



POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA UNIVERSITARIA DE ARQUITECTURA TÉCNICA DE MADRID

MÁSTER UNIVERSITARIO EN “INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN EDIFICACIÓN”. (ITINERARIO INVESTIGADOR)

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE SECCIONES MIXTAS DE HORMIGÓN-MORTERO DE REPARACIÓN BAJO SOLICITACIONES NORMALES

AUTORA: OLGA PÉREZ CASAL

TUTORES: Dr. ALFONSO COBO ESCAMILLA
Dra. ESTHER MORENO FERNÁNDEZ

Madrid, Septiembre 2011

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a mis tutores el Dr D. Alfonso Cobo Escamilla, catedrático de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid, y la Dra. Dña. Esther Moreno Fernández, profesora titular de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid, la confianza que me han otorgado, sin cuyas orientaciones, asesoramiento y estímulo continuo, no hubiera sido posible llevar a buen término este trabajo.

Al profesor titular de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid, D. Eduardo Medina Sánchez por compartir sus conocimientos y facilitarme los resultados obtenidos en la realización de ensayos previos de las vigas de hormigón armado empleadas posteriormente para este trabajo.

A los técnicos del Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela, Javier Acirón y Santiago Villa, por su total disponibilidad y colaboración, cuya ayuda ha sido fundamental para la realización de todos los ensayos.

A la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid, 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.

RESUMEN

Cada día son más frecuentes en la edificación las situaciones en que resulta necesario intervenir sobre una estructura existente. El hormigón ha demostrado tener prestaciones mecánicas muy amplias y una durabilidad adecuada para los usos a los que se destina. La durabilidad se puede ver afectada ya que el hormigón es permeable a líquidos y gases.

Un problema habitual en nuestro entorno geográfico, y en general en las zonas costeras, es el deterioro prematuro que presentan las estructuras de hormigón armado debido principalmente a la corrosión de las armaduras, ya sea por carbonatación del hormigón o, sobre todo, por penetración de cloruros.

En este trabajo se han sometido a compresión probetas mixtas de hormigón y morteros tradicionales o de reparación variando las proporciones de mortero. Los ensayos se han realizado colocando los materiales en serie y en paralelo.

En trabajos previos se han ensayado a flexión hasta rotura 4 vigas de hormigón armadas con distintas cuantías y distintos tipos de acero. Las 4 vigas se han reparado con dos materiales distintos: un mortero de cemento tradicional y un mortero de reparación de base orgánica. De nuevo las vigas se han ensayado hasta rotura mediante ensayos de flexión controlando la carrera.

Los resultados de los ensayos muestran 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 es superior a la de las vigas reparadas con mortero de cemento y a la de las vigas en su estado inicial. Las fisuras que aparecen tras el ensayo a flexión son un 80% superiores a las originales tanto en las vigas armadas inicialmente con 2 Ø 18 como en las del 16.

Por lo que respecta a las probetas, los resultados muestran que las de hormigón y mortero de cemento no llegan a alcanzar las cargas del mortero o del hormigón y sin embargo son más dúctiles. Las probetas con hormigón y mortero de reparación son generalmente más dúctiles que las de hormigón o mortero de reparación y alcanzan cargas de rotura que se encuentran entre las del hormigón y el mortero de reparación. Estos resultados permiten identificar que las probetas de mortero de reparación alcanzan un 23% más de resistencia que las de mortero de cemento Portland.

ABSTRACT

Every day is more common situations where construction is necessary to intervene in an existing structure. Concrete has proven to have very large mechanical performance and durability adapted for the uses to which it applies. Durability may be affected because the concrete is permeable to liquids and gases.

A common problem in our environment, and generally in coastal areas, is the premature deterioration of reinforced concrete structures, mainly due to corrosion of reinforcement, either by carbonation of concrete or especially, for chlorides penetration.

This work has been subjected to compression specimens mixed concrete and traditional repair mortar or varying the mortar proportions. The tests were performed by placing the materials in series and parallel.

In previous works were tested in bending at break 4 reinforced concrete beams with different amounts and types of steel. Four beams were repaired with two different materials: a traditional cement mortar and a repair organic mortar. Again, beams have been tested to breaking bending tests by controlling the race.

The test results show that the repaired beams are capable of reaching the breaking loads of the initial beams, and even higher. In addition, the ductility of beams repaired with repair mortar is higher than the beams repaired with cement mortar and beams in its initial state. Cracks appearing after flexural test are 80% higher than the original in both girders initially with 2 or 18 as in the 16.

With regard to the cubic specimens, the results show that the specimens with cement mortar and concrete do not reach the loads of the mortar or concrete, yet they are more ductile. The specimens of concrete and mortar repair are generally more ductile than concrete or mortar repair and reach breaking loads that are between the concrete and mortar repair. These results allow us to identify the repair mortar specimens reach 23% more strength than Portland cement mortar.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
MOTIVACIÓN	5
OBJETIVOS Y METODOLOGÍA	6
 Capítulo 1	 7
1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	
1.1 Análisis de estructuras de hormigón armado dañadas	7
1.1.1 Inspección de estructuras.....	10
1.1.1.1 Inspección preliminar	12
1.1.1.2 Inspección detallada.....	13
1.1.2 Urgencia de la intervención	15
1.2 Reparación de estructuras dañadas	16
1.2.1 Eliminación del hormigón deteriorado.....	17
1.2.2 Colocación del nuevo material de reparación	18
1.3 Clasificación de los materiales de reparación	18
1.3.1 Materiales de base inorgánica	22
1.3.1.1 Materiales de base inorgánica tradicionales	22
1.3.1.2 Materiales de base inorgánica no tradicionales	23
1.3.1.3 Técnicas de ejecución	25
1.3.2 Materiales de base orgánica	27
1.3.2.1 Mortero epoxi.....	27
1.3.2.2 Mortero de poliuretano	29
1.3.2.3 Mortero de poliéster.....	29
1.3.3 Materiales de base mixta	29
1.4 Antecedentes	31
 Capítulo 2	 44
TRABAJO EXPERIMENTAL A REALIZAR	
2.1 Introducción	44
2.2 Materiales a utilizar	45
2.2.1 Hormigón.....	45
2.2.2 Mortero de reparación.....	49
2.2.2.1 Mortero de reparación de cemento tradicional	49
2.2.2.2 Mortero de reparación de base orgánica.....	52

2.3 Trabajo experimental a realizar	55
2.3.1 Estudio de secciones en probetas	55
2.3.1.1 Prueba de ultrasonidos	55
2.3.1.2 Ensayos mecánicos	57
2.3.2 Estudio de piezas estructurales	58
 Capítulo 3	 67
RESULTADOS OBTENIDOS	
3.1 Estudio a nivel de sección de probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación	67
3.1.1 Resultados obtenidos en las pruebas de ultrasonidos	67
3.1.2 Resultados de los ensayos a compresión de un material	68
3.1.3 Resultados de los ensayos a compresión de dos materiales	73
3.1.3.1 Resultados de los ensayos a compresión en serie	73
3.1.3.2 Resultados de los ensayos a compresión en paralelo	76
3.2 Estudio a nivel de pieza estructural	84
3.2.1 Resultados de los ensayos a flexión y fisuración de las piezas sin reparar .	84
3.2.2 Resultados de los ensayos a flexión y fisuración de las piezas reparadas ..	89
 Capítulo 4	 98
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	
4.1 Características mecánicas y propiedades de las probetas	98
4.1.1 Probetas elaboradas con un material	98
4.1.2 Probetas elaboradas con dos materiales.....	100
4.2 Características mecánicas de las vigas ensayadas	103
4.2.1 Vigas Ø 16 mm.	104
4.2.2 Vigas Ø 8 mm.	104
 Capítulo 5	 105
CONCLUSIONES	
 Capítulo 6	 107
LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	
 Capítulo 7	 108
BIBLIOGRAFÍA	
 ANEXOS	 128

MOTIVACIÓN

Como consecuencia de la crisis económica que se presenta actualmente, se produce un cambio de rumbo en el sector inmobiliario, y las inversiones pasan de modo creciente a destinarse a la conservación, mantenimiento y rehabilitación de los edificios.

Con el paso del tiempo las estructuras van envejeciendo de acuerdo con un proceso más o menos lento en el que ejerce mucha influencia la agresividad del medio en el que están situadas, la magnitud de las cargas que hayan soportado y la calidad del proyecto, materiales y ejecución que hayan tenido, así como las condiciones de utilización y de mantenimiento a que hayan estado sometidas; este envejecimiento puede llevar a la estructura, o a parte de ella, a alcanzar un estado límite [Fernández, M.; 1994].

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 [Valcuende, M. O.; 1994]. En cambio, existe escasa bibliografía referente a las reparaciones de elementos de hormigón mediante empleo de morteros. Por tanto, surge un especial interés de investigación en este ámbito.

OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

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

En el estudio de secciones mixtas en probetas cúbicas de 10 x 10 x 10 cm, se han sometido a compresión probetas mixtas de hormigón y morteros tradicionales o de reparación variando las proporciones de mortero. Los ensayos se han realizado colocando los materiales en serie y en paralelo. Tras la rotura de las piezas, se han obtenido los diagramas tensión-deformación de las mismas.

En el estudio de piezas estructurales de 10 x 15 x 120 cm, preliminarmente se han ensayado a flexión hasta rotura cuatro vigas de hormigón armadas con distintas cuantías y distintos tipos de acero, en trabajos previos. Las cuatro vigas se han reparado con dos materiales distintos: un mortero de cemento tradicional y un mortero de reparación de base orgánica. De nuevo las vigas se han ensayado hasta rotura mediante ensayos de flexión controlando la carrera para obtener los diagramas momento-desplazamiento de cada uno de los casos y examinar la fisuración de las piezas. Se han comparado dichos resultados con los que se han obtenido previamente a la reparación, y se evaluarán las posibles diferencias de comportamiento antes y después de la reparación de las vigas dañadas.

Por último, se han comparado las características mecánicas y los parámetros de ductilidad, de los dos tipos de morteros de reparación: de cemento tradicional y de base orgánica para comprobar que ambos morteros de reparación son igualmente válidos.

Capítulo 1

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

1.1 ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO DAÑADAS

En los últimos años, la reparación estructural en edificios existentes ocupa una parte significativa de la industria de la construcción. Este fenómeno se debe, al creciente número de estructuras de hormigón que en los últimos tiempos presenta signos de deterioro prematuro [Octavio, M.; 1994].

Toda intervención precisa de una inspección encaminada a diagnosticar las causas de los posibles deterioros, si los hay, y a posibilitar la estimación de la resistencia residual de la estructura, con base en lo que deberá decidirse acerca de la necesidad de una determinada actuación y de su urgencia. El conocimiento de las causas de deterioro, de la extensión del mismo y de su actividad es indispensable para la selección del tipo de intervención, tras lo cual deberá procederse a la redacción del correspondiente proyecto y a su ejecución, adoptando las medidas necesarias para su seguimiento.

No es posible evaluar la importancia de las intervenciones, ni escoger los métodos de reparación más apropiados, si el origen de los daños no es conocido. No hay reglas para determinar las causas de deterioro; cada caso plantea un problema y debe ser objeto de un diagnóstico particular. En cualquier caso, una inspección rigurosa y un estudio sistemático y completo de los aspectos detectados es lo que puede poner en disposición de sancionar técnicamente la estructura [Calavera, J.; 2005].

No obstante, ante la urgencia de la reparación, es frecuente adoptar soluciones sin asegurarse de su validez, lo que puede conducir a:

- Una reparación innecesariamente costosa.
- El acometimiento de sólo parte del problema.
- La elección de un método de reparación que resulte más perjudicial que saludable.
- Tapar los signos externos de la anomalía, dificultando cualquier investigación posterior.
- Dar un tratamiento tópico a los desperfectos, pudiendo reproducirse de nuevo a corto o medio plazo.

Toda manifestación patológica tiene siempre una causa y, por consiguiente, su determinación es indispensable para poder adoptar decisiones adecuadas.

En cualquier caso, se debe tener presente que la reparación de estructuras de hormigón es un trabajo difícil, precisando de muchas operaciones que se realizan a menudo en condiciones desfavorables. Por ello, es recomendable el concurso de especialistas independientes, máxime teniendo en cuenta que en la mayoría de los casos sólo puede realizarse una inspección global y detallada tras el acceso a la construcción de la contrata y sus equipos [Kavyrchine; 1983].

En la práctica se ha de considerar el proyecto de intervención como un todo, en el que las distintas fases se interrelacionan. Asimismo, para obtener un resultado final óptimo, es necesario conocer y aplicar los métodos de ensayo más adecuados para predecir, de algún modo, el comportamiento de los materiales empleados. Por todo ello, se puede plantear una metodología de intervención dividida en las siguientes etapas (**figura 1**):

- Inspección y cálculo de la resistencia residual de la estructura.
- Selección del tipo de intervención.
- Ejecución y control de la intervención.
- Seguimiento técnico.

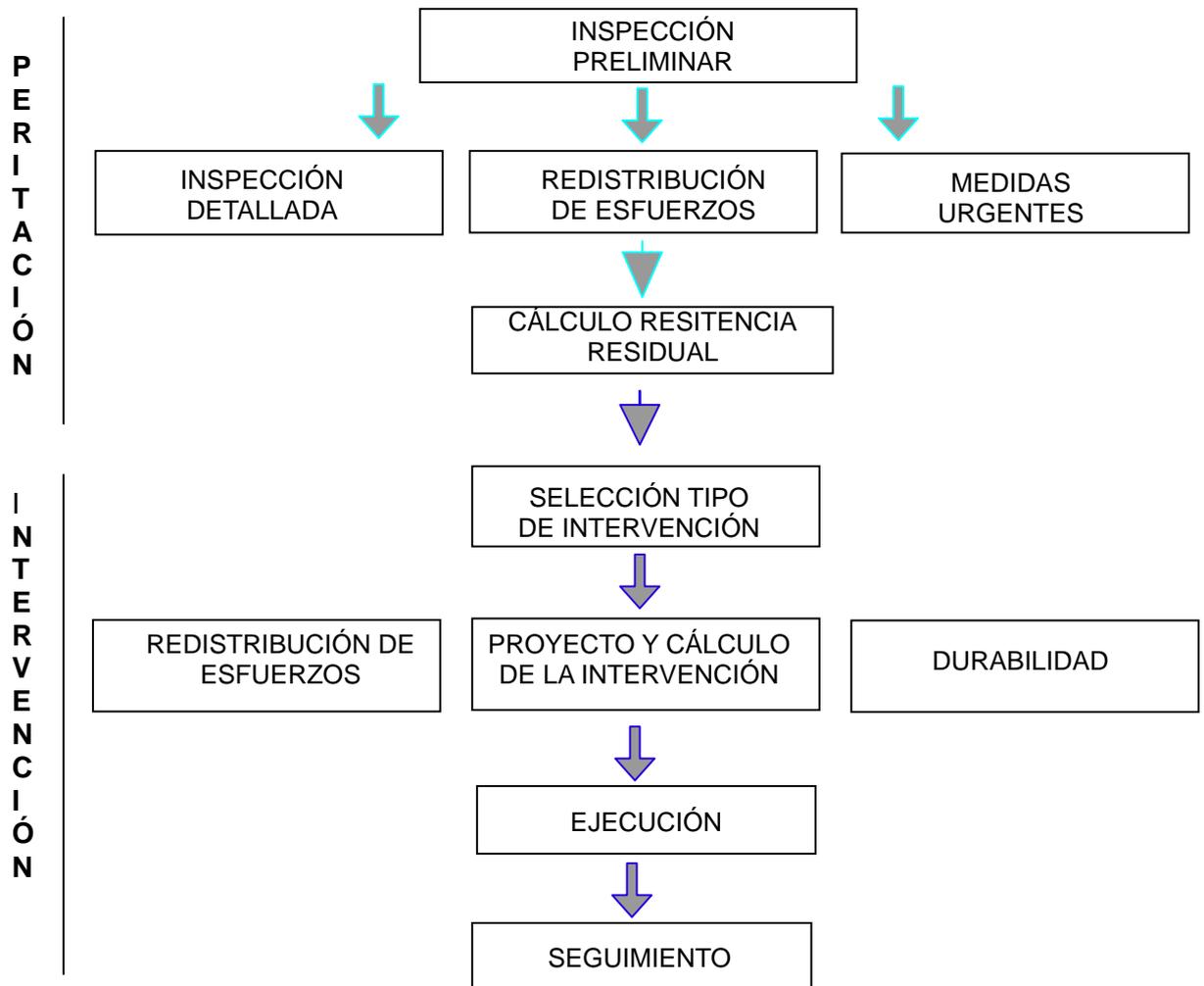


Figura 1 Metodología de la intervención.

Fernández Cánovas, M (1994) indica en el esquema, otro camino a seguir en todo proceso patológico para llegar a una solución que permita el restablecimiento de la capacidad resistente de la estructura (**figura 2**).

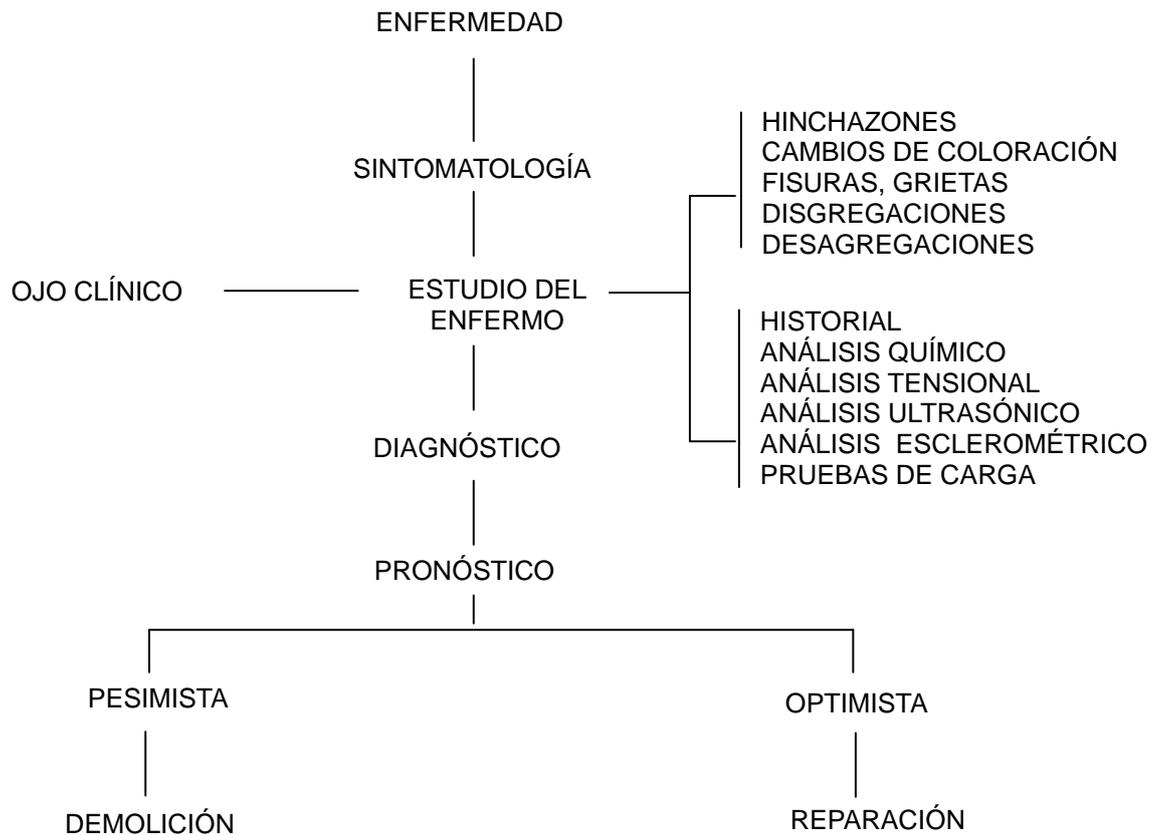


Figura 2 Fases de un estudio patológico de estructuras de H.A. [Fernández, M.; 1994].

1.1.1 INSPECCIÓN DE ESTRUCTURAS

Los problemas que presenta una estructura de hormigón dañada que se pretende reparar pueden ser muchos y a veces, muy complejos. Durante el proceso de inspección, se observa y protocoliza documentalmente cualquier deterioro observado. La inspección se debe plantear en función de qué zona se desea investigar, de unos objetivos preestablecidos y de unos procedimientos sistemáticos.

La investigación y evaluación de estructuras de hormigón armado es un trabajo que combina elementos de diseño estructural, construcción y tecnología de materiales, e incluye aspectos de durabilidad, seguridad y comportamiento en servicio. El nivel de detalle requerido en el estudio puede variar, desde la simple valoración estructural y funcional, basada en la inspección visual superficial durante las inspecciones periódicas, hasta una profunda investigación y procedimiento de evaluación que combina técnicas especiales de inspección y ensayos a macro y micro-niveles.

Antes de proceder a cualquier tipo de intervención es necesario conocer la causa, el efecto y la influencia que los problemas identificados tienen sobre el comportamiento y la integridad de la estructura a corto y largo plazo [Cobo, A.; 2001]. A tal fin, se debe realizar un control periódico de la estructura que permita detectar, dentro de unos márgenes de tiempo razonables, la presencia de lesiones.

Hay defectos estructurales muy localizados y de poca importancia que pueden ser debidos a una ejecución deficiente en una determinada zona, pero que no afectan al resto de la estructura con lo cual su reparación no crea problemas pudiendo realizarse de una forma inmediata.

Otros defectos, por el contrario, son de tal cuantía que exigirán, antes de decidirse por su reparación, realizar un estudio completo de la obra, analizando todos los detalles. Incluso, en casos concretos esto no será suficiente y habrá que recurrir a realizar análisis y ensayos que permitan conocer las motivaciones de tipo mecánico, físico o químico que han podido producir las lesiones.

En muchas ocasiones no bastará con conocer todos estos detalles y habrá que continuar la investigación recurriendo al uso de laboratorios y centros especializados en materiales que analicen muestras de un hormigón desagregado a fin de conocer el origen probable de los daños que presenta y que, en ocasiones puede ser de tipo químico y a veces, difícil de determinar si no se dispone de medios adecuados y personal preparado.

A través de los síntomas que presenta una estructura hay que analizar también las causas que han podido provocar las lesiones o defectos que presenta la misma; en este sentido, la forma y localización de las fisuras puede aportar mucha ayuda a este análisis, bastando, a veces, la observación del cuadro de fisuración que presenta para llegar a conclusiones bastante exactas con vistas al establecimiento de un diagnóstico.

Una inspección en obra podría realizarse recorriendo las siguientes etapas:

- a. Elaboración de fichas de antecedentes de la estructura y del medio ambiente.
- b. Examen visual general de la estructura.
- c. Levantamiento de daños.
- d. Selección de zonas para la realización de un Examen visual detallado y

elaboración del Plan de muestreo.

- e. Selección de las técnicas de ensayo, medición y análisis más apropiadas.
- f. Selección de las zonas donde hay que realizar los ensayos, mediciones y análisis físico-químicos en el hormigón, en la armadura y en el medio ambiente circundante.
- g. Ejecución de mediciones, ensayos y análisis físico-químicos en el hormigón y en la armadura.

Se puede proceder en dos etapas, dependiendo del tipo y de la magnitud de la información que se desee obtener: mediante una Inspección preliminar y una Inspección detallada.

1.1.1.1 INSPECCIÓN PRELIMINAR

El propósito de la inspección preliminar es verificar la existencia de insuficiencias o deterioros, describir su naturaleza y estimar su extensión y posibles efectos sobre las características estructurales y vida útil residual [Kavyrchine; 1983]. En general, permite tener una idea global del contexto en el que se desenvuelve la estructura.

Consiste en la realización de una inspección visual y unos ensayos básicos para detectar todos los defectos y síntomas de deterioro: localización de delaminaciones, dureza del hormigón, profundidad del recubrimiento, localización del acero, geometría de las grietas, profundidad de carbonatación y perfiles de cloruros. Determinando además, las dimensiones de los elementos estructurales. Asimismo, se debe estudiar la documentación existente, incluyendo código, análisis, estructural, planos, especificaciones, datos geotécnicos, libros de órdenes, resultados de inspecciones anteriores y cualquier otro documento que resulte relevante respecto del cálculo, la construcción y el control de calidad de la estructura. Paralelamente, se debe recopilar todos los datos disponibles sobre los que se presenta su servicio la estructura, así como realizar, por lo general, un número limitado de ensayos, fotografiando todos aquellos elementos que presenten anomalías.

Durante esta etapa al menos se realizará la elaboración de una Ficha de antecedentes de la estructura y el medio y un Examen visual general de la estructura [Cobo, A.; 2001].

A menudo, valorados los datos obtenidos, se puede decidir acerca de la necesidad

o no de abordar una intervención. En el primer caso, estos datos servirán de base para la elaboración de un programa de inspección detallada y posible adopción de medidas de seguridad urgentes, tales como apejar la estructura, limitar las sobrecargas, o evacuar el edificio, medidas que se irán modificando y completando a medida que se avance en el proceso de inspección. En el segundo caso, los ensayos que pueda realizarse posteriormente servirán para verificar el diagnóstico ya emitido [Octavio, M.; 1994].

1.1.1.2 INSPECCIÓN DETALLADA

La inspección detallada tiene como objetivo completar o complementar la inspección rutinaria cuando sea necesario o la realización de otros ensayos para evaluar la estructura, predecir su vida de servicio y su capacidad de carga. En cualquier caso, la inspección detallada debe suministrar la información suficiente para proceder al cálculo de la resistencia residual y para seleccionar el método de intervención, redactar el correspondiente proyecto y planificar y ejecutar la obra.

Durante la inspección se debe verificar la estabilidad estructural, siendo de especial importancia el instante de aparición de las manifestaciones patológicas. En tal sentido:

- Debe ser cuestionada la estabilidad cuando resulte evidente que los movimientos o deformaciones de la estructura han aumentado en un breve espacio de tiempo, procediendo, por ello, a la monitorización de la misma mediante la instalación de los oportunos sensores.
- Necesariamente debe determinarse in situ el tipo, el estado y las dimensiones de la cimentación cuando los deterioros críticos observados puedan resultar atribuibles a movimientos de la misma, siendo necesario, en general, una serie de determinaciones geotécnicas.

De esta forma se obtiene información acerca de las propiedades mecánicas del hormigón y del acero, la durabilidad del hormigón, la microestructura del hormigón, la velocidad de corrosión del acero, la tensión del pretensado y la respuesta estática y dinámica de la estructura.

- Plan de trabajo

Con la información obtenida en la inspección preliminar, la estructura se debe dividir en zonas según sus exigencias estructurales, sus grados de deterioro o su exposición

ambiental.

En cada una de estas zonas hay que decidir el tipo de ensayos, mediciones o análisis que es necesario efectuar y planificar su realización.

- Realización de la inspección detallada

En general, resulta necesario determinar ciertas propiedades o características de los materiales empleados, principalmente las referidas al hormigón y al acero. Es conveniente emplear varios métodos de ensayos que complementen las observaciones oculares. Las técnicas y métodos de ensayos empleados deben estar en consonancia con el tipo de defectos que presenta la estructura y con la importancia de la misma.

Los ensayos mínimos a realizar serían los siguientes:

- a. Para la evaluación del hormigón: resistividad, ultrasonidos, esclerometría, profundidad de carbonatación, perfil de cloruros, resistencia a compresión y porosidad.
- b. Para la evaluación de la armadura: localización del armadura y espesor del recubrimiento, pérdida de sección de acero, límite elástico, medida de potenciales y de velocidad de corrosión.

Dichos análisis y ensayos permiten cuantificar el nivel de daños antes de decidirse a iniciar las operaciones de reparación.

Cuantificación de los daños [Fernández, M.; 1994]:

- Medias geométricas.
- Verticalidad de elementos, pérdida de horizontalidad, excentricidad.
- Trayectoria y espesor de las fisuras.
- Flechas residuales.
- Evolución en el tiempo de las anteriores características, instalando los equipos de medida convenientes para su determinación.

A fin de completar la información, cuando las acciones causantes de los deterioros se deriven de las condiciones ambientales o del fuego, puede llevarse a cabo una serie de ensayos adicionales, tales como:

- Análisis químicos del hormigón o del acero.

- Determinación del contenido en cloruros del hormigón endurecido, coeficiente de absorción de agua, nivel de permeabilidad al agua, relación agua/cemento, profundidad de carbonatación.
- Medidas de potencial electroquímico de corrosión y de resistividad del hormigón.
- Ensayos de termoluminiscencia.

Por otra parte, de la experiencia adquirida tras la inspección y posterior demolición de tres edificios en 1978, se extrajeron varias conclusiones que conviene tener presente:

- La inspección visual, por sí sola, no permite alcanzar una determinación fiable del estado de los elementos estructurales.
- La documentación existente aporta poca o nula información sobre aspectos que pueden ser críticos para la seguridad de las estructuras.
- Para realizar una inspección detallada de los elementos estructurales es necesario en muchos casos eliminar determinados acabados. Si ello no es posible, debe intensificarse el muestreo a fin de obtener la información necesaria.
- Debe tenerse en cuenta que defectos estructurales importantes pueden dar lugar a manifestaciones de escasa entidad.

1.1.2 URGENCIA DE LA INTERVENCIÓN

Ante una estructura dañada y, con anterioridad a la intervención propiamente dicha, puede ser necesario tomar medidas preventivas tales como evacuación, retirada de cargas, apuntalamiento, adiestramiento, o incluso demolición.

Una vez conocida la capacidad residual relativa v de cada elemento, obtenida por métodos analíticos o empíricos, ésta puede servir de guía para adoptar las decisiones necesarias acerca de la intervención sobre un sistema deteriorado, como por ejemplo la urgencia de la misma [Octavio, M.; 1994].

El tiempo máximo tolerado ante el llevar a cabo medidas de intervención se entiende como una función de la capacidad relativa v , si bien es difícil establecer en qué momento es ya ineludible proceder a reforzar la estructura.

En cualquier caso, en aquellas circunstancias en las que las acciones o los daños evolucionen con el tiempo, las decisiones sobre la urgencia vendrán determinadas por la velocidad de evolución estimada.

Por otro lado, cualquier decisión se debe basar previamente en un estudio de acciones minucioso, adecuado y realista, de acuerdo con el caso que se estudia. También la fijación de un conjunto de valores de los coeficientes de seguridad parciales de acuerdo con normas más detalladas que las normas españolas, es de gran importancia.

En este sentido, un aspecto fundamental es la proporción que representa la carga permanente respecto de la carga total. Este concepto, siempre importante en cualquier proyecto, lo es especialmente en el caso de Informes de Patología o Proyectos de Rehabilitación. En efecto, en una obra no construida, las acciones de carácter permanente son un hecho futuro. Por el contrario, en el caso de una intervención este es un suceso pasado y la determinación de las densidades, dimensiones, etc., permite establecer con gran precisión este tipo de acciones.

Todas aquellas estructuras en las que la relación entre carga permanente y sobrecarga es importante, entrañan, en principio, menor riesgo que aquellas en que dicha relación es más baja. Obviamente, si la carga permanente representa una fracción importante de la carga total, la seguridad frente a las sobrecargas es extraordinariamente alta, mientras que la seguridad se ve reducida en los casos de construcciones donde predominan las acciones variables [Octavio, M.; 1994].

1.2 REPARACIÓN DE ESTRUCTURAS DAÑADAS

La reparación de estructuras de hormigón es cada vez más reconocido en el campo de la ingeniería civil, pues el principal problema es el deterioro de las estructuras, asociado a diversas causas [Octavio, M.; 1994], que previamente a la reparación, ya se conocen. Las principales causas son: acciones físicas y químicas, corrosión de armaduras, acciones accidentales y extraordinarias y las producidas en el proceso constructivo [Fernández, M.; 1994], produciendo grietas y desprendimientos en la superficie del hormigón.

