralelo	101
Figura 4.19: Esquema de las probetas de dos materiales con distintas proporciones colocadas en paralelo	103
Figura 4.20: Evolución de la tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en el ensayo a compresión de probetas mixtas, con los materiales situados en paralelo	103
Figura 4.21: Armado, esquema de cargas y diagramas de esfuerzos flectores de las vigas ensayadas a flexión hasta la rotura.....	104
Figura 4.22: Detalle de roturas en los ensayos de vigas sometidas a flexión	105
Figura 4.23: Esquema de la mitad de las vigas antes de reparar	108
Figura 4.24: Diagrama momento flector-flecha del ensayo a flexión, en vigas antes de reparar	108
Figura 4.25: Esquema de la mitad de las vigas reparadas con morteros de cemento Portland o morteros modificados con polímeros	110
Figura 4.26: Diagrama momento flector-flecha del ensayo a flexión, en vigas reparadas con morteros de cemento Portland o morteros modificados con polímeros	110
Figura 5.1: Comparativa de valores máximos ($\sigma_{\max}/\sigma_{\max C}$, $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\max C}$, E/E_C , $U_{\max}/U_{\max C}$, $U_u/U_{u C}$) de cada proporción mortero-hormigón (1/3, 1/2, 2/3) en las probetas mixtas ensayadas a compresión en serie, con morteros de polímeros y de cemento portland	113
Figura 5.2: Comparativa de valores máximos ($\sigma_{\max}/\sigma_{\max C}$, $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\max C}$, E/E_C , $U_{\max}/U_{\max C}$, $U_u/U_{u C}$) de cada proporción mortero-hormigón (1/3, 1/2, 2/3) en las probetas mixtas ensayadas a compresión en paralelo, con morteros de polímeros y de cemento portland.....	113
Figura 5.3: Comparativa de valores máximos ($\sigma_{\max}/\sigma_{\max C}$, $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\max C}$, E/E_C , $U_{\max}/U_{\max C}$, $U_u/U_{u C}$) de las probetas de un solo material ensayadas a compresión, con morteros de polímeros y de cemento portland.....	114
Figura 5.4: Diagrama tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas realizadas con uno y dos materiales	115

- Figura 5.5:** Evolución de la tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en el ensayo a compresión de probetas mixtas hormigón-mortero de reparación de cemento portland..... 117
- Figura 5.6:** Evolución de la tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en el ensayo a compresión de probetas mixtas hormigón-mortero de cemento modificado con polímeros..... 117
- Figura 5.7:** Relación entre la capacidad de carga de probetas mixtas sometidas a compresión respecto a sus homólogas de hormigón..... 118
- Figura 5.8:** Deformación máxima en relación al hormigón $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\max C}$ /Probetas cúbicas, comparando los resultados de cada tipo de mortero..... 119
- Figura 5.9:** Deformación máxima en relación al hormigón $\epsilon_{\max}/\epsilon_{\max C}$ /Probetas cúbicas, comparando el mejor comportamiento en serie y en paralelo de las probetas mixtas con las de un material..... 120
- Figura 5.10:** Análisis porcentual de pérdidas o ganancias de resistencia para cada tipo de mortero de reparación, de cemento portland y modificado con polímeros 121
- Figura 5.11:** Análisis porcentual de pérdidas de resistencia en función de la proporción de mortero-hormigón, para cada tipo de mortero de reparación, de cemento portland y modificado con polímeros con la colocación en paralelo 122
- Figura 5.12:** Análisis porcentual de pérdidas de resistencia en función de la proporción de hormigón-mortero, para cada tipo de mortero de reparación, de cemento portland y modificado con polímeros con la colocación en serie 123
- Figura 5.13:** Módulo de elasticidad longitudinal en relación al hormigón E/E_c / Probetas cúbicas, comparando los resultados de cada tipo de mortero..... 125
- Figura 5.14:** Módulo de elasticidad longitudinal en relación al hormigón E/E_c /Probetas cúbicas, comparando el mejor comportamiento en serie y en paralelo de las probetas mixtas con las de un material..... 125
- Figura 5.15:** Densidad de energía de deformación máxima en relación al hormigón $U_{\max}/U_{\max C}$ / Probetas cúbicas, comparando los resultados de cada tipo de mortero . 126
- Figura 5.16:** Densidad de energía de deformación última en relación al hormigón $U_u/U_{u C}$ / Probetas cúbicas, comparando los resultados de cada tipo de mortero 126