Entre los factores que hay que tener en cuenta a la hora de seleccionar un material de relleno para una reparación se destacan los siguientes [GEHO; 1989]:

- Grado de deterioro, sus causas y evolución así como resistencia mecánica del hormigón a reparar.
- Espesor a aplicar una vez saneado el soporte.
- Lugar que hay que rellenar, porque aunque habitualmente las reparaciones se llevan a cabo en la superficie, a veces las oquedades están en el interior.
- Solicitaciones físico-químicas a las que va a estar sometida la estructura incluyendo los cambios térmicos.
- Condiciones de temperatura y humedad tanto ambiental como en el soporte durante la reparación.
- Tiempo disponible para la reparación, el cual está en función del requerimiento para alcanzar las resistencias solicitadas.

Una vez determinados los factores indicados y los costes de la aplicación, se aplica el material adecuado de reparación.

1.2.1 PREPARACIÓN DE SUPERFICIES A REPARAR

Es preciso eliminar todo el hormigón de las zonas donde el hormigón presente síntomas de deterioro ampliando el área a eliminar una distancia de seguridad.

Cuando hay que realizar una reparación en la que es necesario aplicar un material nuevo adherido sobre un hormigón existente, como puede ser el caso de unir mortero (tradicional o especial), la aplicación debe comenzar con una preparación adecuada de la superficie del hormigón existente que ha de recibir a los nuevos materiales.

Las características superficiales de un hormigón tienen, en general, una gran influencia en la durabilidad y en la adhesión de los materiales que se unan a él; por consiguiente, para conseguir uniones eficaces entre el hormigón y otros materiales es fundamental que la superficie de aquel sea sana y fuerte y esté limpia de sustancias contaminantes, de polvo, membranas de curado, productos de desmoldeo, etc. [Fernández, M.; 1994].

Un hormigón sano y limpio presenta una rugosidad y porosidad natural que permite una absorción rápida de parte de los productos aplicados mejorando, por tanto, mucho la adherencia de los mismos. Por tanto, esta preparación superficial es siempre imprescindible para obtener uniones eficaces y una reparación durable.

Una consideración importante a tener en cuenta es evitar los ángulos agudos, para evitar problemas como la fisuración por retracción, y deben buscarse soluciones con ángulos superiores a 90° (**figura 3**).

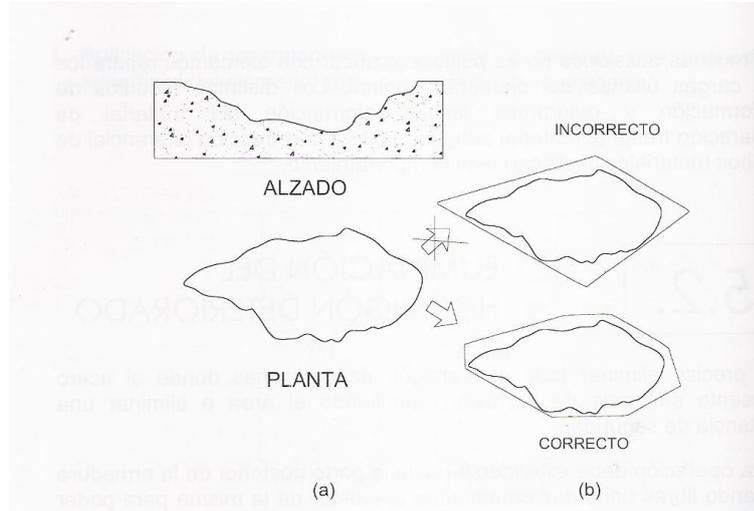


Figura 3 Las superficies de hormigón eliminado no deben poseer ángulos agudos [Cobo, A.; 2001].

1.2.2 COLOCACIÓN DEL NUEVO MATERIAL DE REPARACIÓN

Son muy numerosos los tipos de mortero de reparación que actualmente pueden encontrarse en el mercado, pero casi todos ellos pueden agruparse fundamentalmente en tres familias: de base inorgánica, de base orgánica y de base mixta. Se deberá colocar el material más adecuado en función al uso que se le destina.

1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES DE REPARACIÓN

En la **figura 4** aparece una clasificación de los morteros de reparación existentes y se han marcado en otro color los morteros que se emplean posteriormente en los ensayos de este trabajo.

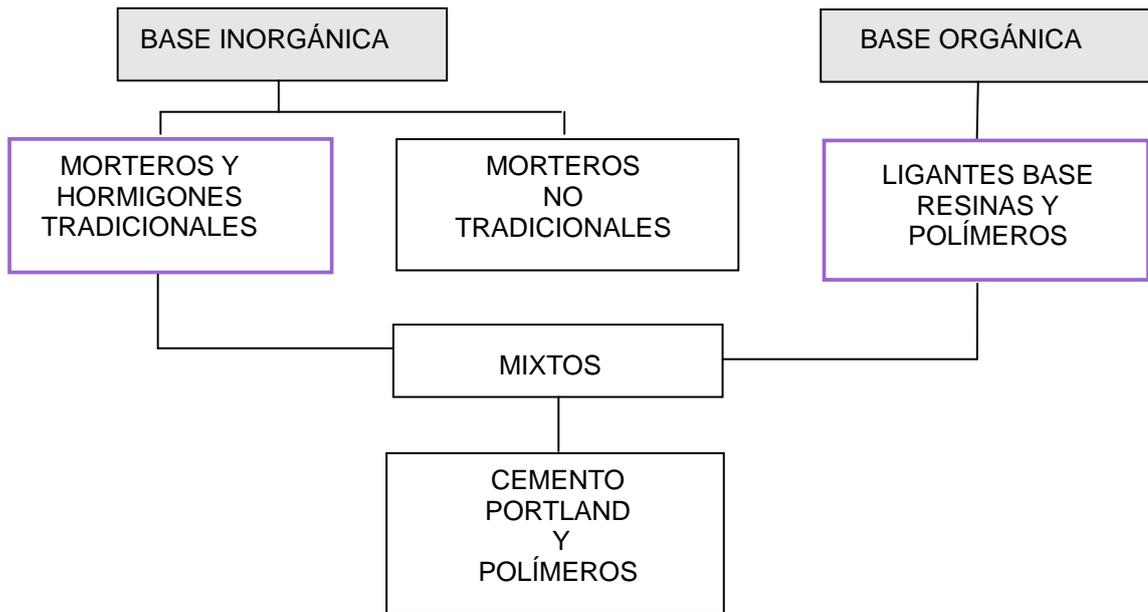


Figura 4 Materiales de reparación [Cobo, A.; 2001].

La selección del mortero de reparación más adecuado, a menudo se hace difícil. Por ello, a continuación se describen detalladamente las diferentes propiedades de cada uno [GEHO; 1989].

En la **tabla 1** se ofrecen los valores de las propiedades características de los materiales de reparación más utilizados.

	Hormigones Morteros (lechadas) BASE CEMENTO	Sistemas BASE CEMENTO-POLÍMEROS	Hormigones Morteros Rellenos (lechadas) BASE RESINAS EPOXI	Hormigones Morteros Rellenos (lechadas) BASE POLIÉSTER
Resistencia a Compresión, N/mm²	20 - 70	10 - 60	55 - 110	55 - 110
Módulo Elástico, Kp/cm²	20 - 30	1 - 30	0,5 - 20	2 - 10
Resistencia a Flexión, N/mm²	2 - 5	6 - 15	9 - 29	8 - 17
Resistencia a Tracción, N/mm²	1,5 – 3,5	2 - 8	9 - 29	8 - 17
Elongación de Rotura, %	0	0 - 5	0 - 15	0 - 2
Coefficiente lineal de Expansión Térmica por 0° C	$7 - 22 \times 10^{-6}$	$8 - 20 \times 10^{-6}$	$25 - 30 \times 10^{-6}$	$25 - 30 \times 10^{-6}$
Absorción de agua, 7 días a 25° C, %	5 - 15	0,1 – 0,5	0 - 1	0,2 – 0,5
Temperatura máxima de uso bajo carga °C	Por encima de 300° C depende del diseño de la mezcla	100 - 300	40 - 80	50 - 80
Tiempo de desarrollo de las resistencias a 20° C	1 – 4 días	1 – 7 días	6 – 48 horas	2 – 6 horas

Tabla 1 Comparación de propiedades características de los morteros de reparación más utilizados [GEHO; 1989].

En la **tabla 2** se indican los campos de aplicación de materiales de reparación en función de la extensión y del espesor de la zona a reparar.

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							x	x
Mortero tradicional			x	x	x	x	x	
Hormigón y micro hormigón	x						x	
Hormigón proyectado		x						
Mortero modificado con expansivos				x	x	x	x	
Mortero fosfato de magnesio		x						
Mortero epoxi				x	x	x	x	x
Mortero poliuretano				x	x	x	x	x
Mortero poliéster						x		
Mixtos con polímero termo-plástico			x	x	x	x		x
Mixtos con polímero termo-estable			x	x	x	x		

Tabla 2 Selección de morteros de reparación según espesores y áreas [GEHO; 1989].

1.3.1. MATERIALES DE BASE INORGÁNICA

Se basan fundamentalmente en el cemento, sea portland o no. Se pueden clasificar en materiales de base inorgánica tradicionales y de base inorgánica no tradicionales.

1.3.1.1 MATERIALES DE BASE INORGÁNICA TRADICIONALES

Con frecuencia se han usado morteros y hormigones de cemento portland tradicionales sin ningún tipo de precaución, obteniendo resultados totalmente insatisfactorios. El motivo principal que ha causado el fracaso de estas reparaciones ha sido el no tener en cuenta los cambios de volumen que experimenta la pasta durante el fraguado. Esto ha ocasionado la aparición de tensiones en la interfase material antiguo – material de reparación, disminuyendo la adhesión entre ambos materiales, llegando a producirse el agrietamiento y la separación [Cobo, A.; 2001]. Para evitar esto, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones básicas [GEHO; 1989]:

- Asegurar una buena adherencia al hormigón antiguo.
- Presentar la mínima retracción por lo que hay que prever una muy cuidadosa dosificación de sus componentes.
- Resistir a los agentes agresivos que provocan el deterioro el hormigón antiguo.

Los cementos más idóneos a emplear son aquellos cuya resistencia característica oscila, entre 350 y 450 Kp/cm² y con finuras Blaine inferiores a 4000 cm²/g, para producir retracciones mínimas [GEHO; 1989].

Todos ellos se pueden usar en forma de lechada, mortero, microhormigón y hormigón [GEHO; 1989].

- Lechada

Es el material compuesto por cemento y agua. Su utilización en reparaciones se reduce a dos clases: la ligera y la densa.

La lechada ligera tiene una relación agua-cemento del orden de la unidad. Se coloca por decantación de los granos de cemento, siendo recomendable el uso de aditivos para reducir la exudación. Se aplica en el relleno de fisuras de apertura inferior al milímetro, normalmente cuando la inyección con fisuras no es aconsejable por algún

motivo: dimensiones, temperatura, presencia de agua, etc.

La lechada densa tiene una relación agua-cemento del orden de 0,5. Se puede colocar por vertido o por bombeo. Se utiliza para el relleno de grietas de espesores superiores a 1 mm. Otra posible aplicación es como complemento de morteros colocados por bombeo en rellenos de coqueras y grietas de espesor variable. Inicialmente se bombea la lechada densa que posteriormente es desplazada por un mortero inyectado. De este modo, el mortero rellena las zonas de mayor espesor, quedando las zonas de menor apertura rellenas por la lechada. Para este tipo de lechada también se recomienda el empleo de aditivos.

- Mortero

Es el material formado por cemento, agua y árido que pasa por el tamiz de maya 5 mm. Cuando se emplea como material de reparación es necesario el empleo de aditivos para disminuir la relación agua-cemento. En el mercado se pueden encontrar ya predosificados, envasados y preparados para usar.

- Microhormigón

El microhormigón es el tipo de mortero más utilizado en trabajos de reparación. Son morteros colocados por bombeo en los que el árido pasa por un tamiz de 2,4 mm de malla. No se pueden someter a compactación.

Cuando se emplean relaciones agua-cemento de 0,69 con dosificaciones de 500 kg de cemento por metro cúbico, se obtienen características resistentes similares a las de un H-20. Cuando la relación agua-cemento es de 0,56 y se emplean 650 kg de cemento, se obtienen las características de un H-40.

- Hormigón

Es el material compuesto por cemento, agua, árido fino y árido grueso. Para su aplicación como material de reparación es imprescindible la utilización de algún tipo de aditivo que anule la retracción.

1.3.1.2 MATERIALES DE BASE INORGÁNICA NO TRADICIONALES

Son morteros cuyo material base es un cemento portland modificado con agentes expansivos o un cemento no portland. Estos materiales consiguen un aumento de volumen después de fraguar que compensa la retracción o incluso pueden crear una expansión que genera compresiones en los hormigones (**figura 5**).

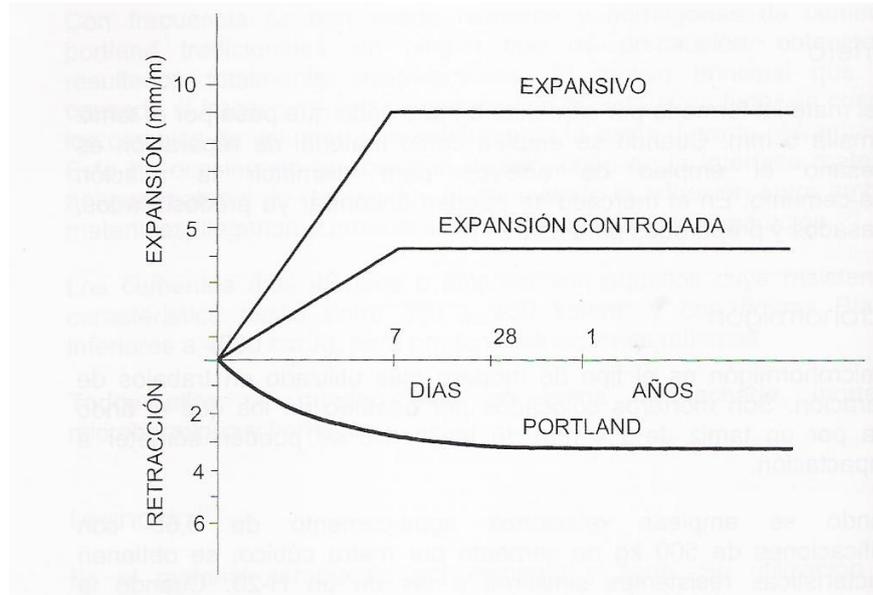


Figura 5 Comparación de las curvas de curado para pastas de cemento portland, pastas de cementos expansivos y pastas de cemento con la expansión controlada [Cobo, A.; 2001].

Se pueden clasificar en cuatro tipos, atendiendo al constituyente base que utilizan [GEHO; 1989]:

- Cemento portland modificado con agentes expansivos
- Cemento a base de fosfato de magnesio o aluminio.
- Cemento aluminoso.
- Cemento de ettringita.

Todos ellos pueden contener fibras para aumentar las propiedades mecánicas o disminuir la retracción.

En la **tabla 3** se dan algunos valores orientativos para estos materiales.

PROPIEDAD	RANGO	VALOR TÍPICO
Expansión a 28 (%)	0,01 – 0,10	0,05
Resist. Compresión a 24 h (Kp/cm ²)	57 - 273	210
Resist. Compresión a 28 días (Kp/cm ²)	350 - 812	490
Resist. Flexotracción a 28 días (Kp/cm ²)	Hasta 93	-
Módulo de elasticidad a 28 días (Kp/cm ²)	-	300.000
Adherencia al hormigón a 28 días (Kp/cm ²)	-	35

Tabla 3 Valores orientativos de los materiales de base inorgánica no tradicionales [GEHO; 1989].

Suelen encontrarse en el mercado en forma de morteros preparados listos para usar. Se mezclan con agua en las propiedades indicadas por el fabricante y se colocan generalmente de forma manual o mediante proyección o bombeo.

1.3.1.3 TÉCNICAS DE EJECUCIÓN

Las consideraciones básicas que es necesario tener en cuenta y comunes a todas las técnicas son [GEHO; 1989]:

- El espesor de la reparación, que fija el tamaño máximo de árido a utilizar y también la técnica más adecuada.
- La extensión de la reparación, ya que un “parcheado” puede originar una pérdida de estética, que puede evitarse con un acabado final continuo.
- Deformaciones diferenciales entre el soporte y el material de reparación debido a cambios termohigrométricos y a la retracción hidráulica del nuevo material.
- Dificultad para conseguir una compactación adecuada que permita llegar a las características resistentes necesarias del material de reparación.

Tres son las técnicas fundamentales que se utilizan para ejecutar reparaciones con los materiales descritos: colocación manual, hormigón proyectado y hormigón inyectado [Cobo, A.; 2001].

- Colocación manual

La colocación del material en la zona que se va a reparar debe realizarse de forma que se impida la entrada de aire, para evitar la formación de coqueas.

En el caso de la colocación del hormigón utilizando encofrados, éstos deben ser suficientemente rígidos y estar perfectamente unidos al hormigón, para impedir la pérdida de lechada. El hormigón utilizado en la reparación debe tener unas propiedades finales lo más parecidas al hormigón existente (resistencias mecánicas, módulos de elasticidad, coeficiente de fluencia, etc.). Para evitar las fisuras debido a la retracción, especialmente en la zona de unión, se debe elegir cuidadosamente el tipo de cemento, su dosificación y la relación agua – cemento.

- Hormigón proyectado

Se puede emplear como reparación de superficies dañadas, sustitución de

hormigón y para refuerzo de elementos estructurales. En general esta técnica proporciona capas muy compactas e impermeables, especialmente cuando se emplean hormigones o morteros con relaciones agua – cemento bajas. Su rendimiento en la puesta en obra es elevado.

El tratamiento previo de la superficie juega un papel fundamental con este tipo de técnica. El chorreado de arena, con la superficie previamente humedecida, es un procedimiento eficaz. En este caso no es preciso añadir ningún adhesivo para mejorar la adherencia porque, a consecuencia del rebote de áridos, se produce un enriquecimiento del mortero de la superficie de la zona de contacto.

Cuando se proyectan espesores mayores a 50 o 60 mm hay que incorporar una armadura mínima, que puede ser una tela de gallinero o un mallazo electrosoldado. En este caso hay que evitar que queden espacios sin rellenar por detrás e las barras,

La distancia de la boquilla de salida a la superficie que se está proyectando puede oscilar entre 0,6 y 1,8 metros, lo que obliga a disponer de plataformas de trabajo apropiadas por las que se puedan mover los operarios.

- Hormigón inyectado

Esta técnica consiste en la colocación de grava en contacto por puntos dentro de un encofrado y la posterior inyección de un microhormigón que rellena los espacios que quedan entre la grava. El microhormigón se inyecta desde un punto más bajo de la zona a hormigonar, para que, al ir ascendiendo entre la grava, se rellenen los vacíos.

La granulometría de la grava elegida debe permitir la ascensión del microhormigón. Usualmente se elimina el árido fino y se emplean tamaños superiores a 20 mm.

El microhormigón empleado en la inyección suele estar formado, en peso, por dos partes de cemento portland, una de cenizas volantes o puzolanas naturales finamente molidas y tres o cuatro partes de árido fino con un tamaño máximo de 2,4 mm y módulo de finura comprendido entre 1,7 y 3,0. Es frecuente que se emplee un aditivo fluidificante con una pequeña cantidad de polvo de aluminio para lograr una expansión de la mezcla que tienda a rellenar mejor los espacios entre los granos del árido.

El hormigón obtenido por esta técnica posee un módulo de elasticidad longitudinal superior al de un hormigón tradicional con la misma dosificación, debido a que la grava está en contacto por puntos.

1.3.2 MATERIALES DE BASE ORGÁNICA

Están constituidos por un ligante que es un polímero termoestable. Los más empleados son los basados en resinas epoxi, poliuretanos poliésteres no saturados.

Los polímeros termoestables se presentan en forma de dos o tres componentes que se mezclan en el momento de su uso, produciéndose una reacción química (polimerización) y su endurecimiento.

La reacción de polimerización comienza cuando se mezclan los componentes, disponiendo de un tiempo el aplicador del producto para su puesta en obra (tiempo de trabajabilidad). El tiempo de trabajabilidad es muy variable, pudiendo oscilar entre varios minutos a algunas horas, a medida que se acerca el final del mismo, aumenta la temperatura del producto y su viscosidad.

El tiempo de trabajabilidad depende de los siguientes factores:

- Naturaleza del sistema utilizado (epoxi, poliuretano o poliéster).
- Temperatura de los componentes de la mezcla.
- Temperatura y naturaleza del sustrato donde se va a aplicar el producto.
- Cantidad de mezcla de los componentes.
- Forma de puesta en obra.

La reacción de polimerización es exotérmica, de modo que cuando después de la mezcla de los componentes, el producto se conserva en el mismo envase, el calor no se puede evacuar, la temperatura de la masa aumenta y la reacción se acelera. Si una vez mezclados los componentes, el producto se vierte sobre el sustrato o se coloca en un sitio donde el calor de la reacción puede ser absorbido, la reacción se ralentiza y el tiempo de trabajabilidad aumenta.

No es recomendable el empleo de estos sistemas con temperaturas inferiores a los 5° C debido a los siguientes factores:

- La velocidad de endurecimiento de las resinas, sobre todo de las epoxi, se retrasa de forma importante.
- Las viscosidades de los componentes y de la mezcla aumentan de forma importante, dificultando la puesta en obra.

- La penetración en la superficie donde se aplican disminuye, disminuyendo la adherencia.

1.3.2.1 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.

Al conjunto de resina y endurecedor se le denomina formulación. Todos los productos comerciales epoxi utilizados como productos de reparación del hormigón están constituidos por la formulación y, al menos algún otro componente, que se llama modificador de la formulación.

El componente modificador más importante de un sistema epoxi son las cargas, que por su espacial importancia se las considera como distintas de los modificadores.

El esquema fundamental de un mortero epoxi se muestra en la **figura 6**.

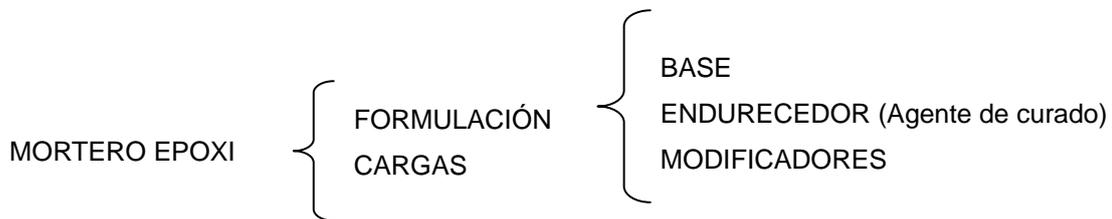


Figura 6 Componentes de un mortero epoxi [AENOR UNE 83-702-94; 1994].

Antes de la colocación del mortero epoxi es necesario aplicar una imprimación sobre la zona del hormigón dañada y sobre las armaduras para conseguir una buena adherencia entre el hormigón a reparar y el mortero epoxi. En el caso de las armaduras, la imprimación también sirve de barrera anticorrosiva cuando éstas van a quedar al descubierto.

La aplicación de la imprimación se realiza normalmente con brocha, aunque también pueden emplearse rodillos o pistolas, dependiendo de su viscosidad.

El mortero epoxi se coloca sobre la imprimación cuando esta mantiene pegajosidad al tacto. Esto sucede en un periodo de tiempo que depende del tipo de imprimación y

de la temperatura ambiente. Si por cualquier causa la imprimación se seca, es necesario aplicar una segunda capa y colocar el mortero sobre la imprimación pegajosa.

1.3.2.2 MORTERO DE POLIURETANO

Los poliuretanos una vez endurecidos pueden formar productos rígidos o flexibles y normalmente se emplean en revestimientos protectores debido a sus buenas características y su gran adhesividad con el hormigón. Forman buenas barreras anticarbonatación y son muy durables.

Una de las ventajas sobre las resinas epoxi es que pueden curar a temperaturas inferiores a los 0 °C.

1.3.2.3 MORTERO DE POLIÉSTER

Estas resinas pueden mezclarse con filler calizo, silíceo, cemento portland o con árido fino para formar morteros que poseen una buena adherencia con el hormigón, impermeabilidad y unas características mecánicas y de resistencia a los agentes químicos muy buenas. Presentan el inconveniente de desarrollar la mayor parte de su exotermicidad cuando han solidificado, con lo cual se produce al enfriarse una contracción térmica muy importante que puede hacer peligrar la adhesión con el hormigón. A esta retracción hay que sumar la que se produce durante la polimerización [Fernández, M.; 1994].

1.3.3 MATERIALES DE BASE MIXTA

Desde la década de 1950 se conoce que determinados polímeros pueden ser añadidos al agua de amasado del hormigón proporcionando propiedades adicionales sin modificar su carácter alcalino y, por tanto, pasivante del acero. Estos polímeros se presentan en forma líquida como dispersores de partículas muy finas en agua (látex). Cuando el agua desaparece, se suma su efecto ligante con el del cemento resultando una matriz mucho más compacta e impermeable. El mortero que se obtiene presenta un módulo de elasticidad longitudinal y un coeficiente de dilatación térmica similar al de un mortero hidráulico sin modificar.

Los polímeros actúan como fluidificante, permitiendo reducir la relación agua -

cemento (sin que su trabajabilidad se vea afectada), las deformaciones y la microfisuración interna por retracción. Los polímeros, incorporados a la matriz de cemento, se infiltran en las microfisuras, actuando como flejes elásticos que cosen los labios de las juntas, incrementando de esta forma la resistencia a tracción y a flexión respecto de los morteros tradicionales y obteniendo una mayor permeabilidad al agua y al dióxido de carbono [Valcuende, M. O.; 1994].

Los materiales que se consideran dentro de esta categoría se pueden dividir en dos grandes grupos:

- Asociación de polímeros termoestables con cementos portland. Aventajan a los morteros con polímeros termoestables en su mayor adherencia sobre soporte húmedo.
- Asociación de cementos portland con polímeros termoplásticos, presentados, normalmente en forma de emulsión látex.

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

- Altas resistencias a compresión (asociación con polímeros termoendurecibles).
- Mejora de las resistencias a tracción y a flexión (asociación con polímeros termoplásticos).
- Reducción de la permeabilidad (asociación con polímeros termoplásticos).
- Mejora de la adherencia con la superficie a reparar (asociación con polímeros termoendurecibles y polímeros termoplásticos).
- No modificación del módulo de elasticidad longitudinal ni del coeficiente de dilatación térmica (asociación con polímeros termoplásticos).
- No modificación del tiempo de trabajabilidad.

La puesta en obra no requiere una tecnología especial pero si algunas precauciones, como, por ejemplo, evitar que se produzca espuma durante el amasado, que podría dar lugar a un contenido excesivo de aire incorporado. Se debe emplear la mínima cantidad de agua de amasado necesaria para obtener la consistencia deseada. El amasado debe ser enérgico pero evitando una compactación excesiva que podría dar lugar a una exudación indeseada. Durante el curado se debe mantener una humedad alta durante un tiempo variable que suele oscilar entre 1 y 3 días,

también se pueden utilizar membranas de curado [GEHO; 1989].

1.4 ANTECEDENTES

De los trabajos de investigación llevados a cabo por diversos autores, relacionados con morteros de reparación en elementos de hormigón, se han seleccionado algunos de ellos por ser los que más se ajustan a los objetivos planteados en este trabajo. A continuación se resumen los resultados experimentales más relevantes:

Hassan, K.E., et al. (2001) desarrollaron un proyecto de investigación que se llevó a cabo en la Universidad de Leeds. Estudiaron la compatibilidad de cinco morteros de reparación con el hormigón. Para ello se han analizado los módulos de elasticidad y la retracción. Se han estudiado los siguientes morteros de reparación:

- Mortero de cemento Portland tradicional con una relación agua/cemento de 0,33.
- Mortero de cemento Portland con 30% cenizas volantes.
- Mortero de cemento Portland con 10% humo de sílice.
- Mortero modificado con polímeros.
- Mortero de resina epoxi.

Se prepararon probetas cilíndricas mixtas elaboradas con mortero de reparación y hormigón en un 50% y se ensayaron a compresión (**Figura 7**).

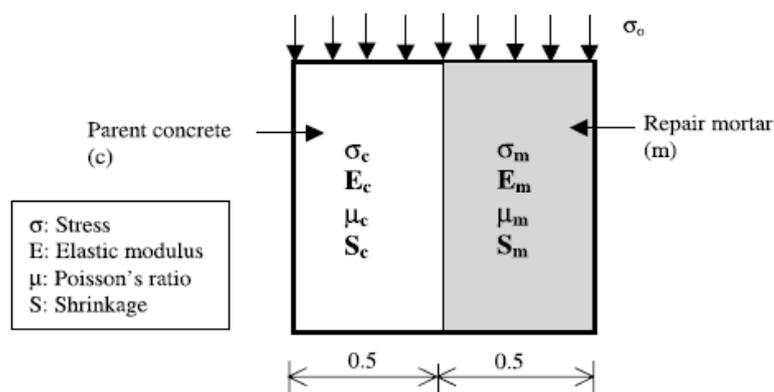


Figura 7 Tensiones y deformaciones de la probeta mixta [HASSAN, K.E., et al.; 2001].

Asimismo, se reparó una estructura deteriorada cuya capacidad de servicio era importante, adoptando la solución más rentable mediante parches de reparación. Se eliminaron las partes deterioradas y se repusieron con un mortero de reparación (**Figura 8**). La efectividad de este método reside en:

- Las propiedades intrínsecas del mortero de reparación elegido, que eliminó la causa inicial del deterioro.
- El nivel de contaminación de cloruros en el hormigón adyacente a la zona reparada.
- La compatibilidad del sistema mixto (hormigón / mortero de reparación).

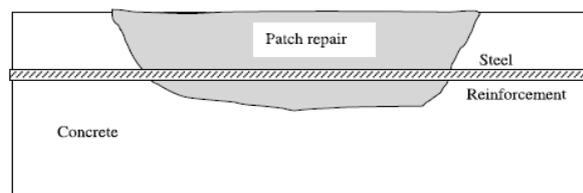


Figura 8 Diagrama esquemático de la pieza reparada [HASSAN, K.E., et al.; 2001].

El análisis de los resultados obtenidos llevó a una serie de conclusiones interesantes, entre las que destacan:

- El mortero epoxy, a pesar de sus excelentes propiedades, no resulta compatible con el hormigón. Esto es debido principalmente a la gran diferencia existente entre los módulos de elasticidad de ambos. Por lo tanto, el empleo del mortero epoxy junto al hormigón reduce la capacidad de carga del conjunto.
- Los morteros de reparación de cemento Portland tradicional presentan mayor retracción que los demás morteros de reparación, especialmente cuando se exponen a ambientes secos y calurosos. Esto aumenta indirectamente la permeabilidad en la interfase de las probetas mixtas, afectando a su compatibilidad con el hormigón.
- El rendimiento más adecuado se obtiene con el mortero de reparación modificado con polímeros (PMC), el cual presenta las propiedades más adecuadas en cuanto a estabilidad dimensional con el hormigón. Esto se debe a que posee un módulo de elasticidad similar al del hormigón y a la reducida retracción.

Delibes, A., Fernández, J. (1993) desarrollaron en el Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC) otra de las investigaciones que destacan en el ámbito de los morteros de reparación. Los autores estudiaron el comportamiento de pilares dañados parcialmente por corrosión de sus armaduras y reparados con morteros distintos, frente al elemento original sin dañar. La corrosión se forzó haciendo pasar una corriente eléctrica de 200 mA /s, durante 48 días.

Los elementos deteriorados se repararon eliminando mediante un martillo eléctrico el hormigón fisurado y delaminado hasta una profundidad en que las armaduras quedaban descubiertas. Los productos de corrosión de las armaduras se eliminaron mediante chorreado de arena a presión.

Se usaron dos materiales de reparación:

- Mortero de cemento Portland y arena con una relación agua/cemento de 0,66.
- Microhormigón de libre fluencia, con polímeros.

Este sistema exigía que las armaduras estuvieran previamente protegidas de la corrosión. Para ello se aplicaron dos capas de imprimación a las barras, con un producto inhibidor de la corrosión.

En la **tabla 4** se muestran las características mecánicas de ambos materiales, obtenidas en probeta prismática de 10 x 20 y a la edad de 28 días.

Material de reparación	Resistencia a compresión (N/mm ²)	Resistencia a tracción indirecta (N/mm ²)	Módulo de elasticidad longitudinal (N/mm ²)
Mortero de cemento y arena	28,2	3,4	22380
	22,8	2,7	22320
Microhormigón	45,3	5,3	31587,5
	48,8	5,0	30810

Tabla 4 Características mecánicas de los materiales de reparación.

Para el hormigón de los pilares se obtuvo a los 143 días una resistencia a compresión de unos 334 Kp/cm² y un módulo de elasticidad longitudinal de 33170 N/mm².

Se sometieron a compresión hasta rotura dos pilares sin dañar (sus resultados sirven como patrón de referencia), dos pilares dañados sin reparar y dos pilares

dañados y reparados, uno con cada procedimiento. En la **tabla 5** se muestran los resultados obtenidos.

Pilares	Carga de rotura (KN)	% sobre pilares patrón	Deformación última (%)
Patrón	305,9	100	2,6
Corroídos y no reparados	298,4	98	2,6
Reparado con mortero	281,4	92	2,6
Reparado con microhormigón	283,2	93	2,2

Tabla 5 Resultados obtenidos en los ensayos de compresión de pilares.

Las conclusiones obtenidas en esta investigación, indican principalmente:

- La mayor parte de los estudios realizados sobre reparación de estructuras dañadas por corrosión, buscan prevenir la corrosión futura. En esa línea se especifica el método que se debe emplear y los productos de reparación utilizados.
- La retracción diferencial del material de reparación con respecto al base y el diferente valor del módulo de elasticidad (el inicial y su evolución) condicionan el comportamiento frente a estados límites últimos de las piezas reparadas.
- Al reparar es muy difícil asegurar la carga última de las piezas originales. Pues los pilares reparados rompen para cargas menores a las de los pilares patrón e incluso para cargas menores a las correspondientes a pilares dañados y no reparados.
- Hay que establecer limitaciones en cuanto a la profundidad del hormigón eliminado y extensión de la reparación para poder garantizar el comportamiento de la pieza en servicio y rotura.

Cabrera, J.G., Al-Hasan A.S. (1997) han ensayado los siguientes materiales de reparación para obtener los valores de propiedades relacionadas con la eficacia de la reparación:

- Material de reparación de base cementicia con aditivos (MRCA).
- Material de reparación cementicia Modificado con polímeros (MRCP).
- Material de reparación de base cementicia con inhibidores de corrosión (MRCI).
- Material de reparación de base cementicia con cenizas (MRCC).

Los resultados se han comparado con los obtenidos por un mortero de cemento portland normal (MCP), que sirve como referencia de comparación.

Se ha estudiado la evolución de la resistencia a compresión hasta la edad de un año. Las mayores resistencias a compresión se obtienen con el MRCA a cualquier edad. El resto de materiales de reparación y el material de referencia muestra una evolución en sus resistencias muy semejante. La tensión de rotura del MRCA es un 30% superior a la del resto. A los tres días con el MRCA se consigue una tensión de rotura de 50 MPa, el resto de materiales necesitan un año para alcanzar esta tensión.

En cuanto a la resistencia a la adherencia, en la **tabla 6** se muestra la media obtenida con tres valores para cada material a la edad de 28 días y con dos condiciones de curado.

Material	Condición de curado					
	20 °C / 65% HR			35 °C / 45% HR		
	Tensión adherencia (MPa)	Superficie de fallo	Módulo de elasticidad (GPa)	Tensión adherencia (MPa)	Superficie de fallo	Módulo de elasticidad (GPa)
MCP	13,8	MCP	35,88	12,5	MCP	35,30
MRCA	14,2	MCP-MRCA	30,36	13,3	MCP-MRCA	32,88
MRCP	15,8	MRCP	36,15	15,5	MRCP	36,02
MRCI	20,1	Interfase	28,87	15,9	Interfase	27,40
MRCC	10,7	Interfase	18,83	10,0	Interfase	20,10

Tabla 6 Resultados obtenidos de los materiales de reparación.

Cuando existen diferencias significativas entre el módulo de elasticidad del material de reparación y el módulo de elasticidad del material de la estructura, se produce una deformación diferente en los materiales a cada lado de la interfase provocando una acumulación de tensiones que agota la resistencia a la adherencia.

En cuanto a la porosidad, los MRCA dan los valores más bajos de porosidad total, un 23% menor que la porosidad de un MCP a la edad de un año. Los MRCC dan los valores más altos de porosidad total, un 18% mayor que la de un MCP de nuevo a la edad de un año. Los MRCC dan un 16% menos de porosidad al año que los MCP. El valor de la porosidad de los MRCC depende en buena medida de las condiciones del curado.

La permeabilidad al aire decrece con el tiempo en todos los materiales, como resultado de los procesos de hidratación de la pasta. Los MRCA muestran los valores más altos a edades tempranas, pero los más bajos a la edad de 90 días. Los MRCC y MRCP ofrecen menores permeabilidades que los MCP. Los MRCC dan los mayores valores de permeabilidad al aire.

Los MRCP muestran los mayores valores de permeabilidad al agua frente a los MRCC y MRCC que dan los menores. La permeabilidad al agua de los MRCA es ligeramente menor que la de los MCP.

Los resultados anteriores indican que el empleo de la resistencia a compresión como único parámetro para garantizar la calidad de un material de reparación, no es recomendable. Es necesario especificar otras propiedades como la porosidad y la permeabilidad que indican la resistencia a la penetración de agresivos después de la reparación. Sin embargo, tal como otras experiencias han mostrado, la porosidad y la permeabilidad se pueden relacionar con la resistencia. En cualquier caso, una buena correlación entre porosidad o permeabilidad y resistencia a compresión sólo puede darse para un tipo de mortero determinado, al cambiar el material de reparación, también cambia la expresión numérica de la correlación.

Nounu, G., Chaudhary, Z. (1999) estudiaron la capacidad para restaurar la integridad estructural de los elementos reparados y la protección ofrecida por el material de reparación frente a la entrada de nuevos agentes agresivos.

Para ello se sometieron 18 vigas a una corrosión acelerada en un ambiente contaminado por cloruros. Posteriormente se repararon con dos sistemas, un mortero de cemento portland y un microhormigón de libre fluencia.

Doce vigas se ensayaron después de curar los materiales de reparación, las otras seis se sometieron a riegos con agentes agresivos durante seis meses después, durante los cuales se realizaron medidas electroquímicas de corrosión de armaduras.

Los resultados de los ensayos estructurales mostraron que a corto plazo el comportamiento de las vigas reparadas con los dos sistemas fue muy similar, restaurando aproximadamente el 70% de la capacidad de las vigas originales. Pero a largo plazo, las vigas reparadas con mortero de cemento sólo restauran el 50% de la capacidad inicial, frente al 90% de las vigas reparadas con micro hormigón. En las vigas reparadas con mortero de cemento, el fallo se produce por falta de adherencia.

Los ensayos electroquímicos mostraron que la reparación con microhormigón ofrece una mayor protección contra la corrosión que la reparación con mortero de cemento.

Mirzaa, J., et al. (2002) estudiaron el comportamiento de morteros de reparación de cemento modificados con polímeros para la reparación de estructuras de hormigón hasta una profundidad de 75 mm. Para ello, emplearon 25 productos, de los cuales seleccionaron 7 que contenían estireno butadieno (SBR) y 18 acrílicos. Se empleó como referencia el mortero de cemento tradicional. Posteriormente seleccionaron 3 de ellos para reparar presas de hormigón que presentaban daños debidos a la exposición a climas fríos.

Se hicieron pruebas de compatibilidad térmica, retracción por secado, permeabilidad, resistencia a la abrasión, resistencia a compresión y pruebas cíclicas de congelación y descongelación. Los resultados de este estudio llevaron a las siguientes conclusiones:

- La mayoría de los morteros de reparación modificados con polímeros mostraron mayor resistencia a la compresión y a a la abrasión, así como una menor permeabilidad que el mortero de cemento de referencia.
- Los tres morteros de reparación seleccionados para reparar presas, tuvieron un mejor comportamiento en la práctica que en laboratorio. El mortero de cemento de referencia no dio buen resultado en todas las pruebas y en general, no se recomienda su uso.
- Se debe prestar atención al mortero que contiene estireno butadieno (SBR) debido a su difícil trabajabilidad y a los daños que produce en la superficie del hormigón, agrietándolo.

- Además, en general, los morteros de reparación mostraron un mejor rendimiento en condiciones de curado húmedas que en condiciones secas, dando lugar éstas últimas a una retracción mayor.

Chin-TSung, L., Jong-Shing H. (2008) estudiaron el mortero fluido altamente reactivo en polvo como material de reparación alternativo a las resinas epoxi. La viabilidad de su utilización ha sido evaluada a través del comportamiento de probetas con un corte diagonal, alargamiento de barras de acero embebidas en probetas de hormigón reparadas con morteros y pruebas de resistencia a tracción.

Elaboraron probetas cilíndricas con un corte inclinado y rellenaron la interfase con un mortero fluido altamente reactivo en polvo (RPM) de resistencia a compresión 75 Mpa. Además, las compararon con otras probetas reparadas utilizando resina epoxi. Se estudió la tensión de adhesión en la interfase entre el material de reparación y el hormigón, a partir de ensayos de rotura inclinada.

A continuación, se introdujeron barras de acero en las probetas cilíndricas y se realizaron pruebas de alargamiento de las barras de acero. Se compararon los resultados de las probetas reparadas con los dos materiales. Se comprobó que la fuerza de alargamiento de las barras y la rotura de las probetas cilíndricas reparadas con RPM se vieron afectadas significativamente por la sección transversal de los redondos utilizados.

También, se realizaron ensayos de resistencia a tracción en probetas cilíndricas de 20x10 cm y \varnothing 10 cm. Se hicieron previamente cuatro muescas de 3 mm de anchura y diferentes profundidades; 1, 3, 5 y 7 cm, reparadas utilizando RPM o resina epoxi.



Figuras 9 y 10 Probetas cilíndricas de corte inclinado. Sin y con una capa de mortero de reparación RPM.

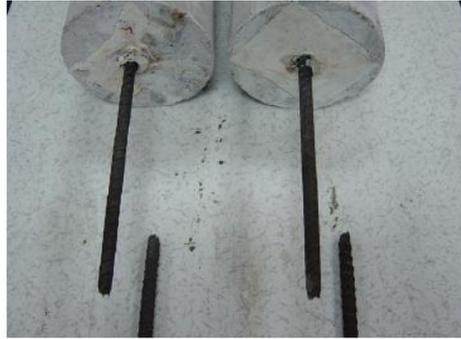
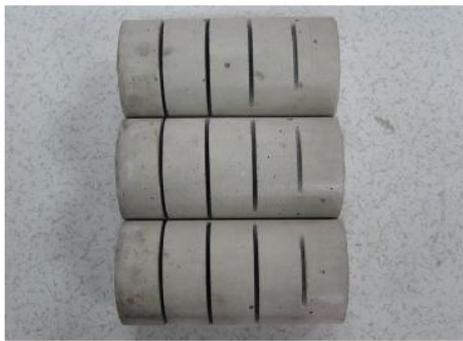


Figura 11 Probetas cilíndricas con barras de acero embutidas en el interior



Figuras 12 y 13 Probetas cilíndricas con cuatro muescas. Ensayo de resistencia a tracción [CHIN-TSUNG, L., JONG-SHING H.; 2008].

Los resultados experimentales indicaron que:

- La tensión de rotura inclinada de probetas cilíndricas reparadas utilizando RPM era tan alta como las reparadas con resina epoxi.
- La alta fluidez del RPM ofreció una mayor fuerza de alargamiento de las barras y mayor resistencia a tracción en probetas cilíndricas frente a la resina epoxi. Asimismo, la fuerza de alargamiento de las barras y el correspondiente modo de rotura de las probetas cilíndricas de hormigón reparadas con RPM es proporcional a la sección transversal de las barras.
- Además, la resistencia a tracción de las probetas cilíndricas con cuatro muescas reparadas con RPM es superior a la obtenida con resina epoxi.
- Como conclusión se obtiene que el mortero fluido RPM es un material de reparación adecuado para ser utilizado en estructuras de hormigón.

BURAK Felekoglu, et al. (2007) estudiaron los efectos de la fibra de acero de refuerzo para mejorar la resistencia al desgaste superficial de los morteros de reparación autocompactante.

En primer lugar, estudiaron la dosificación óptima con mezcla de fibras de acero para obtener morteros de reparación estables.

En segundo lugar, incorporaron la mayor adición posible de fibras. En ambos casos observaron el comportamiento mecánico y la resistencia a la abrasión de los morteros de reparación.

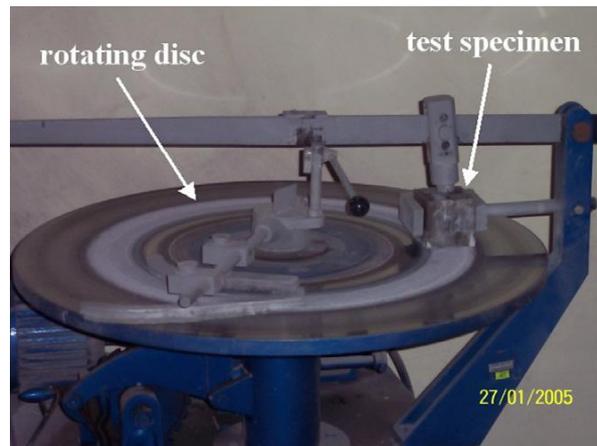


Fig 14 Máquina de ensayo para realizar la prueba de resistencia al desgaste superficial.

[BURAK Felekoglu, et al. 2007].

Las conclusiones extraídas fueron:

- El mortero autocompactante es susceptible a la abrasión de la superficie, debido al alto contenido de polvo y a la ausencia de árido grueso.
- La mayor ventaja de incorporar fibra de acero es la mejora de la resistencia a la abrasión frente a los morteros tradicionales. La cantidad de fibra de refuerzo óptima debe ser predeterminada. En cambio, se produce una pérdida de trabajabilidad.
- En general, la incorporación de fibras de acero disminuye la trabajabilidad de los morteros. Esta situación aumenta el volumen de aire atrapado en el mortero, lo que produce pérdidas de resistencia y reducción de la vida de servicio del material. Sin embargo, se pueden obtener mejores resultados aumentando la dosificación de plastificante.

- La dosificación óptima de fibra y superplastificante que se le da a la pasta puede tener mejores efectos físicos y mecánicos manteniendo adecuadas las propiedades de fluidez del mortero. Mejorando así la trabajabilidad y la autocompactación del mortero.

MEDEIROS M.H.F., et al. (2009) llevaron a cabo una investigación acerca de la influencia de la incorporación del copolímero acetato vinilo etileno de copolímero (EVA) y los polímeros de acrilato, en la dosificación de un mortero de reparación. Analizaron los comportamientos mecánicos de flexión, compresión y rotura directa.

Su principal interés era proporcionar alguna mezcla de producto en los morteros de reparación que evitase la formación de grietas en la interfase entre el mortero de reparación y el hormigón antiguo.

De acuerdo con la Norma EN 196/90, se realizó el ensayo de rotura a flexión utilizando probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm. (**figura 15**).

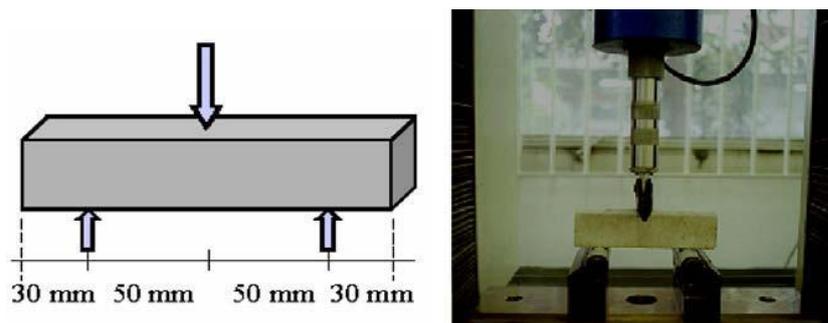


Fig. 15 Ensayo a flexión de probetas prismáticas.

A continuación, tras romper las probetas en dos partes, se sometió cada una de ellas al ensayo de rotura a compresión, poniendo las caras lisas de la probeta en contacto con la máquina de ensayo.

También se realizó el ensayo de cizalladura o rotura directa para analizar la adherencia entre el hormigón y el mortero de reparación. Lo habitual en la práctica, son roturas en la interfase debido al alto grado de retracción que actúa sobre la parte reparada.

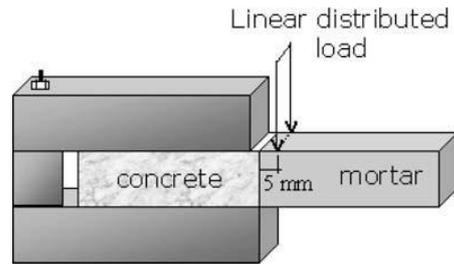


Fig 16 Ensayo de cizalladura.

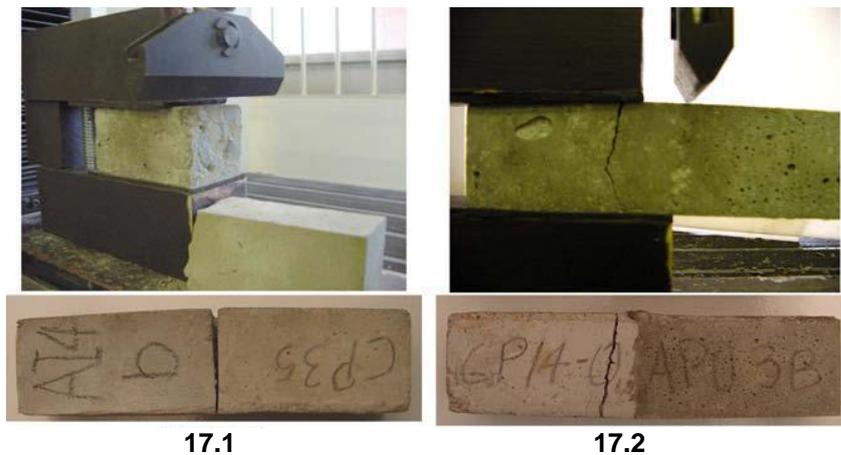


Fig 17 Formas de rotura en el ensayo de cizalladura. **17.1** Rotura en la interfase. **17.2** Rotura del hormigón.

Puesto que los morteros tienen un alto módulo de elasticidad, los esfuerzos mecánicos tienden a ser transferidos a la interfase. Por esta razón, la ruptura de la probeta puede ocurrir en o muy cerca de la interfase durante el ensayo (**figura 17**). En cambio, la fuerza de adhesión de la interfase, queda reducida cuando se incorporan polímeros en el mortero de reparación.

Se han extraído las siguientes conclusiones de este estudio:

- La efectividad de estos morteros de reparación modificados con polímeros, se demuestra cuando la rotura se produce en el hormigón y no en la interfase, como viene ocurriendo en la mayoría de casos.
- La incorporación de polímeros ha tenido una mayor influencia en la resistencia a flexión y cizalladura que en la resistencia a compresión.
- La incorporación de polímeros en el mortero de reparación, reduce las condiciones críticas de endurecimiento que nunca se deben dar en

situaciones prácticas.

- Las principales aportaciones ofrecidas por los polímeros aquí estudiados, son el aumento de las resistencias mecánicas y la reducción de la retracción durante el curado del mortero.

De todos los trabajos anteriores, ninguno ha estudiado probetas mixtas centrándose en sólo dos tipos de morteros de reparación: de cemento tradicional y de base orgánica, para comprobar que ambos morteros de reparación son igualmente válidos en los aspectos de características mecánicas y parámetros de ductilidad. Así como tampoco analizan la fisuración de piezas estructurales antes y después de someterse a reparación. Por lo tanto, con este trabajo se pretenden cubrir estos aspectos que otros investigadores no han estudiado en sus trabajos.

Capítulo 2

TRABAJO EXPERIMENTAL A REALIZAR

2.1 INTRODUCCIÓN

Para poder evaluar el comportamiento de los materiales de reparación en estructuras de hormigón, se van a elaborar probetas mixtas de hormigón con diferentes porcentajes de morteros de reparación. Utilizando para ello dos tipologías; de cemento tradicional y de base orgánica. A continuación se van a reparar cuatro vigas de hormigón, comparando los resultados con los ensayos previos de las vigas originales sin reparar.

El trabajo se va a realizar estudiando el comportamiento mecánico a dos niveles:

- Secciones mixtas en probetas cúbicas de 10 x 10 x 10 cm.
- Piezas estructurales de 10 x 15 x 120 cm.

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 10x15 cm 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.

2.2 MATERIALES A UTILIZAR

2.2.1 HORMIGÓN

El hormigón se ha fabricado de una sola vez con una dosificación: $A/c=0,54$; $ar/c=2,08$; $ari/c=3,61$, correspondiente a la clase resistente H-25 para estructuras ejecutadas "in situ". Durante la elaboración del mismo se ha hecho un examen visual y podía apreciarse que su consistencia era plástica.



Figura 18 Amasadora planetaria utilizada en la fabricación del hormigón.

En la obtención de este tipo de hormigón se han utilizado los componentes que se indican a continuación (**figura 20**):

- Arena de río de naturaleza silíceas. (Fracción 0-4 mm).
- Grava, de canto rodado de tamaño máximo, $TM=10$ (hormigón H-25)
- Cemento Pórtland de tipo CEM II AL 42.5.
- Agua (potable).

Tanto la arena como la grava empleadas son áridos de origen natural.

La grava ha sido sometida a un análisis granulométrico previo, utilizando la serie de tamices 0.063-5-8-10-12.5-16 mm. Así, he utilizado únicamente la grava retenida en los tamices 5 y 8 respectivamente, logrando un tamaño máximo de árido de 10 mm (figura 19).



Figura 19 Tamizadora convencional, con torre de tamices IB-40-000E.

A la arena se le han quitado los finos, considerando por tales, los que pasan por el tamiz 0.063 mm.

Se ha utilizado un tipo de cemento común 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 en el Artículo 27º.



Figura 20 Componentes del hormigón.-Grava, arena, cemento y agua.-

El amasado se realizó mezclando primero 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. Se ha utilizado una hormigonera planetaria (**figura 18**).

Las proporciones de los componentes utilizados se detallan en la **Tabla 7**. El hormigón resultante tiene una relación agua-cemento (a/c) igual a 0,5.

COMPONENTE	RELACIÓN	DOSIFICACIÓN (kg)
Cemento		4,05
Agua	A/c=0,54	2,2
Arena	ar/c=2,084	8,44
Grava	ari/c=3,61	14,62

Tabla 7 Cantidades por metro cúbico de hormigón para cada componente empleado en la fabricación del hormigón H-25.

Se fueron relleno las 15 probetas cúbicas de 10 x 10 cm para determinar la resistencia a flexión y compresión.

En primer lugar se han relleno las probetas a 1, 1/3, 1/2 y 2/3 de la capacidad total¹ de los moldes y se ha picado con barra (**figuras 21 y 22**).



Figura 21 Relleno de los moldes las proporciones señaladas.

¹ En una primera fase se rellenan de hormigón los moldes hasta las proporciones fijadas de H, H1-3; H1-2 y H2-3.



Figura 22 Picado con barra del hormigón, por tongadas.

A continuación las probetas se han desmoldado tras 24 horas de su fabricación (**figura 23**). El curado se realizó en cámara húmeda (21°C y 95% de humedad relativa) durante 9 días (**figura 24**), momento en el que se ha iniciado la fabricación del mortero de reparación para terminar de rellenar los moldes.



Figura 23 Desmoldado de probetas.
hormigón



Figura 24 Curado de las probetas de
en cámara húmeda.

2.2.2 MORTERO DE REPARACIÓN

Se han empleado dos tipos de morteros de reparación: un mortero de base orgánica y otro de cemento tradicional para aportar la suficiente variabilidad a la experimentación.

2.2.2.1 MORTERO DE REPARACIÓN DE BASE ORGÁNICA

Tras el vertido del hormigón en una primera fase, a los 9 días se terminó de rellenar las 15 probetas cúbicas de 10 x 10 cm, 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 que quede aire ocluido.



Figura 25 Relleno total de las probetas con mortero de reparación.

A continuación las probetas se han desmoldado tras 24 horas de su fabricación (**figura 23**). El curado se realizó en cámara húmeda (21°C y 95% de humedad relativa) durante 28 días.

El mortero de reparación de base orgánica está especialmente indicado para reparaciones estructurales del hormigón y ha sido suministrado por Drizoro S.A. En la **Tabla 9** se indican los datos técnicos del mismo según el fabricante.

Se trata de un mortero monocomponente sin retracción formulado en base de cemento y productos minerales, modificado con polímeros e inhibidores de corrosión. Posee altas resistencias mecánicas y gran adherencia, con excelente fluidez y está exento de cloruros y agregados metálicos. Se presenta en polvo y listo para su empleo al añadirle agua.

Para reparaciones o rellenos con volúmenes mayores de aproximadamente 0,1 m³ o espesores superiores a 4 cm, se prepara un micro-hormigón añadiendo 8 Kg de áridos rodados y limpios con granulometría continua de 3 a 5 mm, por cada 25 Kg de producto y el conjunto se amasa con entre 2,75 y 3 l. de agua, obteniendo así un volumen de 17 a 18 l. en función de la cantidad de agua empleada.

El mortero de reparación se ha fabricado con una relación agua – cemento (a/c) = 0,12 y de árido – cemento (ár/c) = 0,32. Las proporciones de los componentes utilizados se detallan en la **Tabla 8**.

	Cemento (Kg)	Agua/Cemento	Arena (Kg)	Grava (Kg)	Dimensiones (cm)
Amasada Hormigón	4,05	0,54	8,44	14,62	10 x 10
Amasada Mortero Reparación	13,23	0,12	4,23	-	

Tabla 8 Dosificación de componentes de las probetas y designación.

La temperatura ideal de aplicación está entre 10 y 25°C. No debiéndose aplicar con temperaturas del soporte o ambientales por debajo de 5°C.

Terminada la aplicación, las probetas se han desmoldado pasadas 24 horas. El curado se ha realizado en la cámara húmeda del Laboratorio de Materiales de Construcción de la EUATM (a 21°C y 95% de humedad relativa) esta vez durante 7 días, momento en el que se ha iniciado la rotura.

Características del producto en polvo	
Aspecto y color	Polvo gris
Granulometría (mm)	0-2
Densidad aparente en polvo (g/cm ³)	1,25
Condiciones de aplicación y curado	
Agua de amasado (% en peso)	12-14
Segregación en fresco	Nula
Fluencia en mesa de sacudidas (mm)	135
Características del producto curado	
Densidad endurecido (g/cm ³)	2,10-2,20
Resistencia a compresión (MPa)	Amasado con 12%
24 horas	43,1
7 días	55,0
28 días	60,1
Resistencia a flexotracción (MPa)	
24 horas	6,7
7 días	10,0
28 días	10,5
Adherencia sobre hormigón (MPa)	>3
Adherencia sobre las armaduras (MPa)	>3
Expansión (%)	0,05
Módulo de elasticidad (MPa)	3*10 ⁴

Tabla 9 Tabla de datos técnicos del mortero de reparación de base orgánica [Drizoro].

En la **figura 26** se representa un esquema de las probetas mixtas elaboradas con distinto porcentaje de hormigón-mortero de reparación analizadas en este trabajo, donde el color gris representa el hormigón y el color rojo es el mortero de reparación.

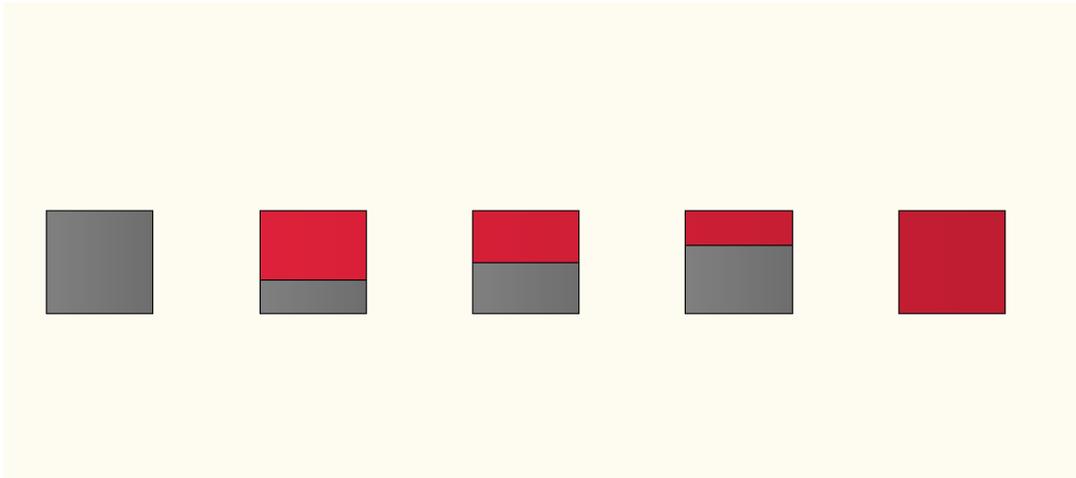


Figura 26 Croquis de las probetas en sección²

2.2.2.2 MORTERO DE REPARACIÓN DE CEMENTO TRADICIONAL

El mortero de cemento tradicional se ha elaborado en el Laboratorio de Materiales de Construcción Félix Orús de la EUATM. El mortero tiene una dosificación: 1:3:0,5 de 42,5 N/mm².



Figura 27 Materiales: cemento, arena y agua

² **Descripción de las abreviaturas:** **H:** Probeta 100% de Hormigón; **H1-3:** Probeta mixta formada por 1/3 de Hormigón y la diferencia de mortero de reparación; **H1-2:** Probeta mixta formada por 1/2 de Hormigón y el resto de mortero de reparación; **H2-3:** Probeta mixta formada por 2/3 de Hormigón y el resto de mortero de reparación; **M:** Probeta 100% de mortero de reparación.

El cemento empleado ha sido suministrado por cementos portland Valderrivas S.A. (Morata de Tajuña, Madrid). Es designado como CEM II/A-L 42,5 R. Las características de este cemento son las que se indican en la **tabla 10**.

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)

Tabla 10 Características del cemento utilizado y denominación utilizada

Para la elaboración del mortero de reparación de cemento tradicional, se han eliminado los finos de la arena, haciendo pasar a la misma por el tamiz 0.063 mm.