Figura 5.17: Densidad de energía de deformación máxima y última en relación al hormigón U_{max}/U_{maxC} y U_u/U_{uC} / Probetas cúbicas, comparando el mejor comportamiento en serie y en paralelo de las probetas mixtas con las de un material 127

Figura 5.18: Diagrama momento flector-flecha en vigas antes y después de reparar, con dos tipos de aceros y diámetros de Ø8 y Ø16 128

Figura 5.19: Diagrama momento flector-flecha en vigas antes y después de reparar y con diámetros de Ø8..... 130

Figura 5.20: Diagrama momento flector-flecha en vigas antes y después de reparar y con diámetros de Ø16..... 131

Figura 5.21: Relación entre la capacidad de carga de vigas reparadas sometidas a flexión respecto a sus homólogas de hormigón 132

Figura 5.22: Ductilidad vigas armadas con Ø8 de acero al carbono 133

Figura 5.23: Ductilidad vigas armadas con Ø8 de acero inoxidable 133

Figura 5.24: Ductilidad vigas armadas con Ø16 de acero al carbono 134

Figura 5.25: Ductilidad vigas armadas con Ø16 de acero inoxidable 134

Figura 5.26: Ductilidad vigas armadas con Ø8 por tipo de acero 135

Figura 5.27: Ductilidad vigas armadas con Ø16 por tipo de acero 135

Figura 5.28: Fisuración en el tramo central de la viga B-SD-8 antes de reparar 136

Figura 5.29: Fisuración en el tramo central de la viga B-AISI-8 antes de reparar 136

Figura 5.30: Fisuración en el tramo central de la viga B-SD-16 antes de reparar 137

Figura 5.31: Fisuración en el tramo central de la viga B-AISI-16 antes de reparar 137

Figura 5.32: Fisuración en el tramo central de la viga B-SD-8 después de reparar con mortero de cemento portland 138

Figura 5.33: Fisuración en el tramo central de la viga B-AISI-8 después de reparar con mortero de cemento modificado con polímeros 139

Figura 5.34: Fisuración en el tramo central de la viga B-SD-16 después de reparar con mortero de cemento portland 140

Figura 5.35: Fisuración en el tramo central de la viga B-AISI-16 después de reparar con mortero de cemento modificado con polímeros 141

Figura 5.36: Relación entre el ancho de fisura de vigas reparadas sometidas a flexión respecto a sus homólogas de hormigón 142

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Delimitación de las clases de acero no aleado y de acero aleado	13
Tabla 2.2: Agentes responsables del deterioro del hormigón.....	14
Tabla 2.3: Propiedades mecánicas de los materiales de reparación.....	24
Tabla 2.4: Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras	29
Tabla 2.5: Clases específicas de exposición relativas a otros procesos de deterioro distintos de la corrosión	30
Tabla 2.6: Clasificación de la agresividad química.....	31
Tabla 2.7: Relación a/c y mínimo contenido de cemento en función de la clase de exposición.....	32
Tabla 2.8: Recubrimientos mínimos según la clase de exposición.....	33
Tabla 2.9: Valor máximo de abertura de fisura ($w_{máx}$)	34
Tabla 2.10: Aplicación de morteros de reparación, según espesores y áreas	39
Tabla 2.11: Valores orientativos de los materiales de base inorgánica no tradicionales	44
Tabla 3.1: Características del cemento Portland CEM II A-L 42,5 y denominación utilizada	61
Tabla 3.2: Condiciones que debe cumplir el agua	62
Tabla 3.3: Aceros, diámetros y formas de laminación de las barras corrugadas de las vigas ensayadas a flexión	62
Tabla 3.4: Composición química [%] de los aceros, según [47]	63
Tabla 3.5: Datos técnicos del mortero modificado con polímeros [Drizoro]	63
Tabla 3.6: Dosificación y materiales de probetas y vigas.....	64
Tabla 3.7: Nomenclatura, características y tipos de ensayos en probetas y vigas	66
Tabla 3.8: Cantidades por m ³ de hormigón para cada componente empleado en la fabricación del hormigón H-25	68
Tabla 3.9: Dosificación de mortero modificado con polímeros Clase R4 (tipo CC)	71