Tras el vertido del hormigón en una primera fase, a los 7 días se terminó de rellenar esta vez con mortero de reparación, otras 15 probetas cúbicas de 10 x 10 cm, vertiendo de forma continua.

Los pasos llevados a cabo en la elaboración del mortero de cemento son idénticos a los descritos anteriormente en los morteros de reparación de base orgánica.

Además, se han elaborado dos probetas cilíndricas de mortero de reparación de cemento tradicional (**figura 28**).



Figura 28 Probetas cilíndricas de mortero de reparación de cemento tradicional

2.3 TRABAJO EXPERIMENTAL A REALIZAR

2.3.1 ESTUDIO DE SECCIONES EN PROBETAS CÚBICAS

2.3.1.1 PRUEBA DE ULTRASONIDOS

Es un método no destructivo que mediante la determinación de la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos permite realizar un estudio rápido sobre la calidad y durabilidad de los materiales de las probetas sin necesidad de dañarlas. Localizando defectos como fisuras o coqueas del elemento.

La superficie del hormigón debe ser lisa para proporcionar un adecuado acoplamiento entre la probeta y la cara del palpador y se ha usado un medio de acoplamiento (glicerina). Se han presionado los palpadores contra la superficie de la probeta realizando lecturas de velocidad de recorrido hasta obtener el valor mínimo, lo que significa que el espesor del elemento de acoplamiento se ha reducido al mínimo.

Se han tomado dos medidas en las probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación de base orgánica; con la posición de los transductores en caras opuestas de la probeta, tanto en el centro de la interfase como en la parte central del hormigón, así como también se ha tomado una medida en el centro de la probetas de un sólo material. El procedimiento seguido es el descrito en la Norma UNE-EN 125044.

Para efectuar las medidas de velocidad de paso de ondas ultrasónicas se empleó un equipo PUNDIT (**figura 29**) con frecuencias de emisión de ondas elásticas de compresión, que constituye el haz ultrasónico longitudinal, comprendidas entre 24 y 200 KHz aunque en el caso de este trabajo experimental, a una dimensión de 100 mm (dimensión lateral de las probetas de ensayo) corresponde una frecuencia de 54 KHz, que es la utilizada en este ensayo.

El aparato consiste en un generador de impulsos eléctricos, un par de palpadores, un amplificador para la medida del intervalo de tiempo transcurrido entre el comienzo de la onda del impulso generado en el palpador transmisor y el comienzo de la onda a su llegada al palpador receptor. Dispone de una barra de calibración para calibrar el aparato antes de comenzar, si es necesario.



Figura 29 Equipo utilizado en la determinación de la velocidad de impulsos ultrasónicos



Figura 30 Probetas preparadas para la prueba de ultrasonidos y posterior rotura

2.3.1.2 ENSAYOS MECÁNICOS

Inmediatamente después de hacer el análisis de ultrasonidos, se han colocado las probetas en la prensa universal Ibertest MIB-60/AM para su rotura a compresión tanto en serie como en paralelo. De cada tipo de probeta mixta, dos de ellas se ensayaron compresión en paralelo y una a compresión en serie.



Figura 31 Probeta en la prensa universal. Laboratorio de Materiales de Construcción de la EUATM.

Se han empleado quince probetas cúbicas rellenas de hormigón y mortero de reparación de base orgánica, así como quince probetas cúbicas rellenas de hormigón y mortero de reparación de cemento tradicional para el estudio de la resistencia a compresión en serie y en paralelo de dichos elementos.

La **tabla 11** presenta un resumen del estudio realizado la metodología seguida y las variables estudiadas en cada proceso.

ENSAYO MECÁNICO	ESTUDIO	PROBETA	TÉCNICA	MEDICIÓN	VARIABLES ESTUDIADAS
Un material	Resistencia a compresión	Cúbicas 10x10cm.	Máquina de rotura marca Ibertest	Fuerza máxima a compresión	100%
Dos materiales	Resistencia a compresión en serie			Fuerza máxima a compresión en serie	Distintos Porcentajes: 33.3%, 50%, 66.6%
	Resistencia a compresión en paralelo			Fuerza máxima a compresión en paralelo	

Tabla 11 Resumen del proceso experimental

Al mismo tiempo se han sometido a compresión dos probetas cilíndricas de mortero de reparación de base orgánica (**figura 32**).



Figura 32 Probeta en la prensa universal. Laboratorio de Materiales de Construcción de la EUATM.

Los ensayos de compresión se van a realizar en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid, utilizando una máquina de la marca Ibertest, modelo MIB 60/AM (**figura 31**).

2.3.2 ESTUDIO DE PIEZAS ESTRUCTURALES

El trabajo experimental consistirá en analizar el procedimiento de reparación mediante sustitución del hormigón deteriorado en cuatro vigas de hormigón armado de 10x15 cm de sección y 1,20 metros de longitud, armadas longitudinalmente y numeradas de la forma que indica la **Tabla 12**. Para la reparación se han seleccionando los dos morteros de reparación más utilizados: cemento tradicional y de base orgánica.



Figura 33 Vigas armadas con barras de acero de diámetros 8 y 16 mm, antes de la reparación

Ambos se van a comparar entre sí y con las vigas sin reparar, según diferentes diámetros de barra y diferentes tipos de armadura. Las vigas están armadas longitudinalmente con barras corrugadas de acero al carbono B500SD e inoxidable de grado dúplex AISI 2304 (**figuras 34 y 35**).



Figura 34 Armado interior de las vigas



Figura 35 Barras corrugadas de acero B 500-SD e inoxidable dúplex AISI 2304, de diámetros 16 y 8 mm.

Las vigas ensayadas a flexión sin reparar han sido suministradas por el Laboratorio de Materiales de Construcción Félix Orús de la EUATM y los resultados de los ensayos mecánicos de las mismas en un ensayo anterior, han sido facilitados por D. Eduardo Medina Sánchez (profesor titular de la EUATM).

Medina, E. eligió los diámetros nominales de 8 y 16 mm por ser los más representativos de la serie de diámetros comercializada y los más utilizados en las estructuras de hormigón en edificación, y con el fin de detectar posibles variaciones de los resultados debidos al factor que pudiera introducir el diámetro de la barra ensayada.

Además, las barras corrugadas de diámetro 16 mm, de los dos tipos de acero, fueron elaboradas mediante laminado en caliente, mientras que las de diámetro 8 mm, también en los dos tipos de acero, son barras laminadas en frío.

La dosificación del hormigón en peso fué: 1 : 2,667 : 2,583 : 0,55. Concretamente, 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.

En la **figura 33** se muestran las vigas de hormigón sin reparar, armadas con barras de acero al carbono B500SD e inoxidable dúplex AISI 2304 respectivamente.

Las vigas armadas con $\varnothing 8$ rompieron por flexión debido a un alargamiento excesivo de las barras, en cambio las vigas armadas con $\varnothing 16$, fallaron a compresión del hormigón en el tramo central. Se han reparado las vigas en dicho tramo central con

dos tipos de morteros de reparación.

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 $\varnothing 8$, colocados a 45° , elaborados con acero B500SD. Los cercos se dispusieron en los extremos de las vigas, separados 10 cm en las dos vigas armadas con $\varnothing 8$, y 7 cm en las dos vigas armadas con $\varnothing 16$. En la parte central de las vigas no se colocaron cercos por quedar libres de esfuerzo cortante en el ensayo.

El proceso experimental va a consistir en reparar las cuatro vigas de hormigón, para su ensayo de rotura a flexión, de 10x15 cm de sección y 1,20 metros de longitud, elaboradas todas con hormigón fck 25 N/mm².

En la limpieza y saneado de las vigas, se ha retirado la superficie dañada de hormigón localizada en el vano central. Ello se ha realizado mediante puntero y maceta, de tal forma que las vigas presentan una sección con ángulos superiores a 90° para una mayor adherencia del mortero de reparación (**figura 36**).



Figura 36 Limpieza y saneado de las vigas

Antes de obtener los morteros de reparación, se ha humedecido el hormigón del vano central de las vigas para evitar que se produzcan retracciones posteriores. En los laterales de cada viga se ha colocado un encofrado de madera (figura 37) para poder hacer el vertido y picado con barra del mortero de reparación (figura 38).



Figura 37 Encofrado de madera en los 3 laterales de la viga



Figura 38 Picado con barra del mortero de reparación en el vano central de la viga

La reparación de las vigas se ha efectuado empleando dos morteros de reparación (figura 39) y al transcurrir 24 h. se han desmoldado las vigas, procediendo al curado de las mismas.



Figura 39 Vigas armadas con $\varnothing 8$ y $\varnothing 16$ respectivamente y reparadas con morteros de reparación.

En las **figuras 40 y 41**, se representan las vigas una vez desmoldadas.



Figura 40 Reparación realizada con mortero de reparación de base orgánica



Figura 41 Reparación realizada con mortero de cemento tradicional

Terminada la aplicación, las vigas se han mantenido húmedas para su curado durante 28 días, dotando de humedad al mortero de reparación mediante tejidos de fibra que han sido regados de forma constante (**figura 42**).



Figura 42 Humectación de las vigas durante 28 días

El ensayo a flexión hasta la rotura se ha realizado en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid, utilizando la misma máquina de ensayo universal descrita anteriormente, que dispone en su parte superior del mecanismo de compresión.³

3 Descripción de las abreviaturas: **MR**: Mortero de reparación de base orgánica; **MC**: Mortero de reparación de cemento tradicional.

DENOMINACIÓN VIGAS ³	DESIGNACIÓN DEL ACERO	DIÁMETRO NOMINAL ARMADURA LONGITUDINAL (mm)	MORTERO DE REPARACIÓN EMPLEADO	
			MORTERO DE CEMENTO TRADICIONAL	MORTERO DE BASE ORGÁNICA
3	Al carbono B 500 SD	Ø8		
10	Inoxidable AISI 2304	Ø8		
2	Al carbono B 500 SD	Ø16		
5	Inoxidable AISI 2304	Ø16		
3_MC	Al carbono B 500 SD	Ø8	X	
10_MR	Inoxidable AISI 2304	Ø8		X
2_MC	Al carbono B 500 SD	Ø16	X	
5_MR	Inoxidable AISI 2304	Ø16		X

Tabla 12 Aceros, diámetros y tipo de mortero de reparación empleado en las vigas

Tras someter a flexión las vigas, se han comparado las vigas armadas con los dos tipos de acero dentro de la misma cuantía, antes y después de la reparación.

La rotura de vigas a flexión se ha realizado a la edad de 28 días, para poder analizar los resultados con la resistencia real del hormigón (**figura 43**).



Figura 43 Colocación de una de las vigas en la Prensa universal. Laboratorio de Materiales de Construcción de la EUATM.

Para que la carga de la prensa se reparta sobre dos puntos de la viga, se ha interpuesto una estructura auxiliar metálica, como podemos ver en la **figura 44**. Ambos puntos son equidistantes del centro de la viga 16,5 cm, de forma que la viga queda sometida en todo su tramo central a flexión pura, es decir, a momento flector constante y esfuerzo cortante nulo.



Figura 44 Ensayo a flexión de la viga de hormigón nº 3 reparada

En cada viga se ha marcado en toda su longitud con trazos, las fisuras originadas después del ensayo, para poder medir y comparar [%] el ancho y longitud de las fisuras originadas.

Los ensayos de flexión se han realizado en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid, utilizando una máquina de la marca Ibertest, modelo MIB 60/AM (**figura 43**), de 600 kN de capacidad.

Capítulo 3

RESULTADOS OBTENIDOS

3.1 ESTUDIO A NIVEL DE SECCIÓN DE PROBETAS MIXTAS DE HORMIGÓN-MORTERO DE REPARACIÓN

3.1.1 RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE ULTRASONIDOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos del estudio de la determinación de la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos en probetas cúbicas mixtas de 100 mm. El objeto fue detectar los posibles cambios de velocidad de propagación del pulso en las probetas con distintos porcentajes de hormigón – mortero de reparación de base orgánica. La comparación de las medidas de las probetas de un único componente de mortero y hormigón con las realizadas sobre las probetas mixtas permite detectar posibles variaciones.

Por medio del circuito electrónico, se determina el tiempo de tránsito “t” que ha necesitado el impulso para recorrer la distancia “L”. La velocidad de ultrasonidos, viene entonces dada por:

$$v=L/t$$

Las **tablas 13 y 14** muestran los valores de velocidad de propagación de la onda ultrasónica obtenidos (en μs).

La **figura 45** muestra las fotografías de alguna probeta durante las pruebas.



Figura 45 Aparato de ultrasonidos

MEDIDAS	H	H1-3	H1-2	H2-3	M
Medio	23,4	25,4	25	24,6	30,4
Abajo		28	24,8	26	
Medio	23,5	25	24,2	25,2	29,4
Abajo		34,1	26,2	25,5	
Medio	23,5	23,9	26,2	25	30,2
Abajo		27,4	23,5	28	

Tabla 13 Valores de ultrasonidos obtenidos el día del desmolde de las probetas [μs]

MEDIDAS	H	H1-3	H1-2	H2-3	M
Medio	23,5	24,5	24,4	25,5	25,4
Abajo		25,4	24,8	24,4	
Medio	23,5	25,5	24	24	25,7
Abajo		24,3	24	23,7	
Medio	23	24	24,5	24,2	25,7
Abajo		24,2	24,6	24	

Tabla 14 Valores de ultrasonidos obtenidos el día de la rotura de las probetas [μs]

En general, se observan valores muy similares comparando los datos tomados en dos días. Únicamente difieren del resto las probetas realizadas íntegramente de mortero, en las que se puede observar el día del desmolde, un aumento considerable en la velocidad que puede indicarnos la existencia de posibles grietas y coqueas en el mortero de reparación, dado que cuando un impulso ultrasónico se encuentra con huecos intermedios entre los dos palpadores, se obstruye el haz y la onda tarda más tiempo en llegar.

3.1.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A COMPRESIÓN DE UN MATERIAL

En la **Tabla 15** se recogen por un lado los resultados de los ensayos de compresión de las probetas cúbicas de hormigón y por otro, los resultados de las probetas de mortero de reparación, con la siguiente nomenclatura (**figura 46**):

- **f_{cm}** [N/mm²]: Resistencia máxima a compresión a los 28 días.
- **E_{cm}** [N/mm²]: Módulo de deformación longitudinal del hormigón a los 28 días. Es la pendiente de la recta de máxima inclinación en el comienzo del diagrama tensión-deformación.
- **ϵ_{c1} o $\epsilon_{máx}$** [%]: Deformación máxima del hormigón. Corresponde a la tensión de rotura.

- ϵ_{cu1} [%]: Deformación última del hormigón.

Con los valores ϵ_{c1} y ϵ_{cu1} , el cálculo del área máxima $\Omega_{m\acute{a}x}$ y área última Ω_u se ha obtenido analíticamente tras la rotura.

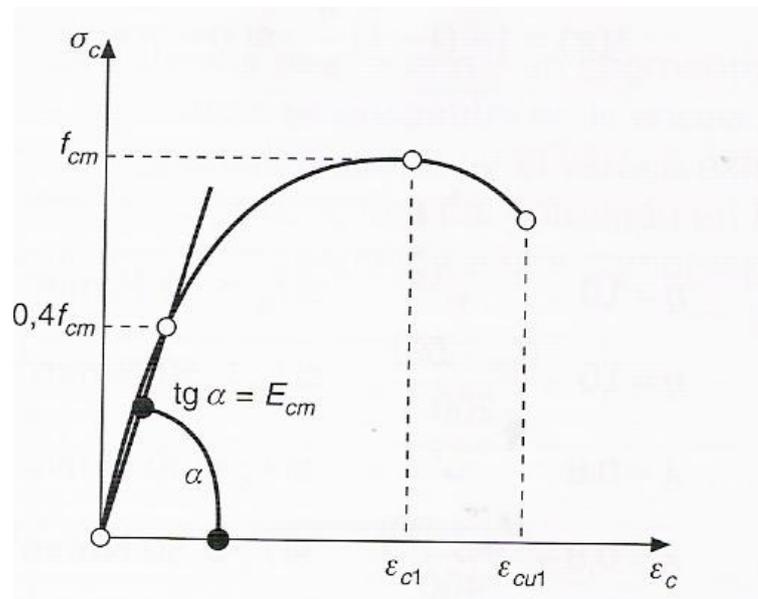


Figura 46 Representación esquemática de la relación tenso-deformacional del hormigón (EHE-08).

La rotura de las probetas a compresión a los 28 días, han dado los siguientes resultados:

Probeta	Q máx. (KN)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ (%)	f_{cm} (N/mm ²)	Emáx. (N/mm ²)	$\Omega_{m\acute{a}x}$ (N/m ²)	Ω_u (N/mm ²)
4						
HD	380,50	0,01211	38,05	3142,60	0,22039	0,27069
HE	384,22	0,01243	38,42	3089,19	0,25936	0,34119
HF	397,28	0,01102	39,73	3603,73	0,23388	0,32246
MG	450,41	0,01422	45,04	3168,19	0,33869	0,40944
MI	448,91	0,01679	44,89	2672,99	0,31669	0,43867
MJ	462,52	0,01634	46,25	2829,84	0,30263	0,40804
MD	337,97	0,01703	33,79	1984,73	0,19951	0,25132
ME	354,66	0,01198	35,46	2959,93	0,22681	0,30010
MF	339,62	0,01695	33,96	2003,79	0,19630	0,26072

Tabla 15 Resultados de los ensayos de compresión de las probetas de hormigón y de los dos morteros de reparación.

4 **Descripción de las abreviaturas:** **HD, HE y HF:** Probetas de Hormigón **MG, MI y MJ:** Probetas de Mortero de reparación de base orgánica; **MD, ME y MF:** Probetas de Mortero de reparación de cemento tradicional.

En la **figura 47** están representadas las curvas tensión-deformación de las tres probetas ensayadas de hormigón. Para estos ensayos se han realizado un total de seis probetas cúbicas de hormigón, de las cuales tres de ellas se han descartado por obtenerse resultados incorrectos y poco trabajables. En este trabajo se hace referencia exclusivamente a las probetas de hormigón que dieron los resultados oportunos. Se puede comprobar el notable módulo de deformabilidad alcanzado.

En la **figura 48** se representan los diagramas tensión-deformación de las tres probetas de mortero de reparación de base orgánica. En este caso, destaca la alta tensión máxima alcanzada.

En la **figura 49** se representan las curvas tensión-deformación de las tres probetas de mortero de reparación de cemento tradicional. Estas probetas han presentado una resistencia más baja que las anteriores.

Las probetas cúbicas de hormigón han desarrollado una muy alta deformación en la rotura. En cambio, las probetas realizadas con mortero de reparación de base orgánica a pesar de alcanzar gran resistencia, han presentado un menor módulo de deformabilidad que éstas.

Se puede comprobar la homogeneidad de resultados de las tres probetas de cada tipo en los diagramas.

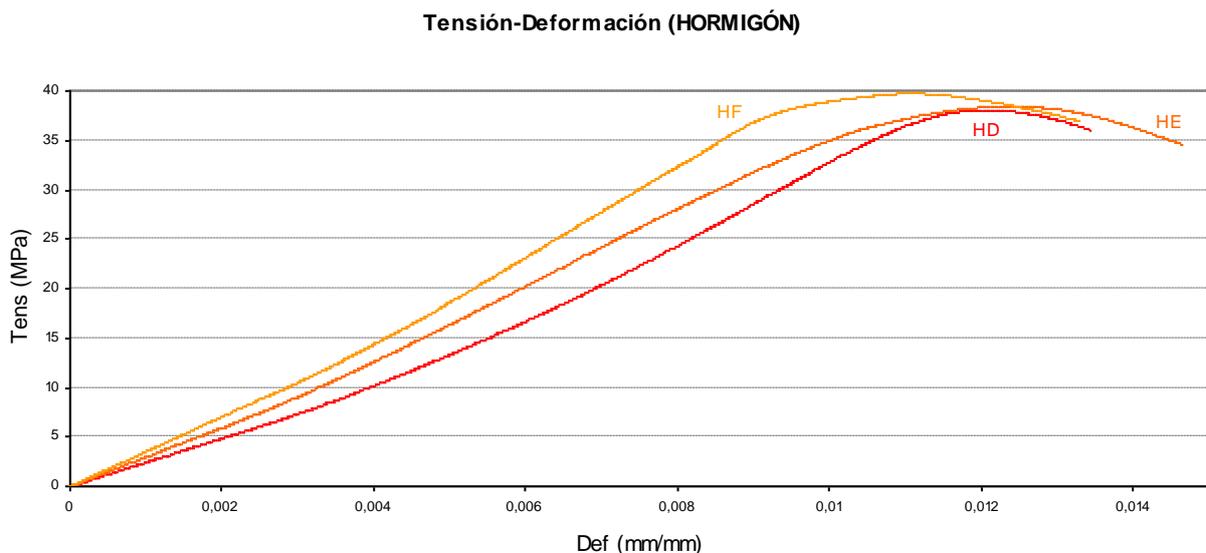


Figura 47 Diagramas tensión-deformación de las tres probetas de hormigón

Tensión - Deformación (MORTERO DE BASE ORGÁNICA)

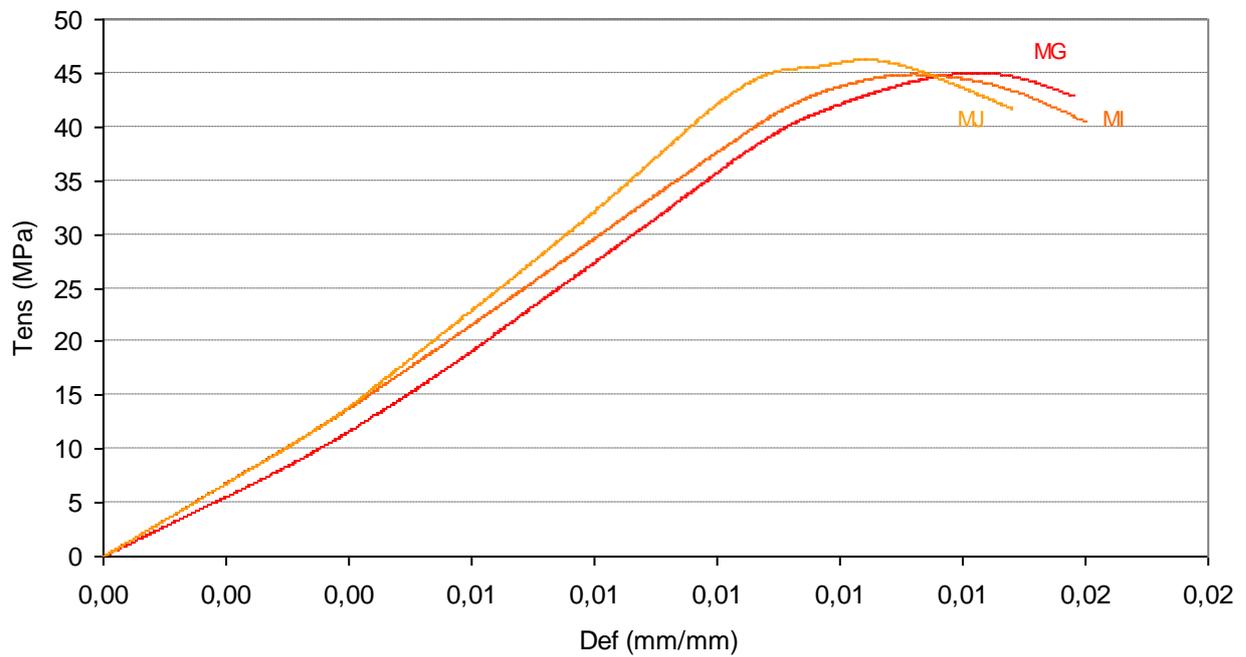


Figura 48 Diagramas tensión-deformación de las tres probetas de mortero de reparación de base orgánica

Tensión-Deformación (MORTERO DE CEMENTO)

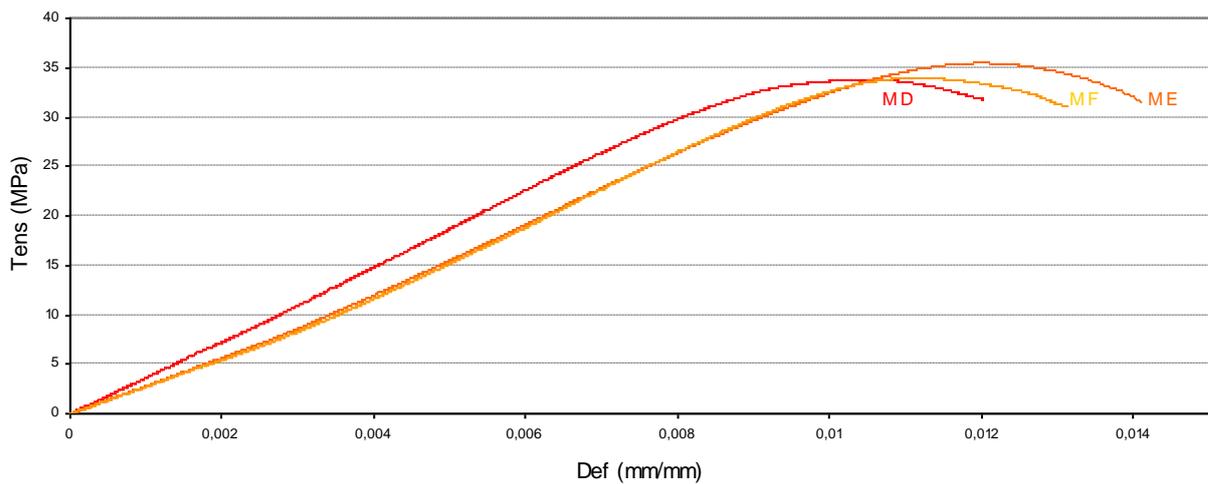


Figura 49 Diagramas tensión-deformación de las tres probetas de mortero de reparación de cemento tradicional

Para poder realizar las comparaciones y evaluaciones correspondientes, en la Tabla 10 se resumen los valores medios calculados tras los resultados de los ensayos a compresión de las probetas de hormigón, mortero de base orgánica y mortero de cemento tradicional.

Probeta	Q máx. (KN)	$\epsilon_{\text{máx}}$ (%)	f_{cm} (N/mm ²)	Emáx. (N/mm ²)	$\Omega_{\text{máx}}$ (N/mm ²)	Ω_u (N/mm ²)
5						
H	387,34	0,01185	38,73	3278,51	0,23788	0,31145
MR	453,95	0,01578	45,39	2890,34	0,31934	0,41872
MC	344,08	0,01532	34,41	2316,15	0,20754	0,27072

Tabla 16 Tabla de valores medios de las probetas de hormigón y de los dos morteros de reparación.

También se han sometido a compresión dos probetas cilíndricas realizadas con mortero de cemento, de 200 mm de longitud y Ø100mm.

En las **figuras 50 y 51** se representan los diagramas tensión-deformación de las dos probetas cilíndricas de mortero de reparación de cemento tradicional. La resistencia alcanzada por las probetas cilíndricas es inferior a la que se ha alcanzado con las probetas cúbicas realizadas del mismo material.

Tensión-Deformación (CILÍNDRICA 1 y 2)

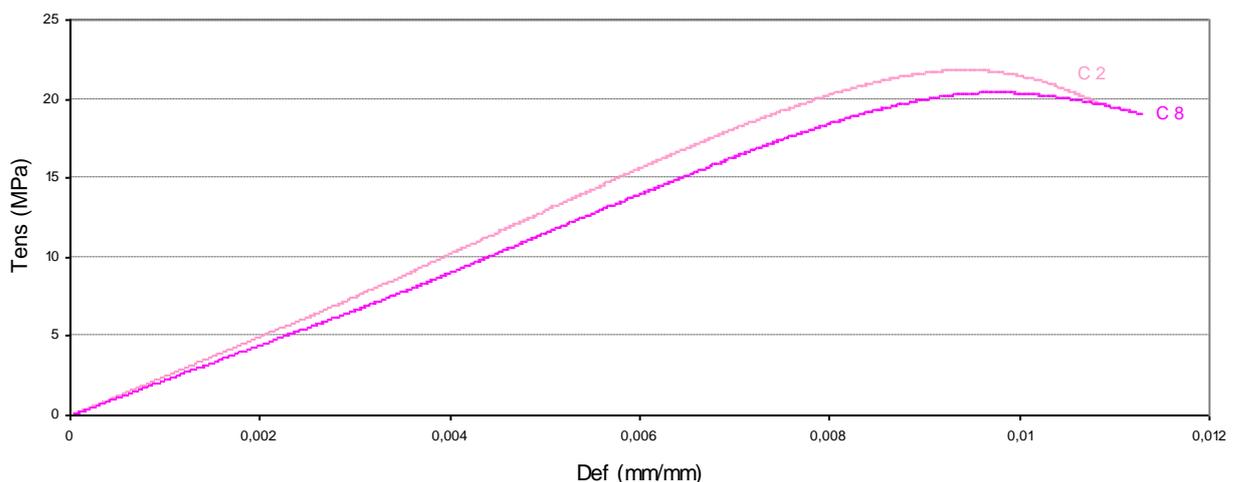


Figura 50 Diagrama tensión-deformación de las dos probetas cilíndricas de mortero de reparación de cemento tradicional

5 **Descripción de las abreviaturas:** **H:** Probetas de Hormigón **MR:** Probetas de Mortero de reparación de base orgánica; **MC:** Probetas de Mortero de reparación de cemento tradicional.

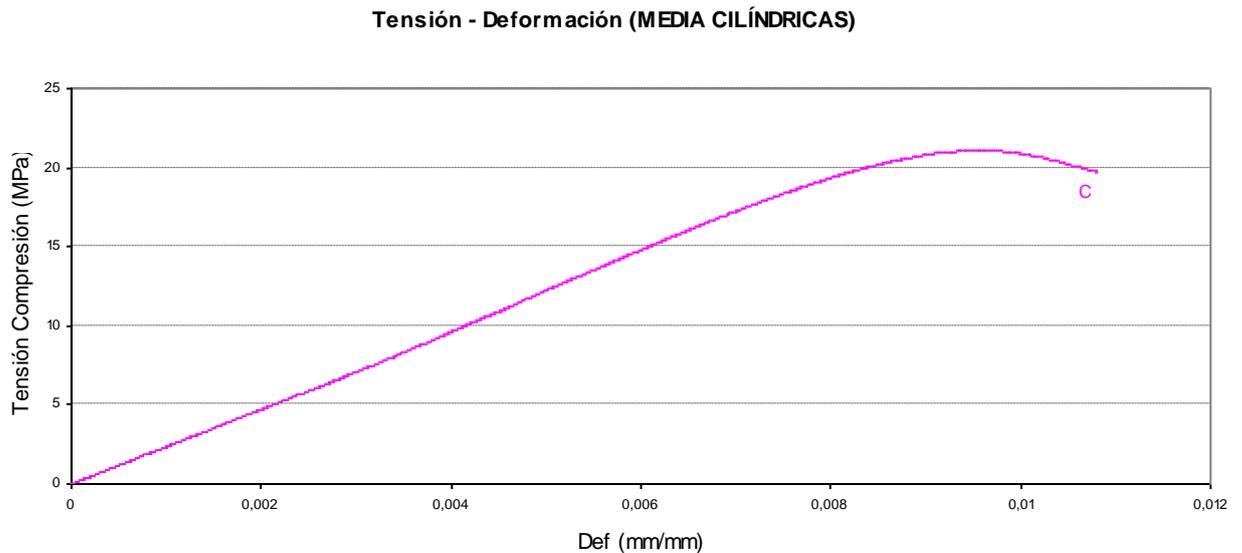


Figura 51 Diagrama medio de tensión-deformación de las dos probetas cilíndricas de mortero de reparación de cemento tradicional

3.1.3 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A COMPRESIÓN DE DOS MATERIALES

3.1.3.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A COMPRESIÓN EN SERIE

En las **Tablas 17 y 18** se recogen los resultados de los ensayos de compresión en serie de las probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación de los dos morteros en sus distintas proporciones.

Probeta⁶	Q máx. (KN)	ϵ máx (%)	f_{cm} (N/mm²)	Emáx. (N/mm²)	Ω máx(N/mm²)	Ω_u (N/mm²)
H1-3C	293,19	0,03045	29,32	962,89	0,241	0,29920
H1-2C	317,51	0,03299	31,75	962,47	0,438	0,50668
H2-3C	340,27	0,02649	34,03	1284,64	0,336	0,38760

Tabla 17 Resultados de los ensayos de compresión en serie de las probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación de base orgánica.

6 Descripción de las abreviaturas: H1-3C, H1-2C y H2-3C: Probetas mixtas de Hormigón-Mortero de reparación de base orgánica; **H1-3F, H1-2F y H2-3F:** Probetas mixtas de Hormigón-Mortero de reparación de cemento tradicional.

Probeta	Q máx. (KN)	$\epsilon_{\text{máx}}$ (%)	f_{cm} (N/mm ²)	$E_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\Omega_{\text{máx}}$ (N/mm ²)	Ω_u (N/mm ²)
H1-3F	250,43	0,02571	25,04	973,99	0,264607	0,35006
H1-2F	246,38	0,02673	24,64	921,71	0,30869	0,39838
H2-3F	287,29	0,02170	28,73	1323,81	0,31919	0,40247

Tabla 18 Resultados de los ensayos de compresión en serie de las probetas mixtas de hormigón-mortero de cemento tradicional.

En la **figura 52** están representadas las curvas tensión-deformación de las probetas mixtas ensayadas a compresión en serie, con una proporción de hormigón del 33,3% [H1-3]. En este caso, las probetas realizadas con mortero de reparación de base orgánica alcanzan mayor resistencia.

En la **figura 53** se representan los diagramas tensión-deformación de las probetas mixtas ensayadas a compresión en serie, con una proporción de hormigón del 50% [H1-2]. Las probetas realizadas con mortero de reparación de base orgánica no solo son las que más resistencia alcanzan sino también las que poseen una mayor ductilidad.

En la **figura 54** se representan las curvas tensión-deformación de las probetas mixtas ensayadas a compresión en serie, con una proporción de hormigón del 66,6% [H2-3].

Todas ellas se caracterizan por alcanzar más resistencia con morteros de reparación de base orgánica que con morteros de cemento tradicional.

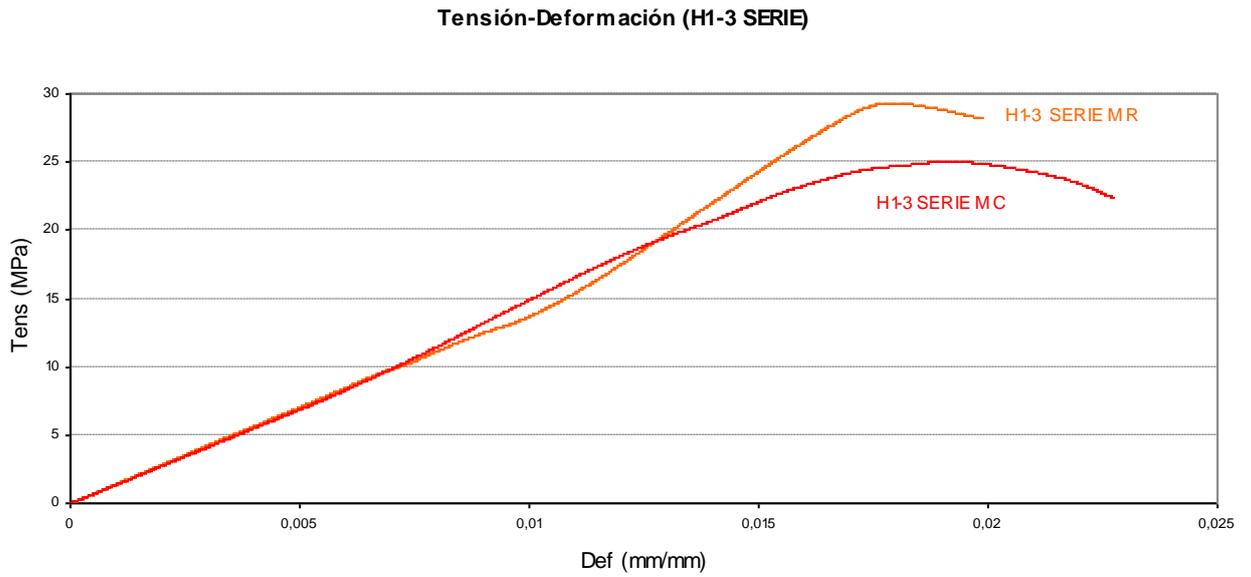
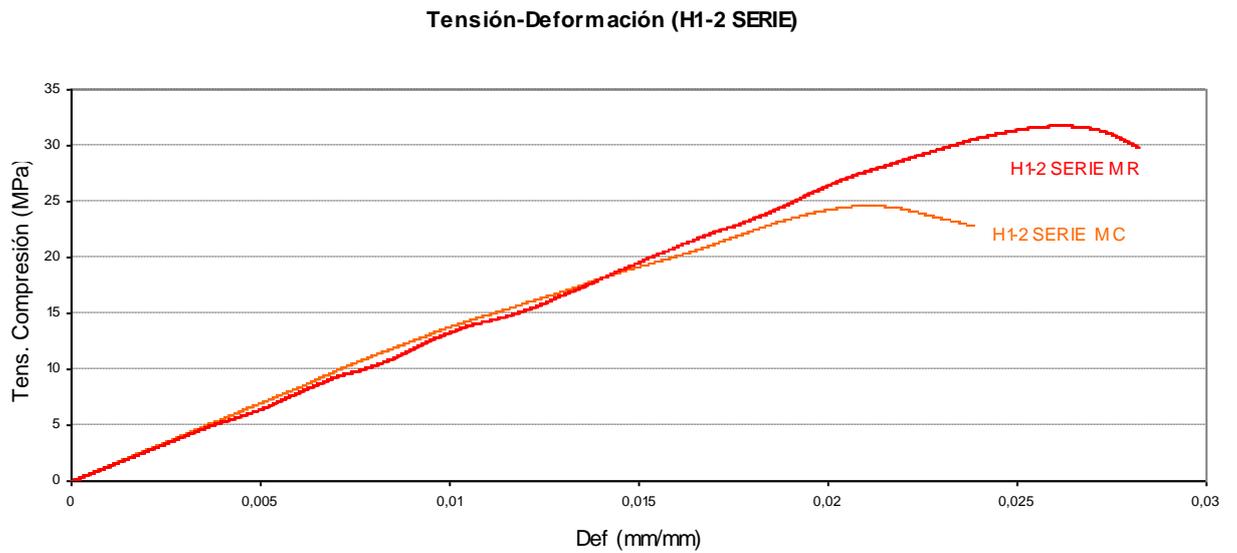


Figura 52 Diagramas tensión-deformación en serie de las probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación con una proporción de hormigón del 33,3%



Tensión-Deformación (H2-3 SERIE)

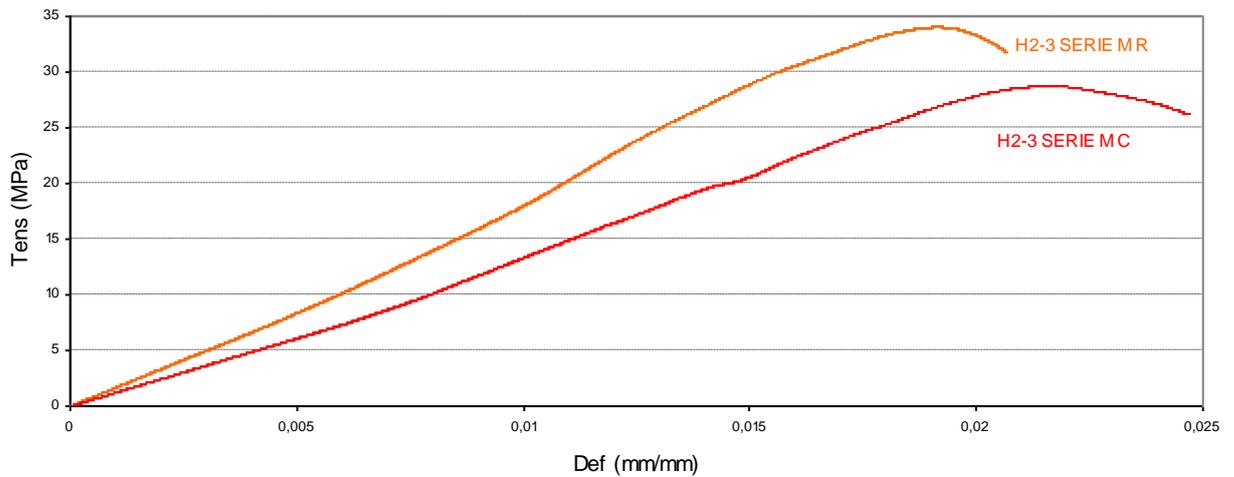


Figura 53 Diagramas tensión-deformación en serie de las probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación con una proporción de hormigón del 50%

Figura 54 Diagramas tensión-deformación en serie de las probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación con una proporción de hormigón del 66,6%

3.1.3.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN PARALELO

En las **Tablas 19 y 20** se recogen los resultados de los ensayos de compresión en paralelo de las probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación de los dos morteros en sus distintas proporciones.

Probeta	Q máx. (KN)	$\epsilon_{\text{máx}}$ (%)	f_{cm} (N/mm ²)	Emáx. (N/mm ²)	$\Omega_{\text{máx}}$ (N/mm ²)	Ω_u (N/mm ²)
H1-3A	353,01	0,02183	35,31	1617,08	0,31166	0,36181
H1-3B	378,05	0,02138	37,80	1767,93	0,31871	0,40108
H1-2A	318,67	0,02139	31,87	1489,71	0,28369	0,34019
H1-2B	292,27	0,02138	29,23	1366,87	0,29333	0,36866
H2-3A	359,83	0,01689	35,98	2129,32	0,34539	0,42752
H2-3B	288,99	0,01853	28,89	1559,49	0,30962	0,34440

Tabla 19 Resultados de los ensayos de compresión en paralelo de las probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación de base orgánica.

Probeta	Q máx. (KN)	$\epsilon_{\text{máx}}$ (%)	f_{cm} (N/mm ²)	$E_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\Omega_{\text{máx}}$ (N/mm ²)	Ω_u (N/mm ²)
H1-3D	228,33	0,02074	22,83	1100,62	0,13242	0,43656
H1-3E	336,34	0,01505	33,63	2235,16	0,20539	0,27019
H1-2D	258,36	0,02850	25,84	906,52	0,53151	0,65642
H1-2E	340,06	0,01567	34,01	2168,78	0,23351	0,32381
H2-3D	305,44	0,02086	30,54	1463,73	0,29869	0,39961
H2-3E	227,98	0,02129	22,79	1070,42	0,17629	0,22234

Tabla 20 Resultados de los ensayos de compresión en paralelo de las probetas mixtas de hormigón-mortero de cemento tradicional.

En las **figuras 55 y 56** están representadas las curvas tensión-deformación de las probetas mixtas ensayadas a compresión en paralelo, con una proporción de hormigón del 33,3% [H1-3]. Se observa una mayor dispersión de resultados en las probetas mixtas de mortero de cemento tradicional que en las de mortero de reparación de base orgánica.

En las **figuras 57 y 58** se representan los diagramas tensión-deformación de las probetas mixtas ensayadas a compresión en paralelo, con una proporción de hormigón del 50% [H1-2].

En las **figuras 59 y 60** se representan las curvas tensión-deformación de las probetas mixtas ensayadas a compresión en paralelo, con una proporción de hormigón del 66,6% [H2-3].

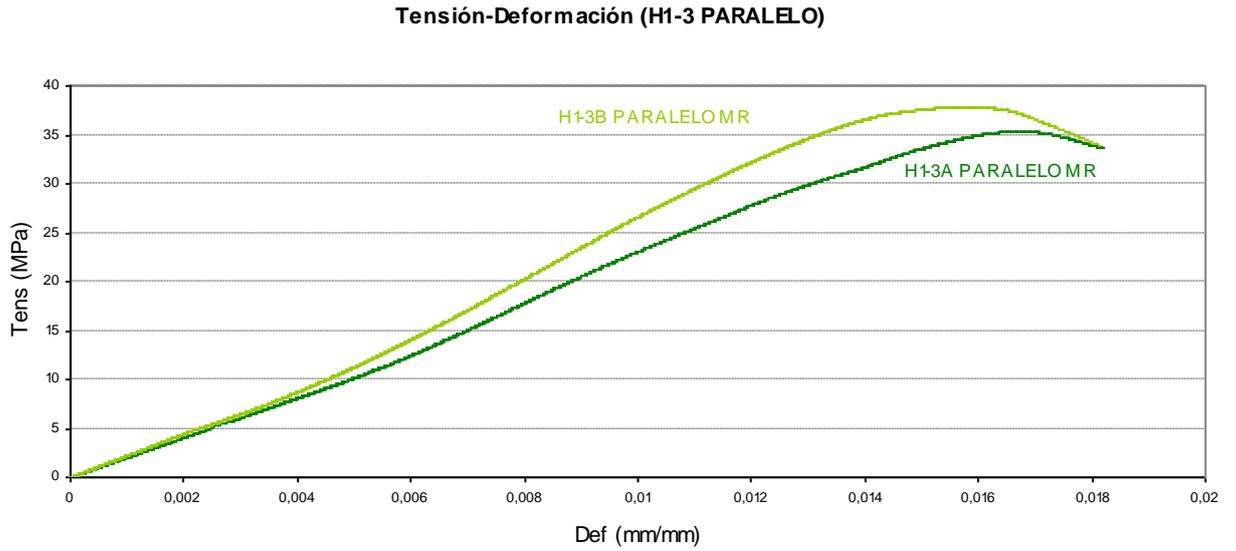


Figura 55 Diagramas tensión-deformación en paralelo de las dos probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación de base orgánica con una proporción de hormigón del 33,3%

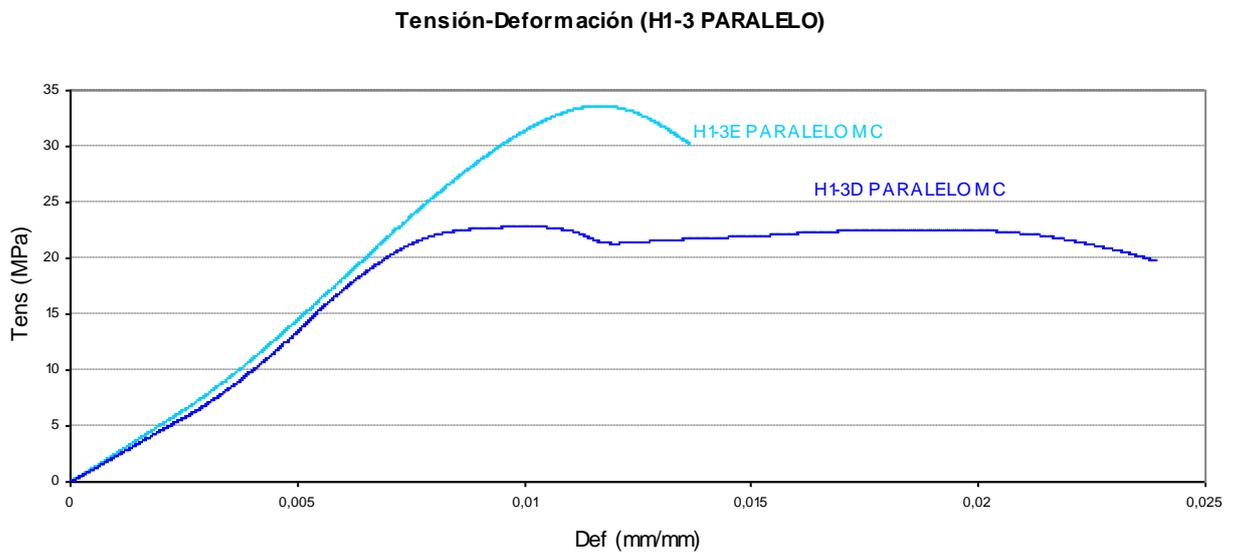


Figura 56 Diagramas tensión-deformación en paralelo de las probetas mixtas de hormigón-mortero de cemento tradicional con una proporción de hormigón del 33,3%

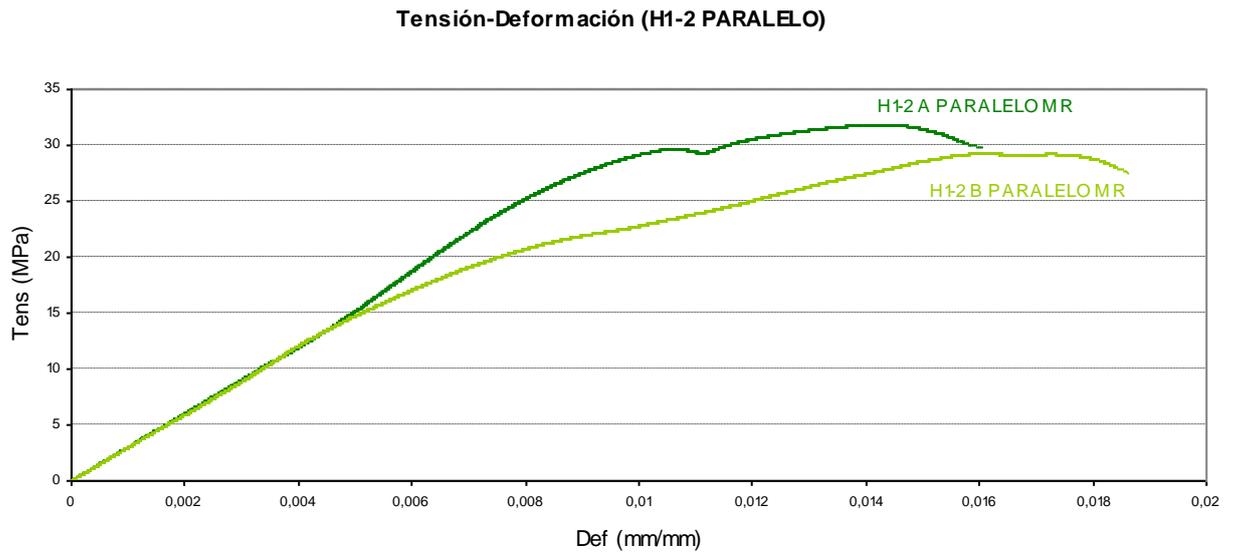


Figura 57 Diagramas tensión-deformación en paralelo de las dos probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación de base orgánica con una proporción de hormigón del 50%

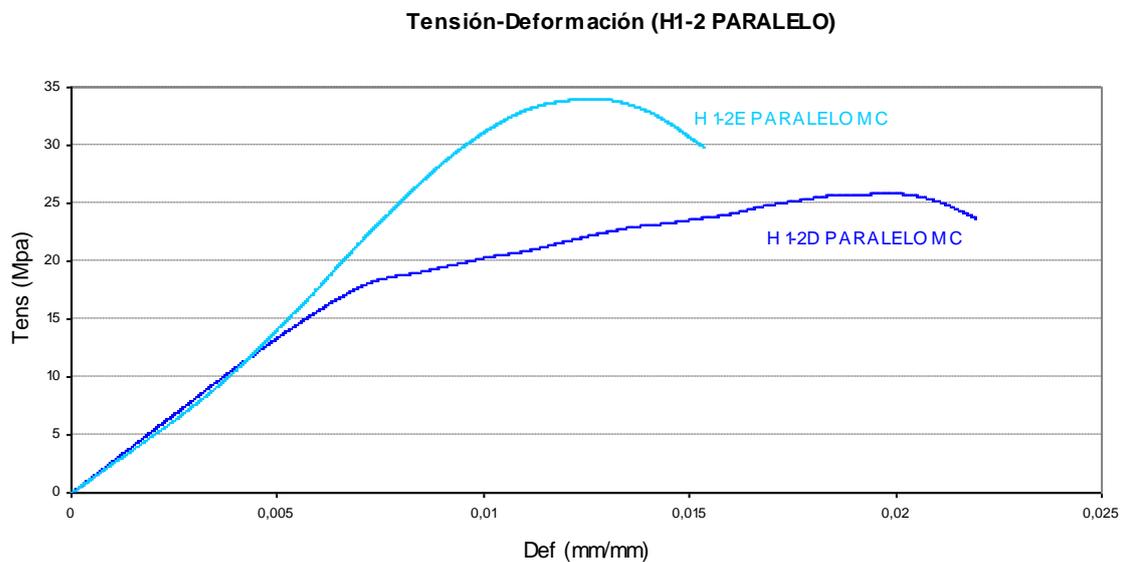


Figura 58 Diagramas tensión-deformación Diagramas tensión-deformación en paralelo de las probetas mixtas de hormigón-mortero de cemento tradicional con una proporción de hormigón del 50%

Tensión-Deformación (H2-3 PARALELO)

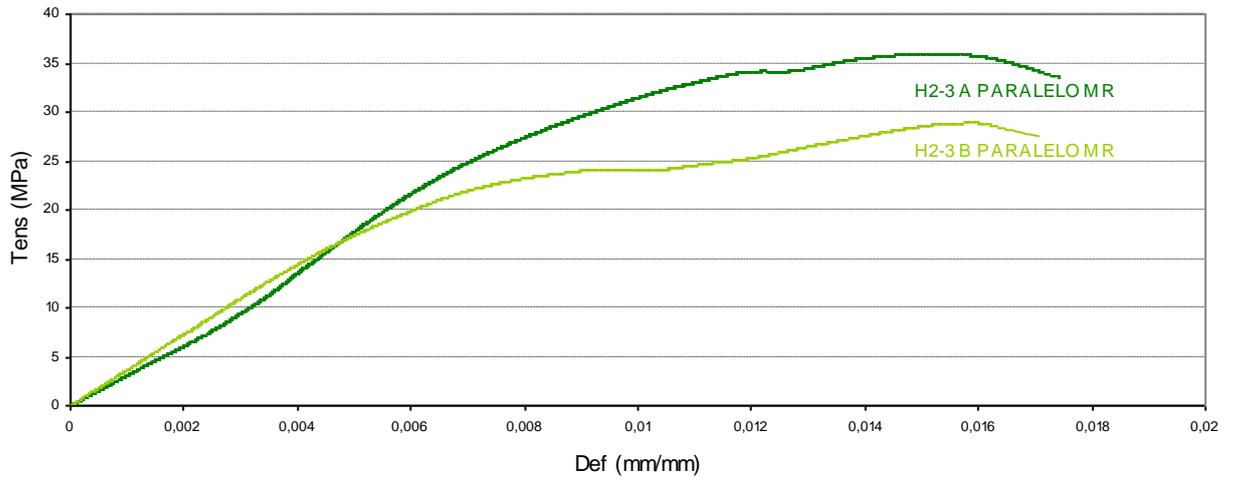


Figura 59 Diagramas tensión-deformación en paralelo de las dos probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación de base orgánica con una proporción de hormigón del 66,6%

Tensión-Deformación (H2-3 PARALELO)

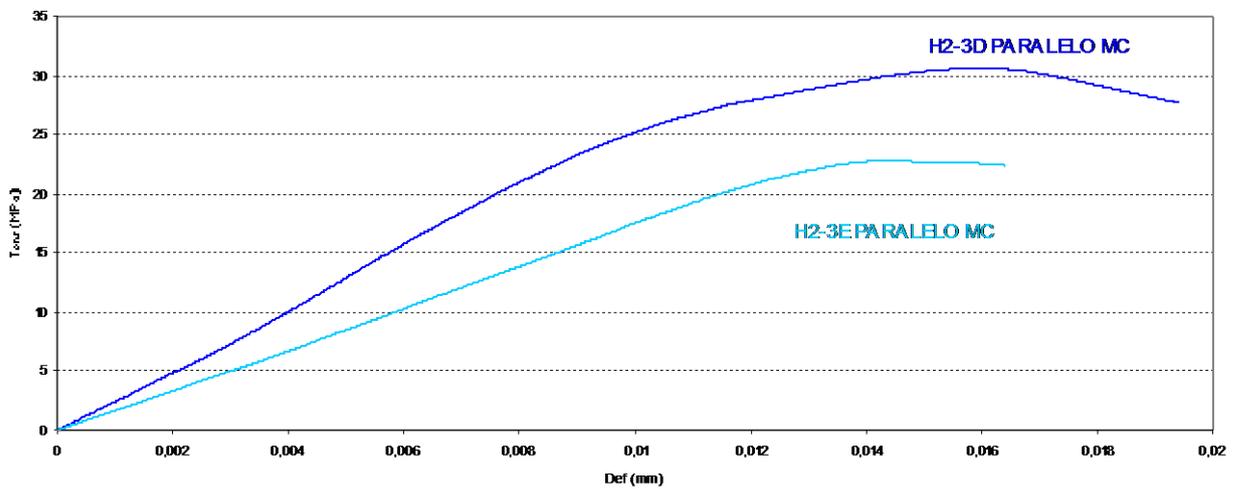


Figura 60 Diagramas tensión-deformación en paralelo de las probetas mixtas de hormigón-mortero de cemento tradicional con una proporción de hormigón del 66,6%.

Para poder realizar las comparaciones y evaluaciones correspondientes, en la **Tabla 21** se resumen los valores medios calculados tras los resultados de los ensayos a compresión en paralelo de las probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación.

Probeta	Q máx. (KN)	$\epsilon_{\text{máx}}$ (%)	f_{cm} (N/mm ²)	Emáx. (N/mm ²)	$\Omega_{\text{máx}}$ (N/m m ²)	Ω_u (N/mm ²)
H1-3 MC	282,34	0,01789	28,23	1667,89	0,16891	0,35337
H1-2 MC	299,21	0,02209	29,92	1537,65	0,38251	0,49011
H2-3 MC	266,71	0,021083	26,67	1267,07	0,23749	0,31098
H1-3 MR	365,53	0,02161	36,55	1692,51	0,31519	0,38145
H1-2 MR	305,47	0,02138	30,55	1428,29	0,28851	0,35443
H2-3 MR	324,41	0,01771	32,44	1844,41	0,32750	0,38596

Tabla 21 Resultados de los ensayos de compresión en paralelo de las probetas mixtas de hormigón-mortero de cemento.

Para concluir, en las **figuras 61 y 62** se representan las curvas tensión-deformación medias de las probetas ensayadas de hormigón y mortero de reparación y en las **tablas 22 y 23**, se muestran los resultados medios de todas las probetas elaboradas con mortero de reparación de base orgánica y de mortero de cemento, respectivamente.

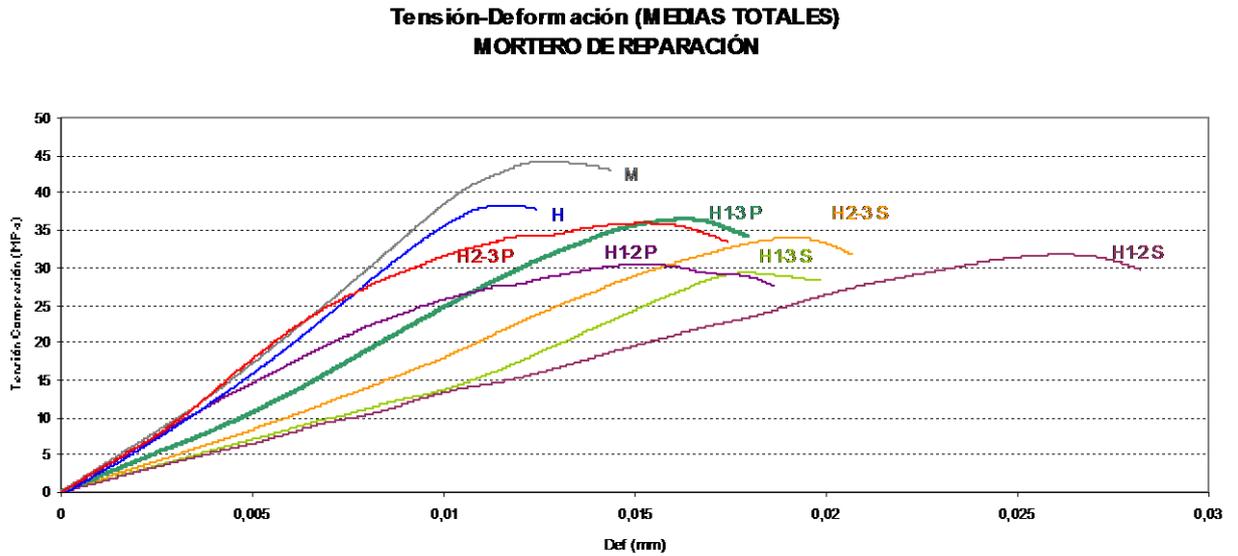


Figura 61 Diagrama medio tensión-deformación de las probetas de hormigón y mortero de reparación de base orgánica

	Probeta	Q máx. (KN)	ϵmáx (%)	fcm (N/mm²)	Emáx. (N/mm²)	Ωmáx(N/m²)	Ωu (N/mm²)
COMPRESIÓN	H	387,34	0,0118	38,73	3278,51	0,2378	0,3114
	MR	453,95	0,0157	45,39	2890,34	0,3193	0,4187
PARALELO	H1-3 MR	365,53	0,0216	36,55	1692,51	0,3151	0,3814
	H1-2 MR	305,47	0,0214	30,55	1428,29	0,2885	0,3544
	H2-3 MR	324,41	0,0177	32,44	1844,41	0,3275	0,3859
SERIE	H1-3 MR	293,19	0,0304	29,32	962,89	0,2412	0,2992
	H1-2 MR	317,51	0,0329	31,75	962,47	0,4377	0,5066
	H2-3 MR	340,27	0,0264	34,03	1284,64	0,3356	0,3876

Tabla 22 Resultados de los ensayos de compresión en paralelo de las probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación de base orgánica

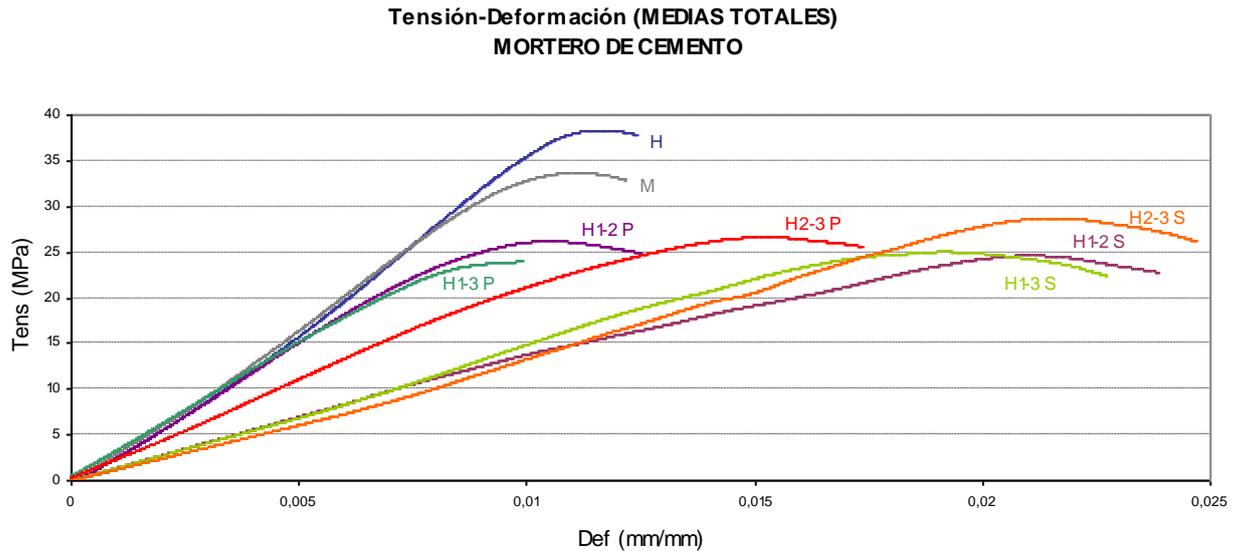


Figura 62 Diagrama medio tensión-deformación de las probetas de hormigón y mortero de cemento tradicional

	Probeta	Q máx. (KN)	ϵ máx (%)	fcm (N/mm ²)	E máx. (N/mm ²)	Ω máx(N/mm ²)	Ω_u (N/mm ²)
COMPRESIÓN	H	387,34	0,0118	38,73	3278,50	0,2378	0,3114
	MC	344,08	0,0153	34,41	2316,14	0,2075	0,2707
PARALELO	H1-3 MC	282,34	0,0179	28,23	1667,89	0,1689	0,3533
	H1-2 MC	299,21	0,0221	29,92	1537,64	0,3825	0,4901
	H2-3 MC	266,71	0,0211	26,67	1267,07	0,2374	0,3109
SERIE	H1-3 MC	250,43	0,0257	25,04	973,991	0,2646	0,3500
	H1-2 MC	246,38	0,0267	24,64	921,709	0,3086	0,3983
	H2-3 MC	287,29	0,0217	28,73	1323,80	0,3192	0,4024

Tabla 23 Resultados de los ensayos de compresión en paralelo de las probetas mixtas de hormigón-mortero de cemento tradicional

Las probetas de mortero de reparación de base orgánica son las que mayor resistencia presentan frente a las demás. Además, 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 en serie y paralelo no se encuentren dentro del intervalo que comprende las gráficas de hormigón y mortero de reparación. Y esto es debido a que los módulos de deformabilidad de ambos materiales es diferente. Con lo cual, esto 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.