Tabla 3.10: Dosificación de mortero de Cemento Portland CEM II A-L 42,5	71
Tabla 3.11: Aceros y diámetros de las barras corrugadas de las vigas.....	73
Tabla 3.12: Variables estudiadas en probetas sometidas a compresión.....	78
Tabla 4.1: Resumen esquemático de las probetas de uno y dos materiales colocadas en serie o paralelo.....	85
Tabla 4.2: Resumen esquemático de las probetas de dos materiales, por colocación en la máquina de ensayo y tipo de mortero	86
Tabla 4.3: Resumen de los diagramas tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas de uno y dos materiales colocadas en serie o paralelo	87
Tabla 4.4: Resumen de los diagramas totales tensión normal unitaria respecto a la deformación longitudinal unitaria en probetas de dos materiales, por colocación en la máquina de ensayo y tipo de mortero	88
Tabla 4.5: Resultados de los ensayos a compresión de un material	90
Tabla 4.6: Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales con proporción 2/3 en serie	93
Tabla 4.7: Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales con proporción 1/2 en serie	94
Tabla 4.8: Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales con proporción 1/3 en serie	95
Tabla 4.9: Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales con distintas proporciones colocados en serie	97
Tabla 4.10: Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales con proporción 2/3 en paralelo.....	99
Tabla 4.11: Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales con proporción 1/2 en paralelo.....	100
Tabla 4.12: Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales con proporción 1/3 en paralelo.....	101
Tabla 4.13: Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales con distintas proporciones colocados en paralelo	103

Tabla 4.14: Resumen esquemático de las vigas antes y después de la reparación	106
Tabla 4.15: Resumen de los diagramas momento flector-flecha del ensayo a flexión, en vigas antes y después de reparar	106
Tabla 4.16: Resultados de los ensayos a flexión, en vigas antes de reparar	108
Tabla 4.17: Resultados de los ensayos a flexión, en vigas reparadas con morteros de cemento Portland o morteros modificados con polímeros	110
Tabla 5.1: Resultados del ensayo a compresión de las probetas cúbicas de hormigón-mortero de reparación.....	116
Tabla 5.2: Pérdidas o ganancias de resistencia en relación al hormigón, en tanto por ciento en morteros de cemento portland (MC) y morteros modificados con polímeros (MP), ensayados a compresión	121
Tabla 5.3: Pérdidas de resistencia en relación al hormigón, en tanto por ciento en morteros de cemento portland (MC) y morteros modificados con polímeros (MP), ensayados a compresión en paralelo, en función de la proporción mortero-hormigón	122
Tabla 5.4: Pérdidas de resistencia en relación al hormigón, en tanto por ciento en morteros de cemento portland (MC) y morteros modificados con polímeros (MP), ensayados a compresión en serie, en función de la proporción mortero-hormigón	123
Tabla 5.5: Resultados de los ensayos de rotura a flexion en las vigas de hormigón	129
Tabla 9.1: Resultados de los ensayos a compresión de las probetas de un material: hormigón, mortero de reparación de cemento Portland y mortero de reparación de cemento modificado con polímeros	169
Tabla 9.2: Resultados de los ensayos a compresión de las probetas de dos materiales: hormigón- mortero de cemento modificado con polímeros, colocados en serie	169
Tabla 9.3: Resultados de los ensayos a compresión de las probetas de dos materiales: hormigón- mortero de cemento modificado con polímeros, colocados en serie	169
Tabla 9.4: Resultados de los ensayos a compresión de las probetas de dos materiales: hormigón- mortero de cemento modificado con polímeros, colocados en paralelo ..	170
Tabla 9.5: Resultados de los ensayos a compresión de las probetas de dos materiales: hormigón- mortero de cemento portland, colocados en paralelo	170

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN DE MADRID