3.2 ESTUDIO A NIVEL DE PIEZA ESTRUCTURAL

Como hemos visto en el capítulo anterior, se han considerado dos morteros de reparación, uno de cemento tradicional y otro de base orgánica, para reparar cuatro vigas de hormigón, trabajando a flexión, dos de ellas armadas longitudinalmente con acero tradicional al carbono B500 S y otras dos con acero inoxidable AISI 2304, de diferentes cuantías.

Posteriormente, se han repetido los ensayos con las mismas vigas una vez reparadas, para comparar las diferencias obtenidas.

Para cada viga, se ha calculado el diagrama momento-deformación y la figuración producida tras el ensayo a flexión.

3.2.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A FLEXIÓN Y FISURACIÓN DE LAS PIEZAS SIN REPARAR

Los resultados de las vigas ensayadas a flexión hasta la rotura, aportados por D. Medina, E., son los siguientes:

VIGA	Armadura y tipo de acero	Resistencia real del hormigón [N/mm ²]	Fuerza de rotura Q [kN]	Momento flector de rotura [kNm]
3	2 Ø8 B500SD	26,57	47,46	7,91
2	2 Ø16 B500SD	27,37	98,93	16,48
10	2 Ø8 AISI 2304	26,57	68,21	11,37
5	2 Ø16 AISI 2304	27,37	103,72	17,28

Tabla 24 Resultados de los ensayos de flexión de las cuatro vigas consideradas.

Los resultados de los ensayos a flexión de las cuatro vigas se resumen en la **Tabla 24**. La resistencia del hormigón se refiere a la media obtenida de las probetas correspondientes. La fuerza de rotura Q es la máxima desarrollada por la máquina en el ensayo, es decir, su valor es 2·P. El momento flector de rotura es el obtenido en el

centro del vano, de valor $M=P\ell/3$.

En la **figura 63** se representa el gráfico carga-desplazamiento de las dos vigas armadas con dos barras de $\varnothing 16$, una con acero B500SD y la otra con inoxidable AISI 2304.

En la **figura 64** se recoge el gráfico momento-deformación de las dos vigas armadas con dos barras $\varnothing 8$, una viga con acero al carbono B500SD y la otra con acero inoxidable dúplex AISI 2304.

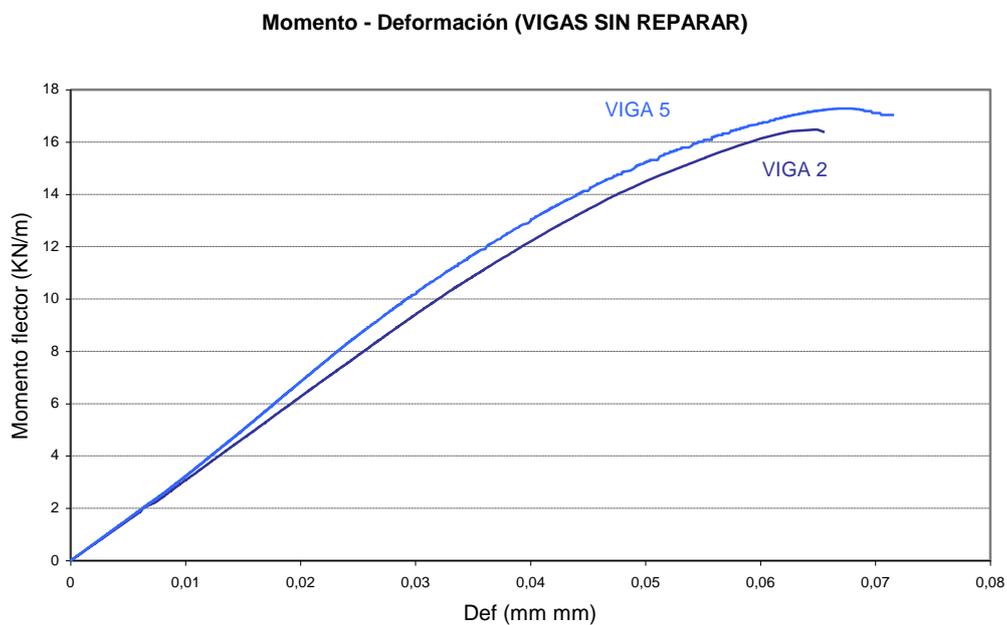


Figura 63 Gráfico momento-deformación de las dos vigas armadas con dos barras $\varnothing 16$, una viga con acero al carbono B500SD y la otra con acero inoxidable dúplex AISI 2304.

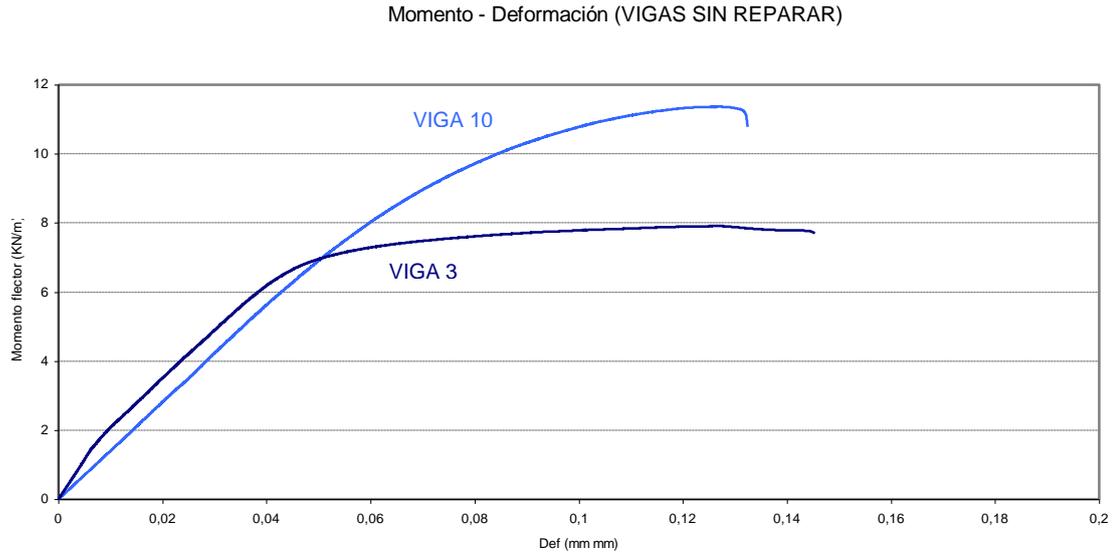


Figura 64 Gráfico momento-deformación de las dos vigas armadas con dos barras $\varnothing 8$, una viga con acero al carbono B500SD y la otra con acero inoxidable dúplex AISI 2304.

Se puede observar en los gráficos, cómo la diferencia de comportamiento entre las dos vigas armadas con 2 $\varnothing 8$, es muy superior a la diferencia que se aprecia entre las dos vigas armadas con 2 $\varnothing 16$. En esta primera apreciación hay que tener en cuenta la forma de rotura de las vigas.

En las **figuras 65 y 66** se muestra el estado de las vigas después del ensayo. Las vigas nº 3 y 10 rompen por deformación excesiva de su armadura longitudinal (dos $\varnothing 8$) al superar su límite elástico, con importantes fisuras en la cara inferior de la pieza, 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 nº 2 y 5 rompen por agotamiento del hormigón a compresión. Después de la rotura, por el empuje de la prensa, aumentan ligeramente las fisuras aparecidas durante en el ensayo en la parte inferior de las piezas.



Figura 65 Vigas nº 3 y 10, después del ensayo de rotura a flexión



Figura 66 Vigas nº 2 y 5, después del ensayo de rotura a flexión

VIGA	Armadura y tipo de acero	Anchuras de fisuras, medidas durante el ensayo, y la carga de la prensa en el momento de la medición		Altura máxima de fisura [mm]	Separación media entre fisuras sm [mm]
		Anchura de fisura [mm]	Carga [kN]		
3	2 Ø8 B500SD	0,3	40	100	100
2	2 Ø16 B500SD	0,1	90	54	110
10	2 Ø8 AISI 2304	0,3	55	95	97
5	2 Ø16 AISI 2304	0,1	95	70	72

Tabla 25 Tamaño y separación media entre fisuras

El tamaño y la separación media entre fisuras, se resumen en la **Tabla 25**. Los anchos de fisura reflejados se midieron durante el ensayo, antes de llegar a la carga máxima. Al lado de cada anchura medida, se indica la carga Q que marcaba la prensa en ese momento. La altura de fisura se refiere a la más alta encontrada, medida desde la cara inferior de la viga. La separación media entre fisuras se obtuvo después del ensayo, teniendo en cuenta sólo las fisuras aparecidas durante el ensayo antes de alcanzar la carga máxima.

3.2.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A FLEXIÓN Y FISURACIÓN DE LAS PIEZAS REPARADAS

Los resultados de las vigas reparadas ensayadas a flexión hasta la rotura, son los siguientes:

VIGA ⁷	Armadura y tipo de acero	Mortero de reparación	Fuerza de rotura Q [kN]	Momento flector de rotura [kNm]
MC-3	2 Ø8 B500SD	Cemento	54,27	8,94
MC-2	2 Ø16 B500SD	Cemento	123,82	20,63
MR-10	2 Ø8 AISI 2304	B. Orgánica	70,09	11,59
MR-5	2 Ø16 AISI 2304	B. Orgánica	124,39	20,62

Tabla 26. Resultados de los ensayos de flexión de las cuatro vigas reparadas.

⁷ **Descripción de las abreviaturas:** MC: Vigas reparadas con mortero de cemento tradicional; MR: Vigas reparadas con mortero de reparación de base orgánica.

Los resultados de los ensayos a flexión de las cuatro vigas se resumen en la **Tabla 26**.

En la **figura 67** se recoge el gráfico momento-deformación de las dos vigas armadas con dos barras $\varnothing 8$, una viga reparada con mortero de reparación de base orgánica y la otra con mortero de cemento tradicional. En la **figura 68** se representa el gráfico momento-deformación de las dos vigas armadas con dos barras de $\varnothing 16$, una viga reparada con mortero de reparación de base orgánica y la otra con mortero de cemento tradicional.

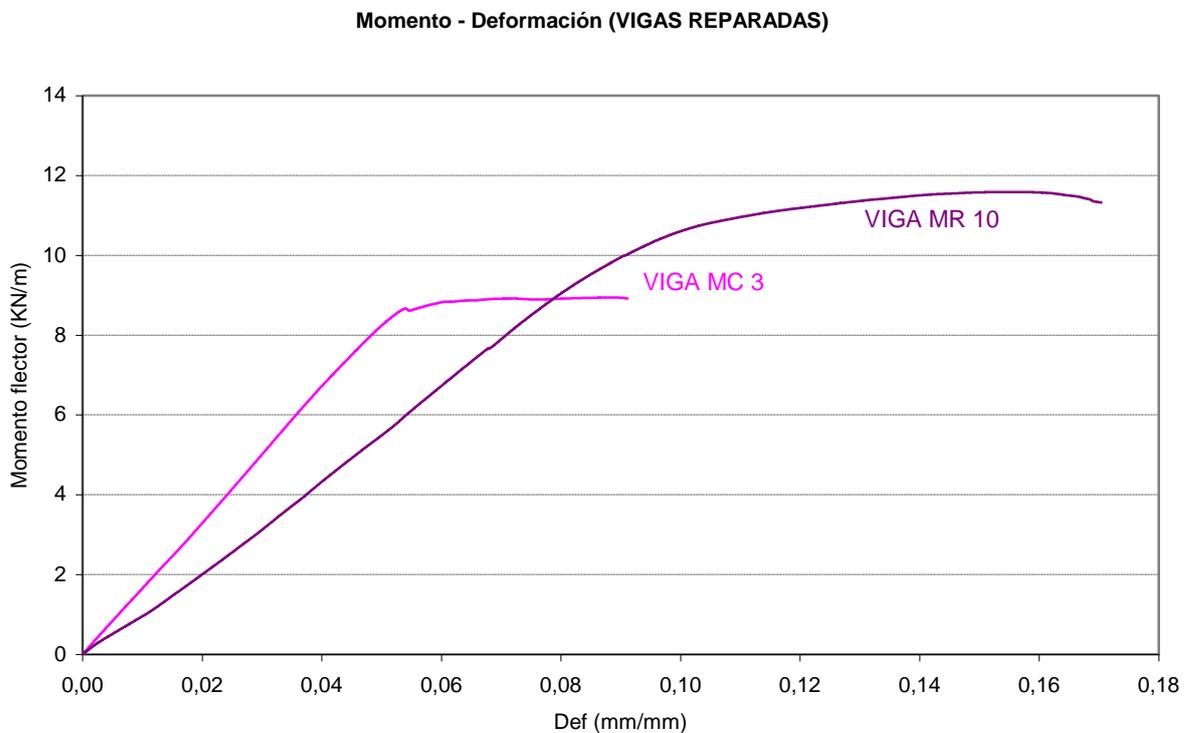


Figura 67 Gráfico momento-deformación de las dos vigas armadas con dos barras $\varnothing 8$, una viga reparada con mortero de reparación de base orgánica y la otra con mortero de cemento tradicional.

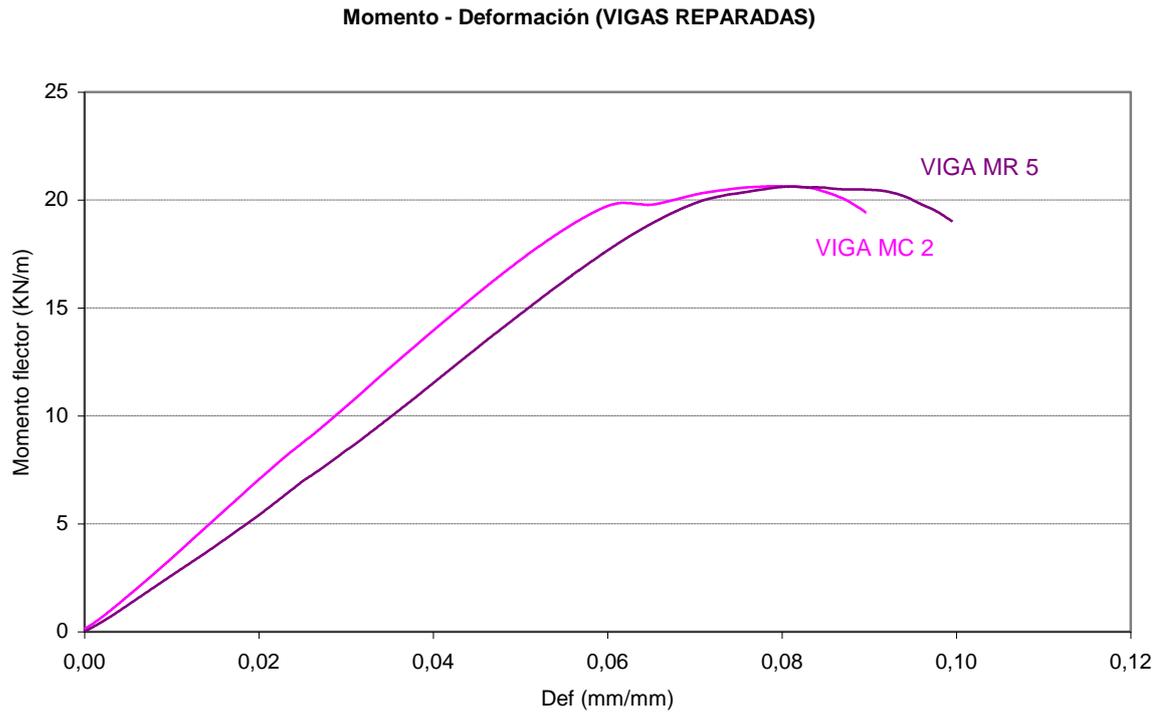


Figura 68 Gráfico momento-deformación de las dos vigas armadas con dos barras $\varnothing 16$, una viga reparada con mortero de reparación de base orgánica y la otra con mortero de cemento tradicional.

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 2 $\varnothing 8$, que entre las dos vigas armadas con 2 $\varnothing 16$, al igual que ocurre con las vigas reparadas.

En las **figuras 69, 70, 71 y 72** se muestra el estado de las vigas después del ensayo.

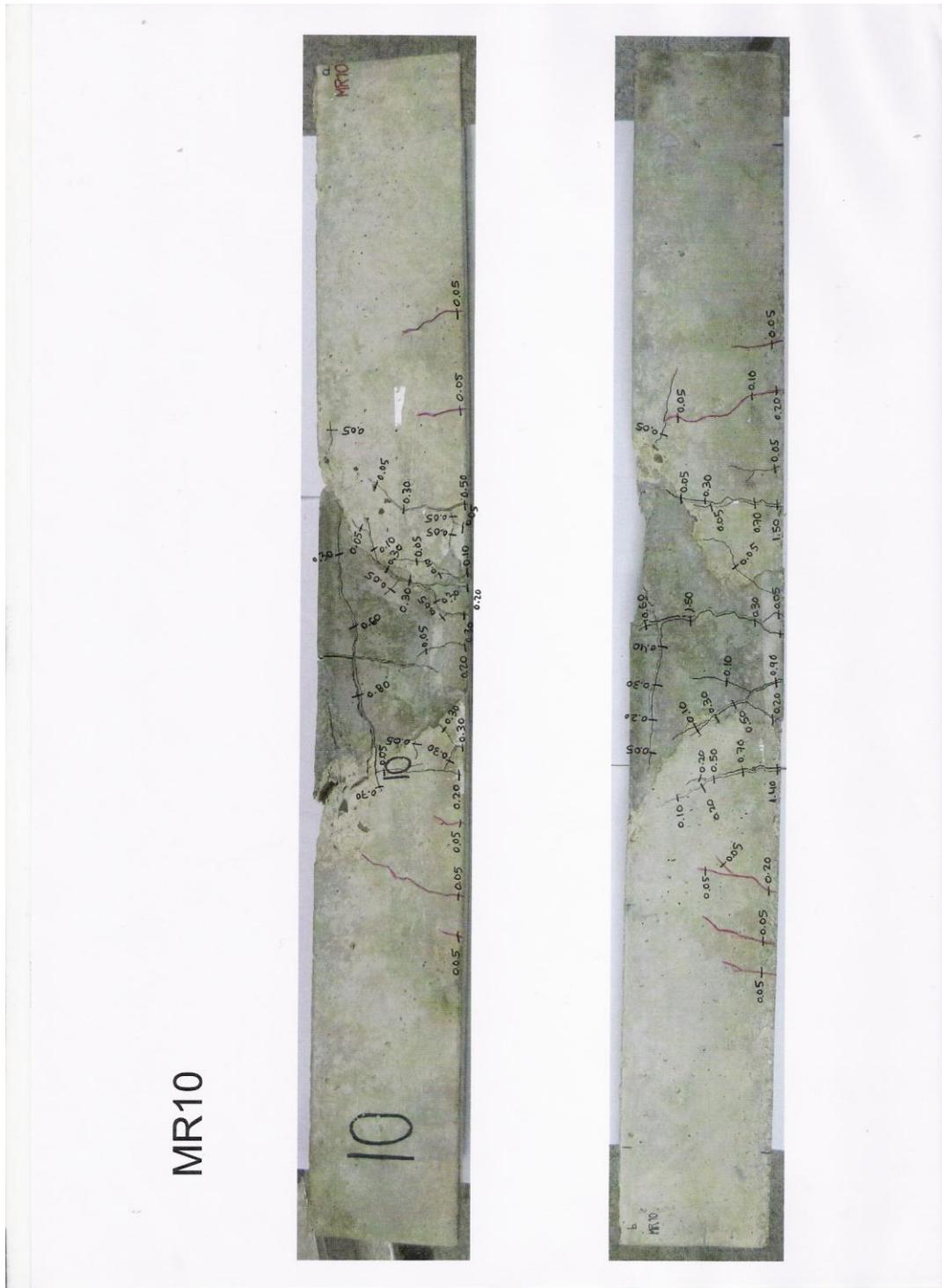


Figura 69 Fisuras en la viga MR10



Figura 70 Fisuras en la viga M2



Figura 71 Fisuras en la viga M3



Figura 72 Fisuras em la viga MR5

Las vigas nº 10 y 3 concentran mayor número de fisuras en la zona central, mientras que en las vigas nº 2 y 5 las fisuras aparecidas tras el ensayo se distribuyen en toda la longitud de las piezas.

Tras croquizar y realizar la medición de fisuración para cada una de las cuatro vigas ensayadas, se obtenido los siguientes datos de fisuración experimental en cada viga. La anchura máxima de las fisuras, se resumen en la **Tabla 27**.

VIGA	Tipo de mortero de reparación	Armadura y tipo de acero	Anchura máxima de fisura, medida tras el ensayo [mm]
M3	Cemento	2 Ø8 B500SD	1,40
M2	Cemento	2 Ø16 B500SD	0,50
MR10	B. Orgánica	2 Ø8 AISI 2304	1,50
MR5	B. Orgánica	2 Ø16 AISI 2304	0,40

Tabla 27. Tamaño máximo de fisuras originadas.

Por último se sintetizan los valores obtenidos en todas las vigas ensayadas, tanto antes como después de la reparación , en las **tablas 28 y 29** y **figuras 73 y 74**.

Vigas de Ø8 mm	Q máx. (KN)	ϵ máx. (mm mm)	Momento máx. (KN/m)	Anchura máxima de fisuras (mm)
VIGA 3	47,46182	0,1554049	7,909580146	0,30
VIGA 10	68,20938	0,1577592	11,36715552	0,30
VIGA 3_MC	54,26891	0,0880237	8,944366433	1,40
VIGA 10_MR	70,09991	0,1538379	11,58606208	1,50

Tabla 28 Valores obtenidos en cada viga antes y después de la reparación en vigas de Ø8.

Vigas de Ø16 mm	Q máx. (KN)	ϵ máx. (mm mm)	Momento máx. (KN/m)	Anchura máxima de fisuras (mm)
VIGA 2	98,87582	0,08544117	16,47822885	0,10
VIGA 5	103,7104	0,08010005	17,28399219	0,10
VIGA 2_MC	123,819	0,07862041	20,63577681	0,50
VIGA 5_MR	124,3916	0,081209	20,61834253	0,40

Tabla 29 Valores obtenidos en cada viga antes y después de la reparación en vigas de Ø16.

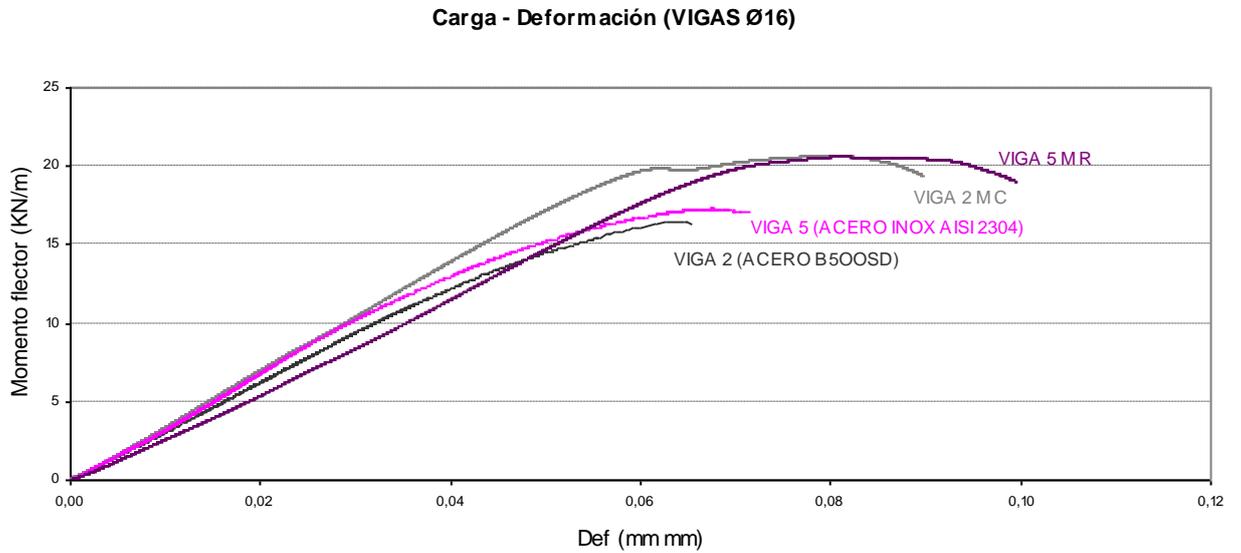


Figura 73 Gráfico momento-deformación de las vigas armadas con dos barras Ø16, antes y después de la reparación.

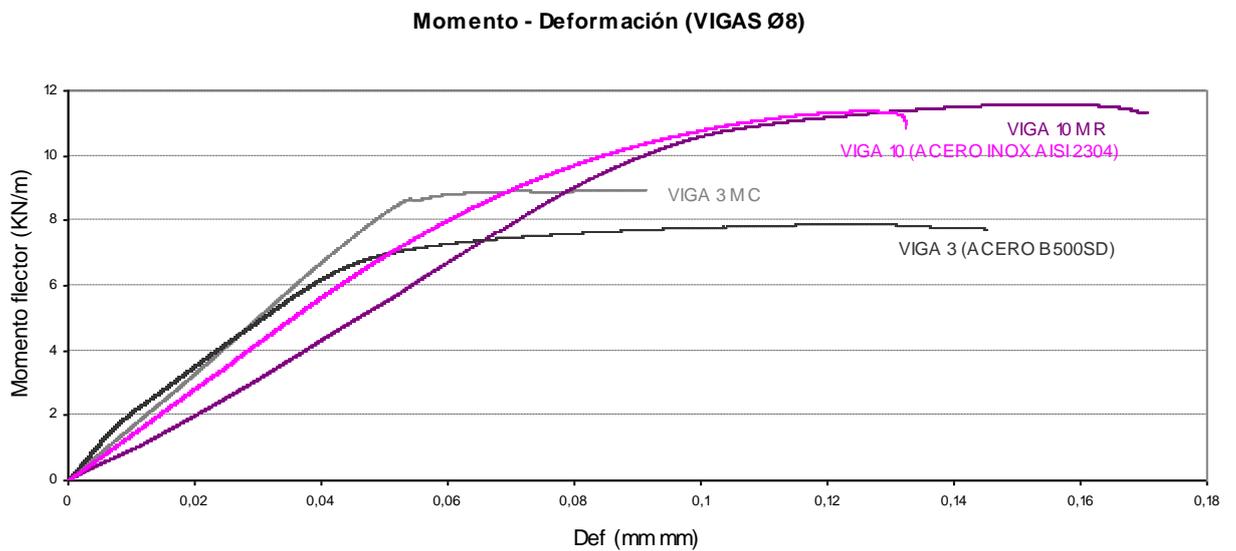


Figura 74 Gráfico momento-deformación de las vigas armadas con dos barras Ø8, antes y después de la reparación.

Capítulo 4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y PROPIEDADES DE LAS PROBETAS

4.1.1 PROBETAS ELABORADAS CON UN MATERIAL

A la vista de los resultados de los ensayos de compresión de las probetas elaboradas con un material, reflejados en la **Tabla 15**, 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. Lo vemos en el gráfico de la **figura 75**, que representa el valor medio de las tres probetas ensayadas de cada material.

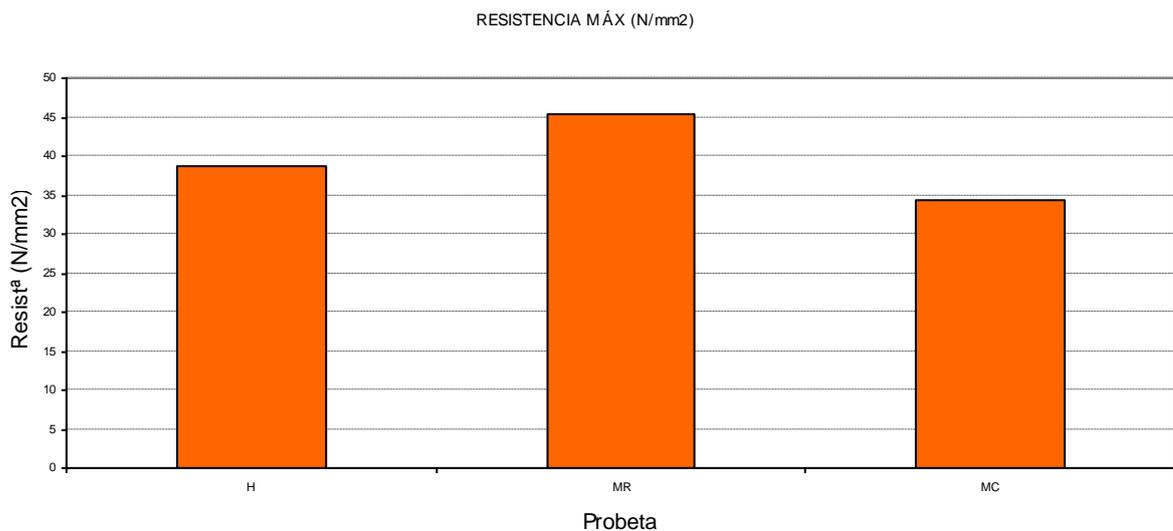


Figura 75 Comparativa de los valores medios obtenidos, de las tres probetas, de la resistencia máxima, para los tres tipos de materiales ensayados.

En las **figuras 76 y 77** se representan los valores medios de las áreas máxima y última encerradas bajo las curvas.

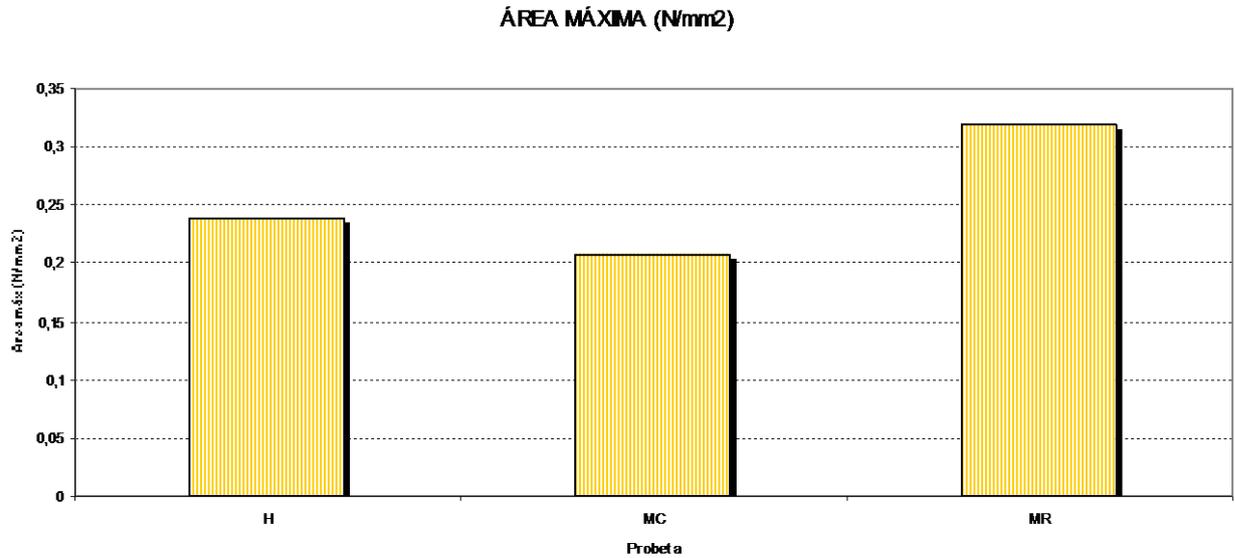


Figura 76 Comparativa de los valores medios obtenidos, de las tres probetas, del área máxima, para los tres tipos de materiales ensayados.

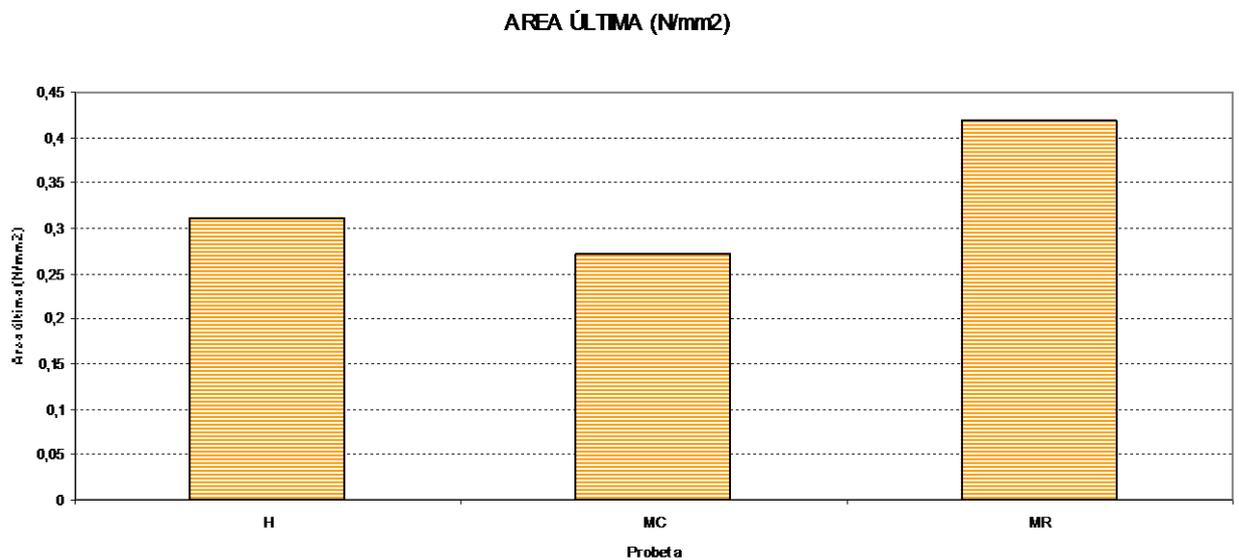


Figura 76 Comparativa de los valores medios obtenidos, de las tres probetas, del área última, para los tres tipos de materiales ensayados.

Se observa como el área máxima y última de las probetas elaboradas con mortero de reparación es superior al resto, lo que indica que posee una mayor ductilidad.

4.1.2 PROBETAS ELABORADAS CON DOS MATERIALES

Se han comparado los tres tipos de probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación, tanto en la posición en serie como en paralelo.

4.1.2.1 ROTURA DE PROBETAS EN SERIE

Se observa como la resistencia de las probetas formadas por 2/3 de hormigón y 1/3 mortero de reparación, son las que mayor resistencia alcanzan. En cambio la ductilidad mayor corresponde a las probetas que poseen un 50% de ambos materiales, por ser las que mayor energía acumulan bajo las curvas última y máxima. Se pueden observar los análisis de resultados en las **figuras 78, 79 y 80**.

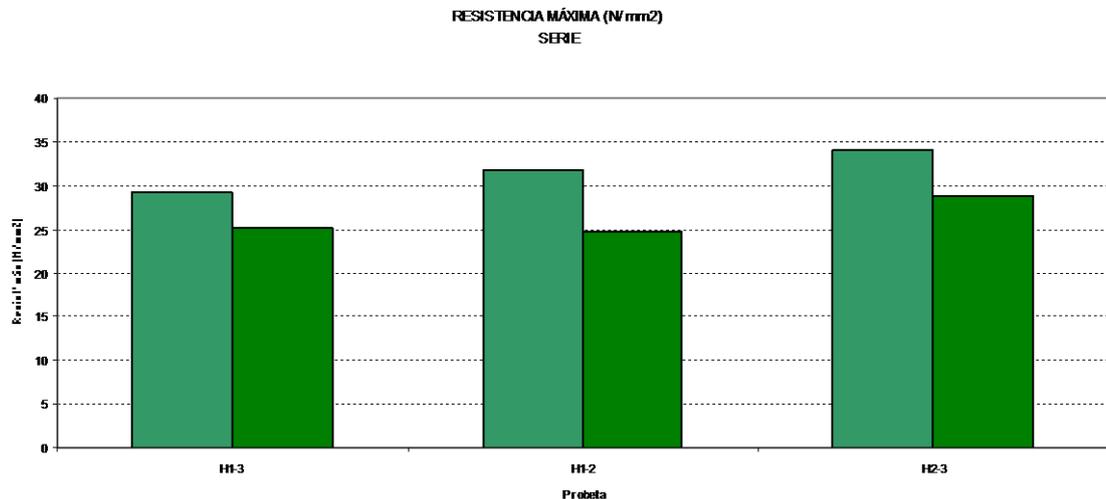


Figura 78 Comparativa de los valores medios obtenidos, de las tres probetas mixtas, de la resistencia

Máxima, para colocación de probetas en serie.

En serie aumenta significativamente la deformación máxima ($\epsilon_{m\acute{a}x}$), la deformación última (ϵ_u) y la ductilidad, en cambio disminuye el módulo de elasticidad (E).

Comparando las probetas mixtas de hormigón y mortero de reparación con las de cemento portland, ambas dan unos valores aproximados de deformación última. En serie las deformaciones son superiores en mortero de reparación frente al mortero de cemento. Además, las probetas de mortero de reparación alcanzan un 23% más de resistencia que las de mortero de cemento portland.

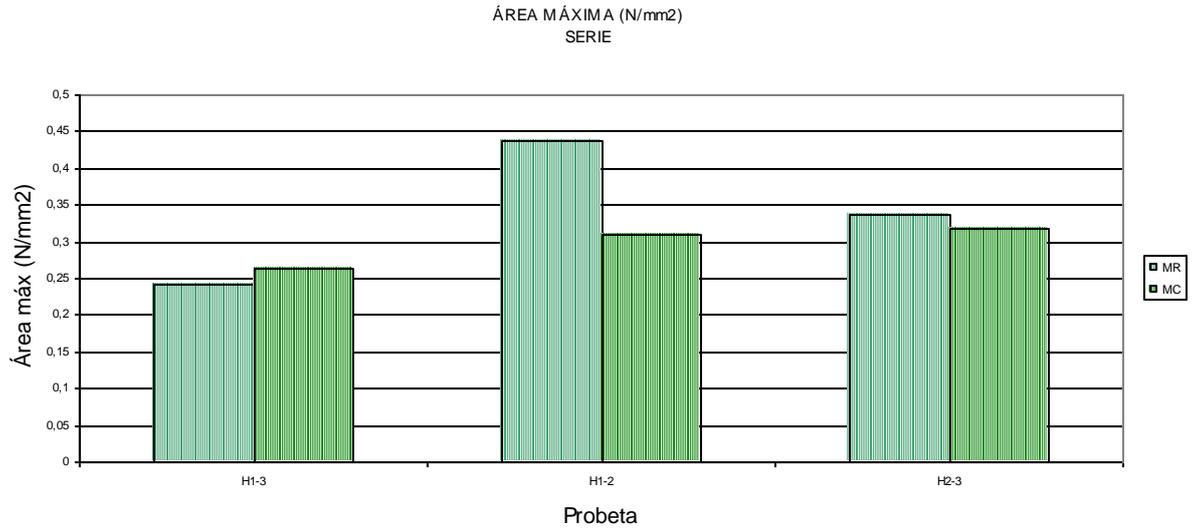


Figura 79 Comparativa de los valores medios obtenidos, de las tres probetas mixtas, del área máxima, para colocación de probetas en serie.

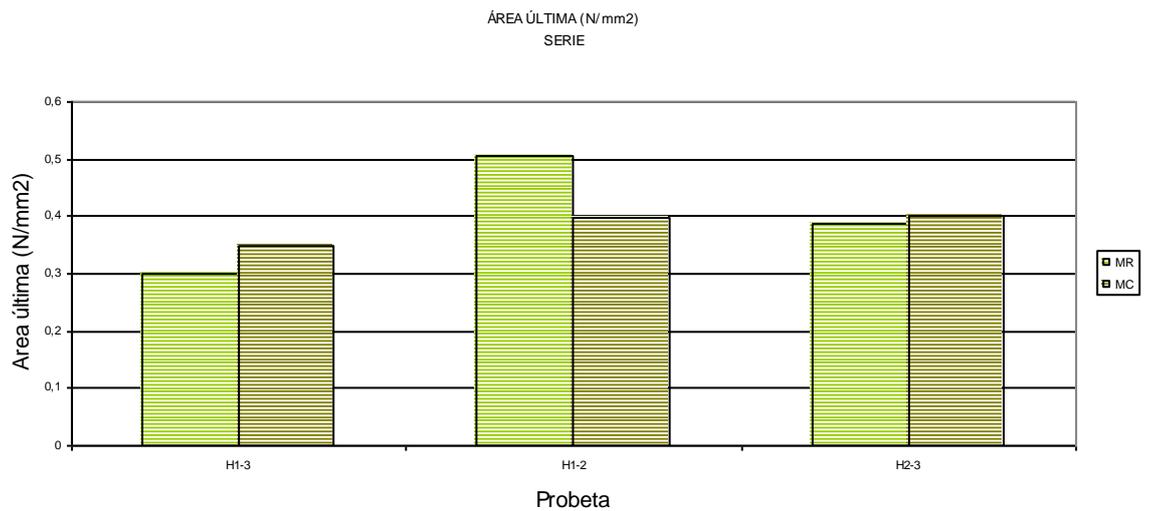


Figura 79 Comparativa de los valores medios obtenidos, de las tres probetas mixtas, del área última, para colocación de probetas en serie

4.1.2.2 ROTURA DE PROBETAS EN PARALELO

Las figuras 80, 81 y 82 muestran los análisis tras la rotura en paralelo.

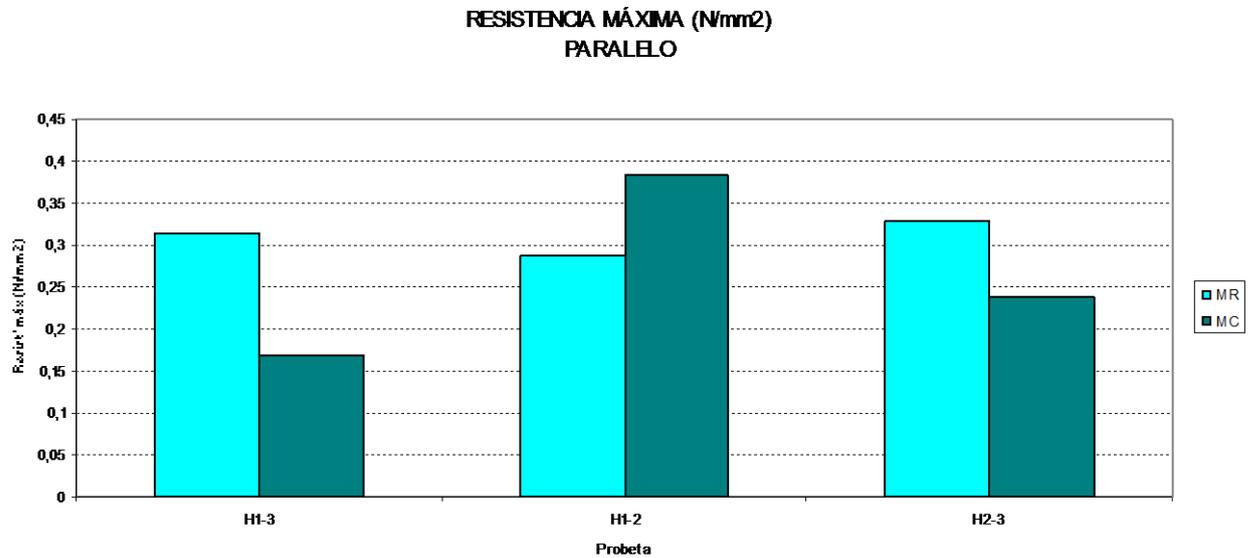


Figura 80 Comparativa de los valores medios obtenidos, de las tres probetas mixtas, de la resistencia Máxima, para colocación de probetas en paralelo.

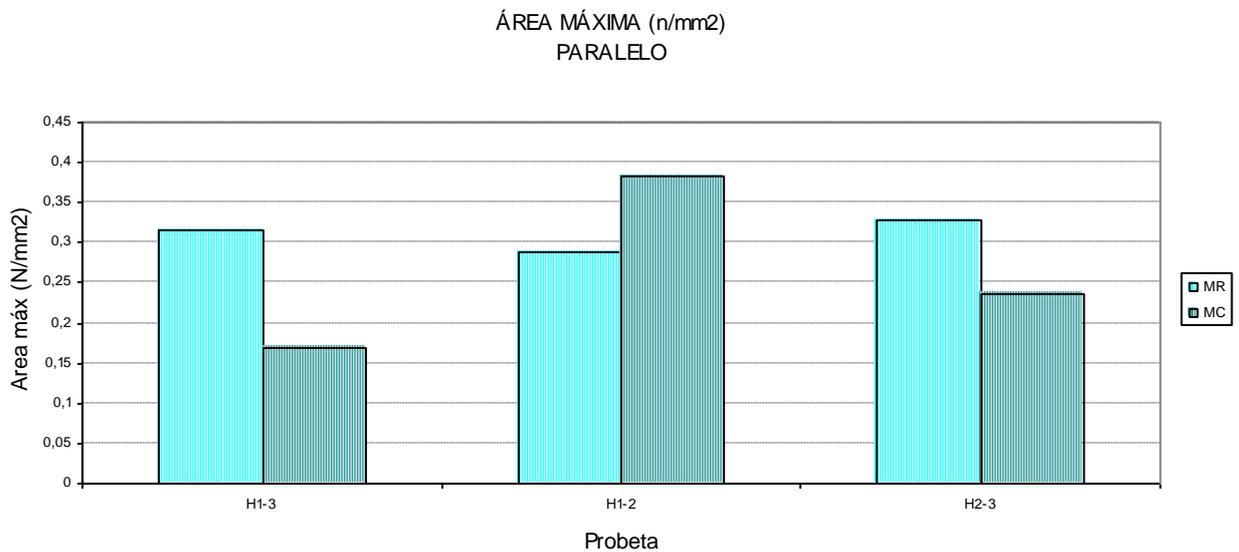


Figura 81 Comparativa de los valores medios obtenidos, de las tres probetas mixtas, del área Máxima, para colocación de probetas en paralelo.

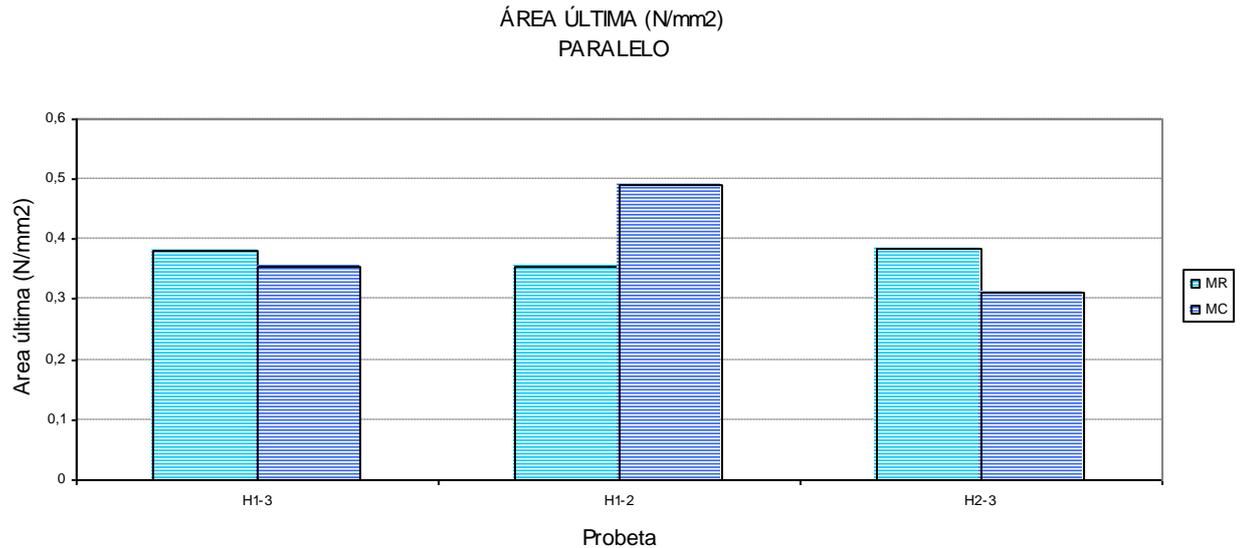


Figura 82 Comparativa de los valores medios obtenidos, de las tres probetas mixtas, del área última, para colocación de probetas en paralelo.

En paralelo hay más dispersión de resultados que en las probetas sólo de hormigón o mortero.

Por otro lado, de la prueba de ultrasonidos se concluye que existe uniformidad de los materiales que conforman las probetas, ya que no presentan considerables alteraciones de velocidad.

4.2 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LAS VIGAS ENSAYADAS

En las **figuras 83** y **84**, se puede constatar la superior ductilidad de las secciones armadas con acero al carbono respecto a las armadas con acero inoxidable.

Además, las vigas reparadas alcanzan cargas superiores a las originales, así como mayores deformaciones máxima y última. Las vigas reparadas con mortero de cemento son más dúctiles que las originales. No ocurre lo mismo con las reparadas con mortero de reparación, pues sucede lo contrario.

Las vigas reparadas que en su origen fueron armadas con barras de acero tradicional al carbono, han dado valores menores de resistencia que las armadas originalmente con barras de acero inoxidable AISI 2304.

4.2.1 VIGAS Ø 16 mm.

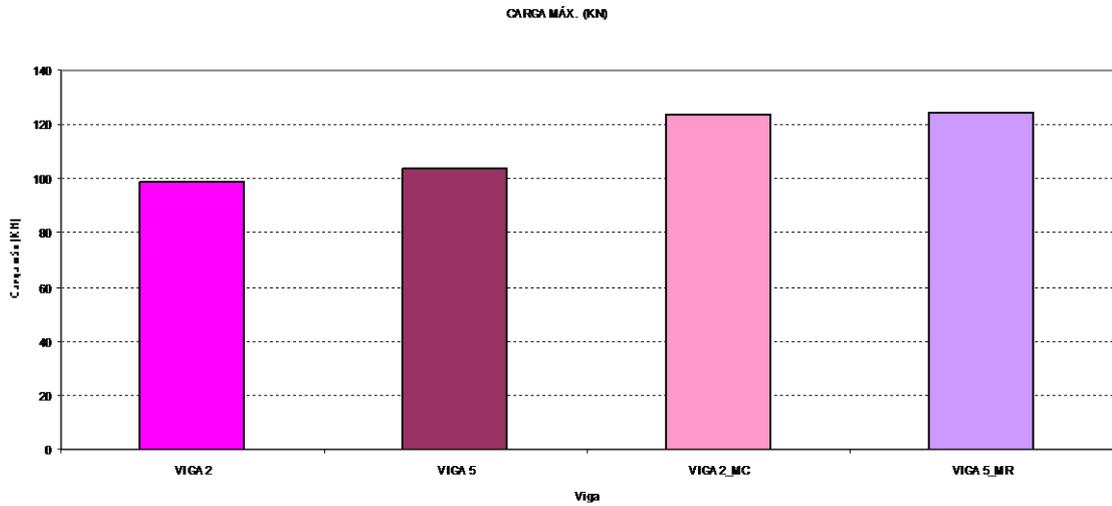


Figura 83 Comparativa de los valores de resistencia obtenidos en las vigas 2 y 5, antes y después de reparar.

Existe un aumento homogéneo de la resistencia en comparación de las vigas sin reparar y reparadas, tanto con mortero de cemento como de reparación de base orgánica.

4.2.2 VIGAS Ø 8 mm.

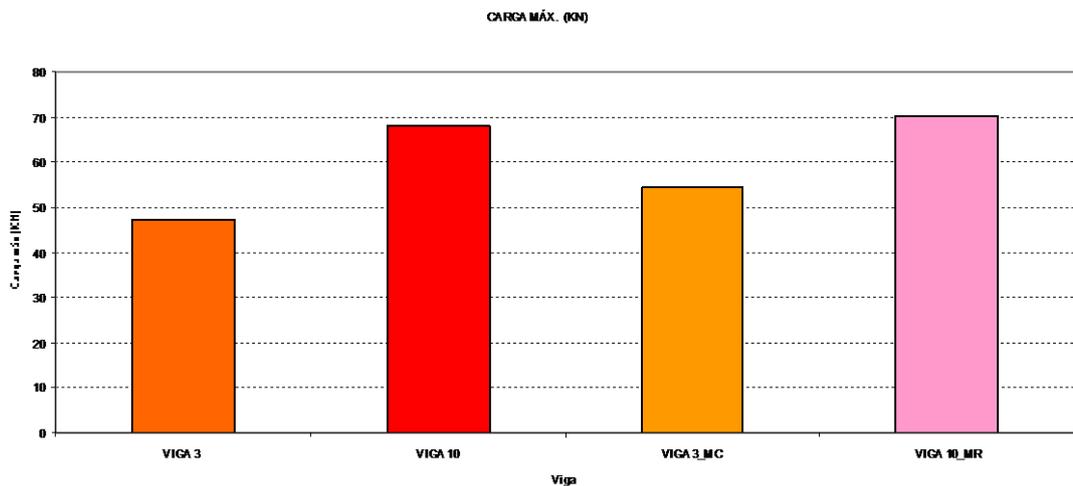


Figura 84 Comparativa de los valores de resistencia obtenidos en las vigas 3 y 10, antes y después de reparar.

Capítulo 5

CONCLUSIONES

Una vez efectuado el análisis e interpretación de los resultados obtenidos del trabajo experimental desarrollado, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- 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.

- Las características mecánicas de las probetas de hormigón y las de mortero de reparación presentan importantes diferencias respecto a las probetas mixtas elaboradas con hormigón y distintos porcentajes de mortero de reparación, alcanzando cargas de rotura entre las del hormigón y el mortero de reparación. Esto no sólo es debido a su composición, sino también al hecho de su colocación en paralelo o en serie, pues no afecta de la misma forma a las probetas. Y esas diferencias mecánicas se traducen en una diferencia de comportamiento de la estructura de hormigón.

- Las probetas mixtas con hormigón y mortero de cemento, no llegan a alcanzar las cargas del mortero de reparación de base orgánica o del hormigón y sin embargo son más dúctiles. En cambio, las probetas de mortero de reparación alcanzan un 23% más de resistencia que las de mortero de cemento portland, debido a que durante el ensayo su capacidad de deformación fue mayor. Además, la presencia de 33,3 % de hormigón en las probetas mixtas incrementa notablemente los valores de resistencia mecánica.

- 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 es superior a la de las vigas reparadas con mortero de cemento y a la de las vigas en su estado inicial.

- Los resultados de los ensayos de rotura a flexión de las cuatro vigas de hormigón reparadas de 1,20 metros, y su comparación con las vigas antes de reparar (diagramas momento-deformación obtenidos) han mostrado la efectividad de la reparación con ambos tipos de mortero de reparación: de cemento tradicional y de

base orgánica, siendo igualmente válidos en los aspectos de características mecánicas y parámetros de ductilidad.

- Por último, respecto al estudio de la fisuración producida en las cuatro vigas ensayadas a flexión, se ha comparado la separación media entre fisuras con respecto a las vigas antes de reparar y aunque la toma de datos ha sido necesariamente con valores aproximados, se ha visto aumentada. También ha aumentado del mismo modo el número de fisuras producidas en las vigas. Cabe decir que las fisuras que aparecen tras el ensayo a flexión son un 80% superiores a las originales tanto en las vigas armadas inicialmente con 2 Ø 18 como en las del 16.

Capítulo 6

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Los resultados obtenidos en éste trabajo proceden de un limitado número de ensayos, que deben de ampliarse 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 a la escasa ductilidad de las probetas de un sólo material de hormigón o mortero reparación.

La campaña de ensayos debería contemplar también un mayor número de proporciones de hormigón-mortero de reparación en las probetas cúbicas, tanto de base orgánica como de cemento tradicional, para poder detectar posibles diferencias debidas a esa variable.

En cuanto al estudio del comportamiento de las piezas estructurales de hormigón armado reparadas con morteros de reparación de base orgánica y de cemento tradicional, creemos que se debe contemplar no sólo las diferencias mecánicas del armado longitudinal de acero inoxidable con respecto al acero al carbono, sino también la posibilidad de incrementar el número de piezas estructurales a ensayar para comparar diferentes piezas entre sí.

Por último, es interesante estudiar el comportamiento frente a otras tipologías de morteros de reparación, para evaluar la influencia del mortero en el comportamiento mecánico y estructural en cada caso.

También creemos interesante estudiar nuevas técnicas de reparación de elementos estructurales de hormigón.

Capítulo 7

BIBLIOGRAFÍA

AENOR: *UNE 83-702-94 Materiales de reparación: Morteros epoxi para reparación en hormigón: Recomendaciones de uso*. Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid. 1994. 18 p.

AENOR: *UNE 83702 Materiales de reparación: preparación de superficies de hormigón armado para su reparación: Recomendaciones de uso*. Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid. 1994. 18 p.

AENOR: *UNE-EN 12190 Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón: Métodos de ensayo: Determinación de la resistencia a compresión de los morteros para reparación*. Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid. 1999. 9 p.

AURREKOETXEA AURREKOETXEA, Juan Ramón. "*Reparación de pilares con daños parciales localizados*". Tesis doctoral. Directores: Dr. D. José Tomás San José Lombera y Dr. D. Juan Manuel Manso Villalaín. Universidad de Burgos, Burgos, Septiembre 2009.

BURAK Felekoglu, et al. "Effects of steel fiber reinforcement on surface wear resistance of self-compacting repair mortars". *Cement & concrete composites* [en línea]. 2007, nº 29, pp 391-396. Disponible en www.sciencedirect.com.

CABRERA, J.G.; AL-HASAN A.S. "Performance properties of concrete repair materials". *Construction and Building Materials*. 1997, vol. 11, nº 5-6, pp 283-290.

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

CARBONELL DE MASY, Manuel. *Protección y reparación de estructuras de hormigón : aplicaciones de los nuevos materiales en edificios, obras hidráulicas y viales*. Omega, Barcelona. 1995. 180 p. ISBN: 8428210667.

CHAMPION, S. *Failure and Repair of Concrete Structures*. John Wiley and Sons, Inc. New York. 1961.

CHIN-TSUNG, Liu; JONG-SHING, Huang. "Highly flowable reactive powder mortar as a repair material". *Construction and Building Materials*. 2008, nº 22, pp 1043-1050.

CICCP. *Reparación y refuerzo de estructuras de hormigón: Guía FIP de buena práctica*. Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (CICCP), Madrid. 1994. 81 p. ISBN: 8438000797.

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

COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN: *EHE-08 Instrucción de hormigón estructural*. Ministerio de Fomento, Madrid. 2008.

DELIBES LINIERS, Adolfo; FERNÁNDEZ GOMEZ, Jaime. "Investigación sobre reparación de estructuras de hormigón armado dañadas por corrosión de armaduras". *Hormigón y acero*, 1993, 4º trimestre.

DRIZORO. "*Reparación y Protección de Estructuras de Hormigón. Recomendación Técnica*". [en línea]. [Ref. de 23 diciembre 2010]. Disponible en www.drizoro.com.

EN 1504 1-9: *Products and systems for the protection and repair of concrete structures*.

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

GRUNAU, EDVARD B. *Lesiones en el hormigón: reparación, protección*. Ceac, Barcelona. 1988. 108 p. ISBN: 8432920118.

GRUPO ESPAÑOL DEL HORMIGÓN (GEHO). *Morteros de reparación*. Boletín GEHO, nº 4. Madrid. 1989. ISBN: 8492072865.

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

GRUPO ESPAÑOL DEL HORMIGÓN (GEHO). *Durabilidad de estructuras de hormigón. Guía de diseño de CEB*, Boletín GEHO, nº 12. Madrid. 1993. Cap XIV, pp. 137-139.

GRUPO ESPAÑOL DEL HORMIGÓN (GEHO). *Reparación y refuerzo de estructuras de hormigón. Guía FIP de buena práctica*. Boletín GEHO, nº 14. Madrid. 1994.

HASSAN, K.E., et al. "Compatibility of repair mortars with concrete in a hot-dry environment". *Cement & Concrete Composites* [en línea]. 2001, nº 23. [ref. de 10 diciembre 2010], pp 93-101. Disponible en www.elsevier.com/locate/cemconcomp.

GOÑI, Sara. "Materiales autorreparables". En: Química del cemento. Curso de postgrado del CSIC. Curso de Máster Universitario Innovación Tecnológica en Edificación UPM. Madrid, España. 19 al 28 de enero de 2011. Vol 2, 21 p.

JIMÉNEZ MONTOYA, Pedro. *Hormigón armado*. 14ª Edición. Gustavo Gili, Barcelona. 2000. 629 p. ISBN: 9788425223075.

JOHNSON, S.M. *Deterioro, conservación y reparación de estructuras*. Editoriales Blume y Labor, Madrid, 1973, pp. 334.

MEDEIROS M.H.F., et al. "Influence of EVA and acrylate polymers on some mechanical properties of cementitious repair mortars". *Construction and building materials* [en línea]. 2009, nº 23, pp 2527-2533. Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

MEDINA SÁNCHEZ, Eduardo. "*Evaluación del comportamiento mecánico y estructural de las armaduras de acero inoxidable austenítico AISI 304 y DÚPLEX AISI 2304*". Tesis (Máster). Directores: Alfonso Cobo Escamilla y David Martínez Bastidas. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica, 2010.

MIRZAA, J., et al. "Laboratory and field performance of polymer-modified cement-

based repair mortars in cold climates”. *Construction and building materials* [en línea]. 2002, nº 16, pp 365-374. Disponible en www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

MORENO FERNÁNDEZ, Esther. “*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. Directores: **Dr. D.** Manuel Fernández Cánovas y **Dr. D.** Alfonso Cobo Escamilla. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Leganés, 2008.

MUÑOZ NOVAL, Alejandro. “*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*”. Directores: **Dr. Dña.** María del Carmen Andrade Perdriz y **Dr. D.** David Izquierdo López. Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, 2009.

NOUNU, G.; CHAUDHARY, Z. “Reinforced concrete repairs in beams”. *Construction and Building Materials*. 1999, vol. 13, pp 195-212.

“Página web de la Asociación de reparación, Refuerzo y Protección del hormigón”.
<www.arpho.org>

REHABCON. *Strategy for maintenance and rehabilitation in concrete structures*. Innovation and SME Program, EC DG ENTR-C-2. Manual. 2004, 145 p. IPS-2000-0063.

RIO BUENO, Alfonso del. “*Patología, reparación y refuerzo de estructuras de hormigón armado de edificación*” [en línea]. E.T.S. Arquitectura (UPM). 2008. [ref. De 4 marzo 2011]. Departamento Estructuras de edificación Disponible en <http://oa.upm.es/1159/>.

RIO BUENO, Alfonso del; ORTIZ HERRERA, Jesús. *Rehabilitación de Estructuras de Hormigón*. Monografías de la Agrupación Nacional de Constructores de Obras (A.N.C.O.P.), Madrid, 1991, pp. 103.

SWEDISH CONCRETE ASSOCIATION. *Cracks in concrete structures*. Concrete Report Nº. 3 (E). Swedish Concrete Association, *glue-bounded edition*. 1994. 85 p.

VALCUENDE PAYÁ, Manuel Octavio. *“Reparación de elementos lineales de hormigón armado. Comportamiento en servicio”*. Tesis doctoral. Director: **Dr. D.** Bernardo Pérez Ventura. Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, 1994. [En: Grupo Español del Hormigón. GEHO-CEB, 1994].

VIEITEZ CHAMOSÁ, J.A; J.L. RAMÍREZ ORTIZ. *Patología de la Construcción en España: Aproximación Estadística*. Resumen de Tesis Doctoral. Informes de la Construcción, Madrid, Octubre 1984, Vol 36, nº 1364, pp. 5-15.

ANEXO 1

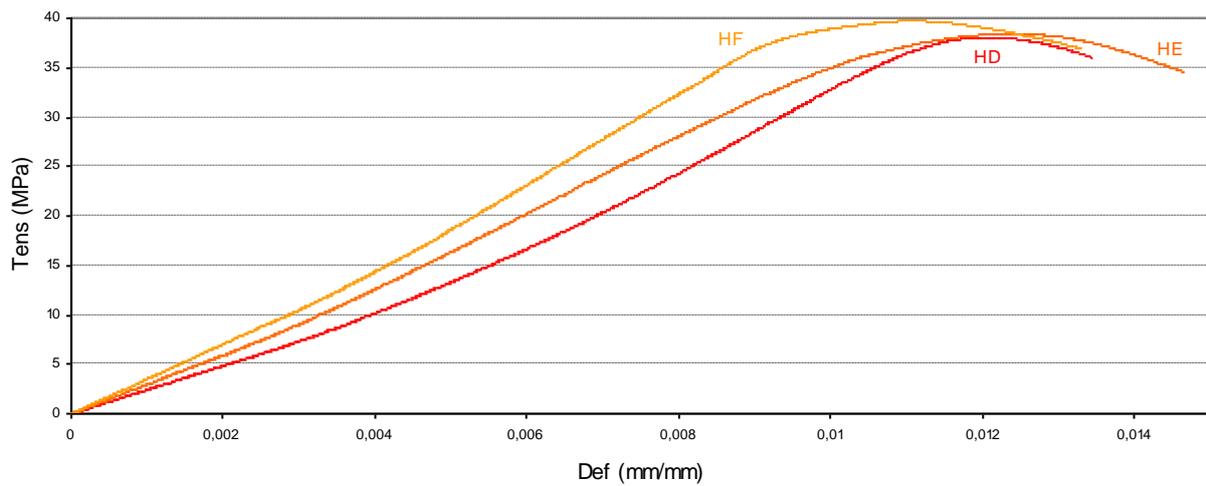
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN PROBETAS 1 MATERIAL.

A.1 RESULTADOS DE COMPRESIÓN DE UN MATERIAL

A.1.1 PROBETAS DE HORMIGÓN



Tensión-Deformación (HORMIGÓN)

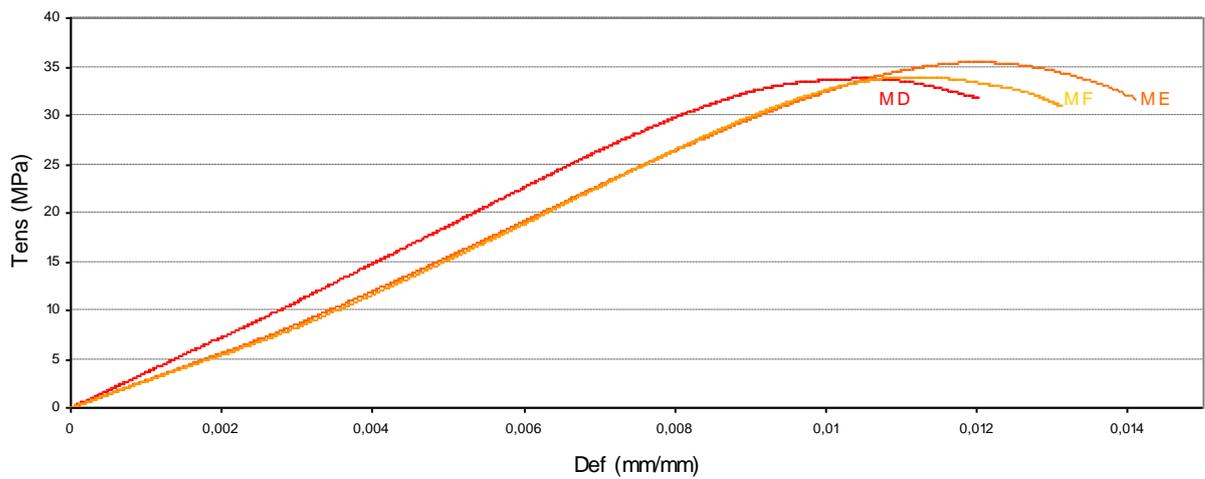


Probeta	Q máx. (KN)	$\epsilon_{\text{máx}}$ (%)	f_{cm} (N/mm ²)	Emáx. (N/mm ²)	$\Omega_{\text{máx}}$ (N/m ²)	Ω_u (N/mm ²)
HD	380,50	0,01211	38,05	3142,60	0,22039	0,27069
HE	384,22	0,01243	38,42	3089,19	0,25936	0,34119
HF	397,28	0,01102	39,73	3603,73	0,23388	0,32246

A.1.2 PROBETAS DE MORTERO DE CEMENTO



Tensión-Deformación (MORTERO DE CEMENTO)

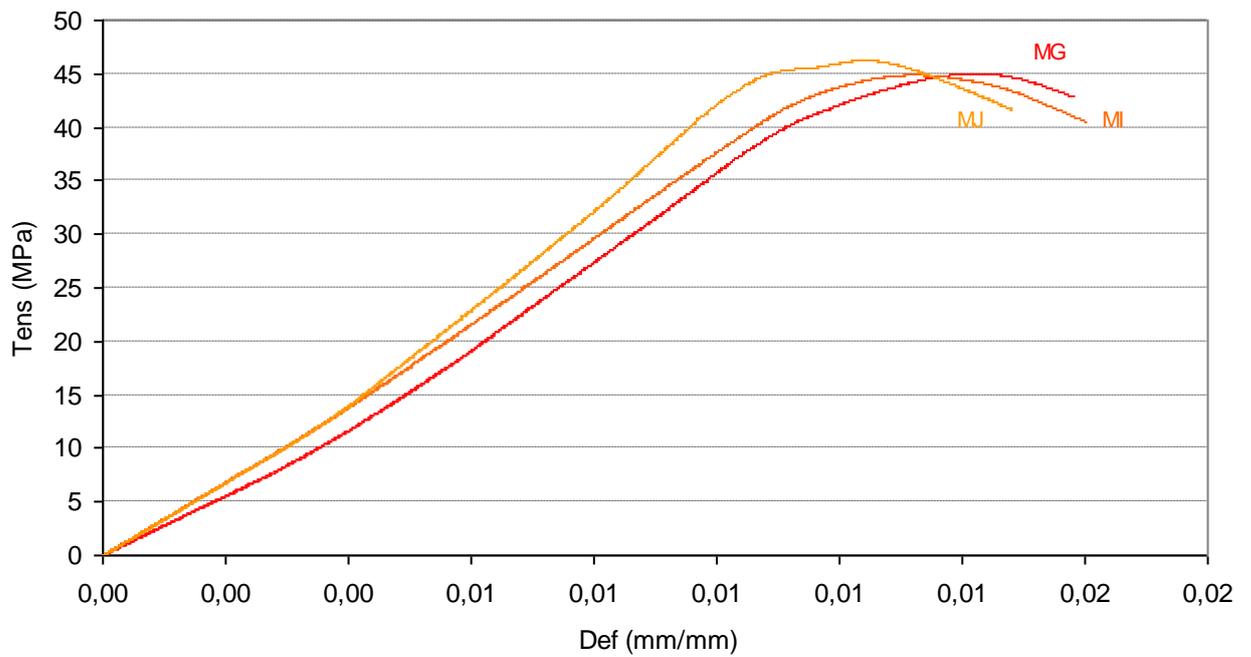


Probeta	Q máx. (KN)	$\epsilon_{\text{máx}}$ (%)	f_{cm} (N/mm ²)	$E_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\Omega_{\text{máx}}$ (N/m ²)	Ω_u (N/mm ²)
MD	337,97	0,01703	33,79	1984,73	0,19951	0,25132
ME	354,66	0,01198	35,46	2959,93	0,22681	0,30010
MF	339,62	0,01695	33,96	2003,79	0,19630	0,26072

A.1.3 PROBETAS DE BASE ORGÁNICA



Tensión - Deformación (MORTERO DE BASE ORGÁNICA)

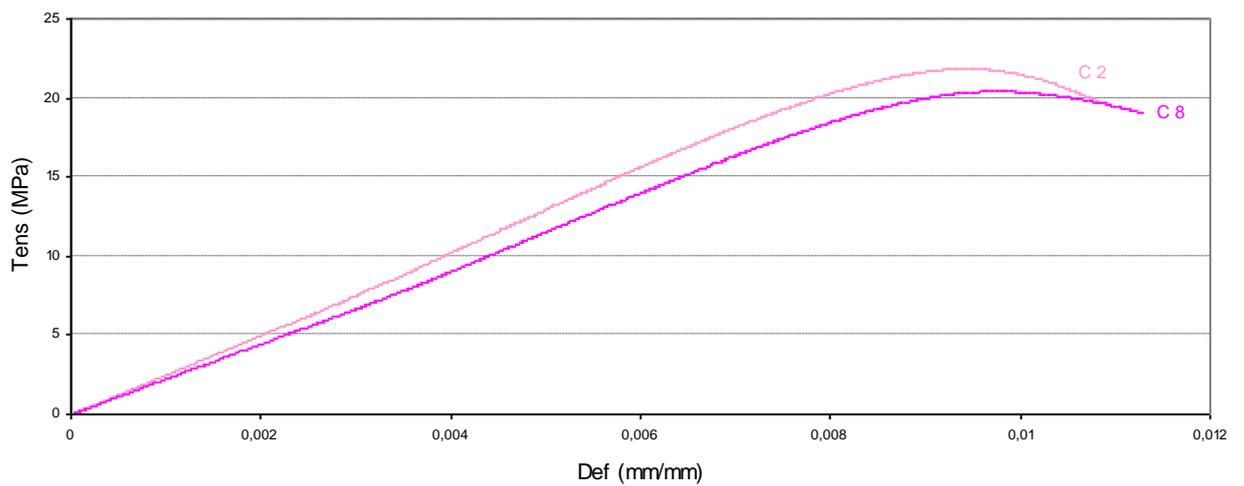


Probeta	Q máx. (KN)	$\epsilon_{\text{máx}}$ (%)	f_{cm} (N/mm ²)	$E_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\Omega_{\text{máx}}$ (N/mm ²)	Ω_u (N/mm ²)
MG	450,41	0,01422	45,04	3168,19	0,33869	0,40944
MI	448,91	0,01679	44,89	2672,99	0,31669	0,43867
MJ	462,52	0,01634	46,25	2829,84	0,30263	0,40804

A.1.4 PROBETAS CILÍNDRICAS



Tensión-Deformación (CILÍNDRICA 1 y 2)



Probeta	Q máx. (KN)	$\epsilon_{\text{máx}}$ (%)	f_{cm} (N/mm ²)	$E_{\text{máx.}}$ (N/mm ²)	$\Omega_{\text{máx}}$ (N/mm ²)	Ω_u (N/mm ²)
Cilíndrica 1	204,23	0,01094	20,42	1865,13	0,10764	0,13854
Cilíndrica 2	218,34	0,01056	21,83	2067,05	0,11243	0,14279

ANEXO 2

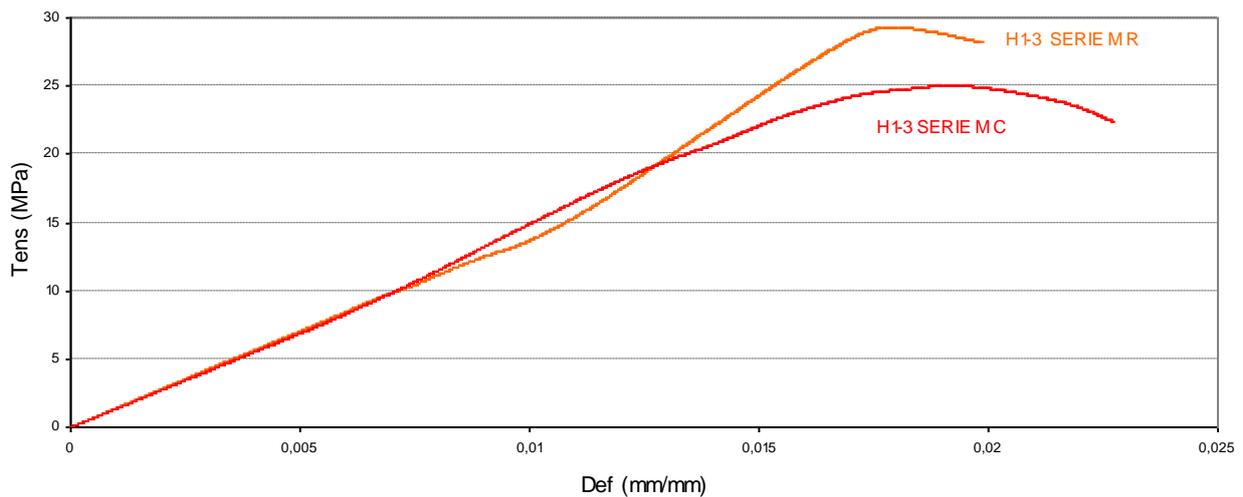
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN PROBETAS 2 MATERIALES.

A.2 RESULTADOS DE COMPRESIÓN DE DOS MATERIALES

A.2.1 PROBETAS DE HORMIGÓN-MORTERO DE REPARACIÓN EN SERIE



Tensión-Deformación (H1-3 SERIE)



Probeta	Q máx. (KN)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ (%)	f_{cm} (N/mm ²)	$E_{m\acute{a}x}$ (N/mm ²)	$\Omega_{m\acute{a}x}$ (N/mm ²)	Ω_u (N/mm ²)
H1-3C	293,19	0,03045	29,32	962,89	0,241	0,29920
H1-2C	317,51	0,03299	31,75	962,47	0,438	0,50668
H2-3C	340,27	0,02649	34,03	1284,64	0,336	0,38760

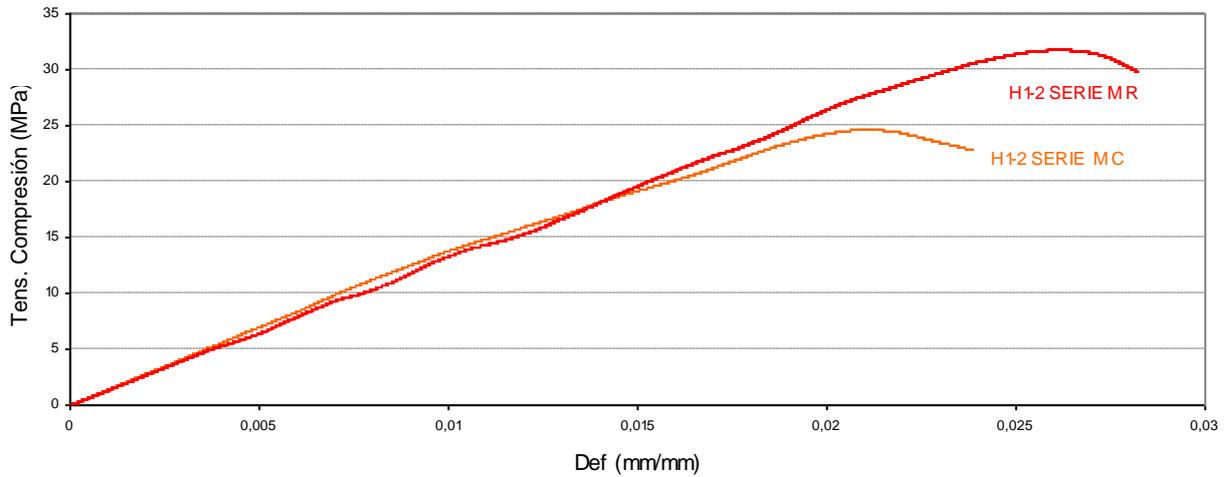
Tabla Resultados de los ensayos de compresión en serie de las probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación de base orgánica.

Probeta	Q máx. (KN)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ (%)	f_{cm} (N/mm ²)	Emáx. (N/mm ²)	$\Omega_{m\acute{a}x}$ (N/mm ²)	Ω_u (N/mm ²)
H1-3F	250,43	0,02571	25,04	973,99	0,264607	0,35006
H1-2F	246,38	0,02673	24,64	921,71	0,30869	0,39838
H2-3F	287,29	0,02170	28,73	1323,81	0,31919	0,40247

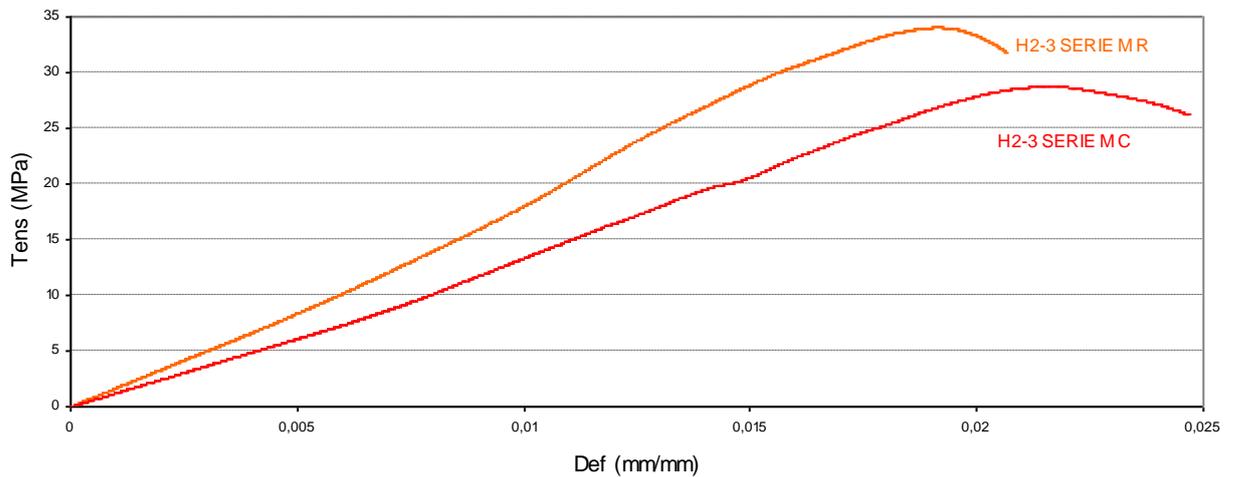
Tabla Resultados de los ensayos de compresión en serie de las probetas mixtas de hormigón-mortero de cemento tradicional.



Tensión-Deformación (H1-2 SERIE)



Tensión-Deformación (H2-3 SERIE)



A.2.2 PROBETAS DE HORMIGÓN-MORTERO DE REPARACIÓN EN PARALELO



Probeta	Q máx. (KN)	$\epsilon_{\text{máx}}$ (%)	f_{cm} (N/mm ²)	Emáx. (N/mm ²)	$\Omega_{\text{máx}}$ (N/mm ²)	Ω_u (N/mm ²)
H1-3A	353,01	0,02183	35,31	1617,08	0,31166	0,36181
H1-3B	378,05	0,02138	37,80	1767,93	0,31871	0,40108
H1-2A	318,67	0,02139	31,87	1489,71	0,28369	0,34019
H1-2B	292,27	0,02138	29,23	1366,87	0,29333	0,36866
H2-3A	359,83	0,01689	35,98	2129,32	0,34539	0,42752
H2-3B	288,99	0,01853	28,89	1559,49	0,30962	0,34440

Tabla Resultados de los ensayos de compresión en paralelo de las probetas mixtas de hormigón-mortero de reparación de base orgánica.

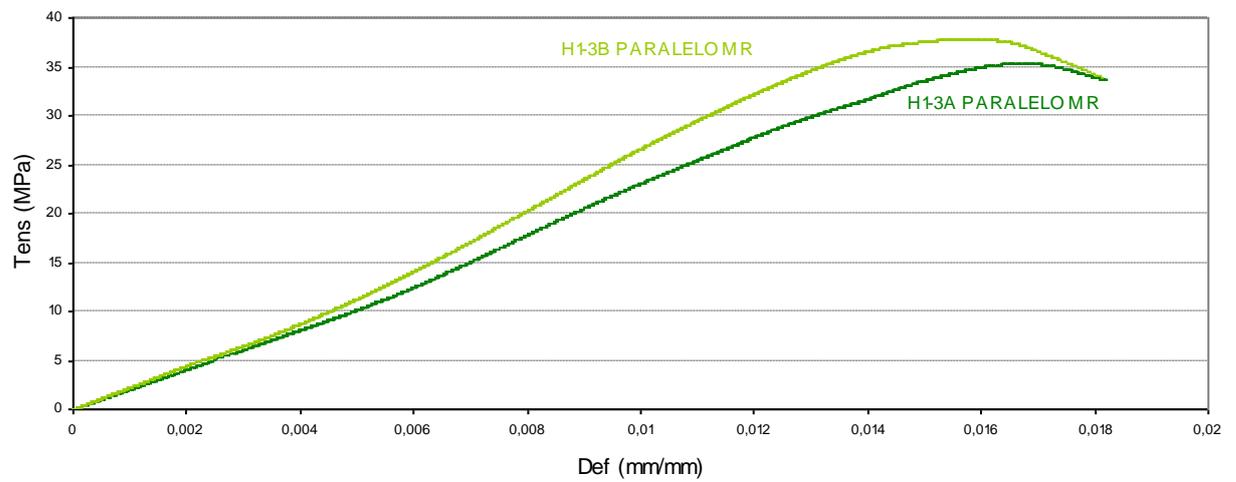
Probeta	Q máx. (KN)	$\epsilon_{\text{máx}}$ (%)	f_{cm} (N/mm ²)	Emáx. (N/mm ²)	$\Omega_{\text{máx}}$ (N/mm ²)	Ω_u (N/mm ²)
H1-3D	228,33	0,02074	22,83	1100,62	0,13242	0,43656
H1-3E	336,34	0,01505	33,63	2235,16	0,20539	0,27019
H1-2D	258,36	0,02850	25,84	906,52	0,53151	0,65642
H1-2E	340,06	0,01567	34,01	2168,78	0,23351	0,32381
H2-3D	305,44	0,02086	30,54	1463,73	0,29869	0,39961
H2-3E	227,98	0,02129	22,79	1070,42	0,17629	0,22234

Tabla 14 Resultados de los ensayos de compresión en paralelo de las probetas mixtas de

hormigón-mortero de cemento tradicional.

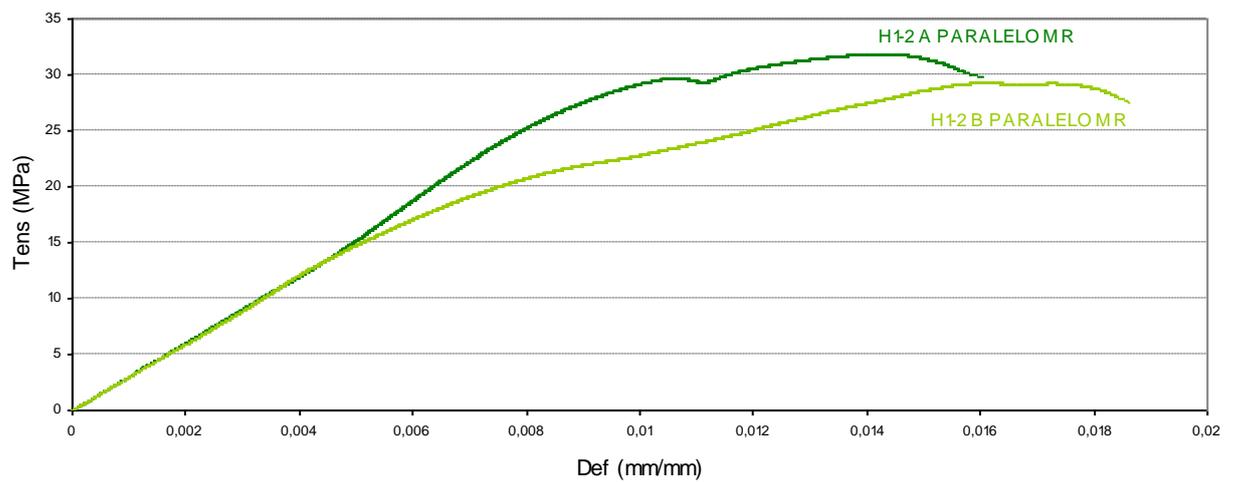


Tensión-Deformación (H1-3 PARALELO)

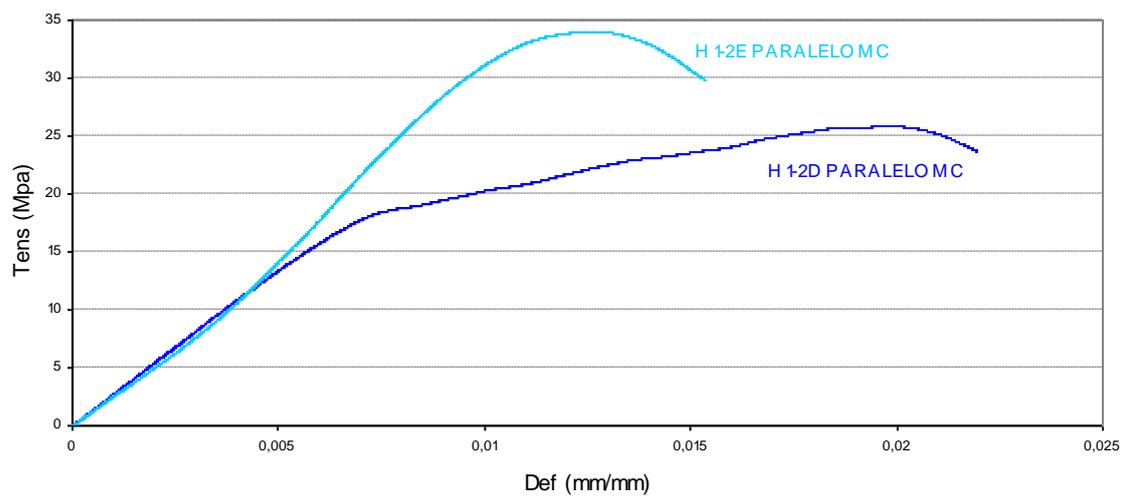


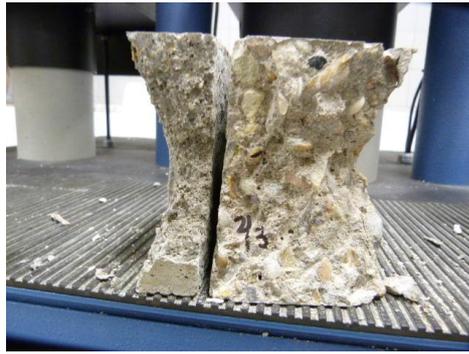


Tensión-Deformación (H1-2 PARALELO)

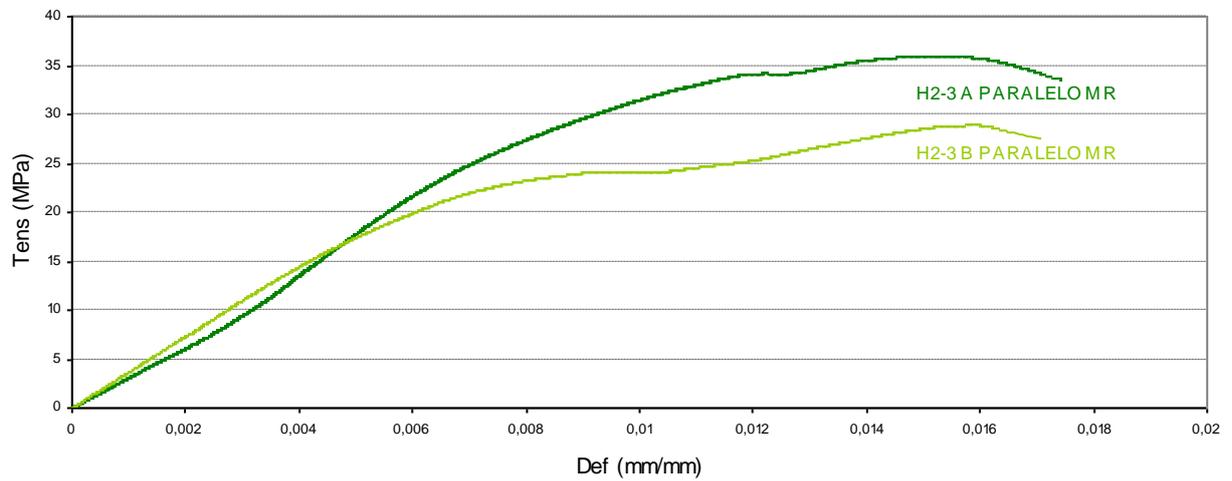


Tensión-Deformación (H1-2 PARALELO)

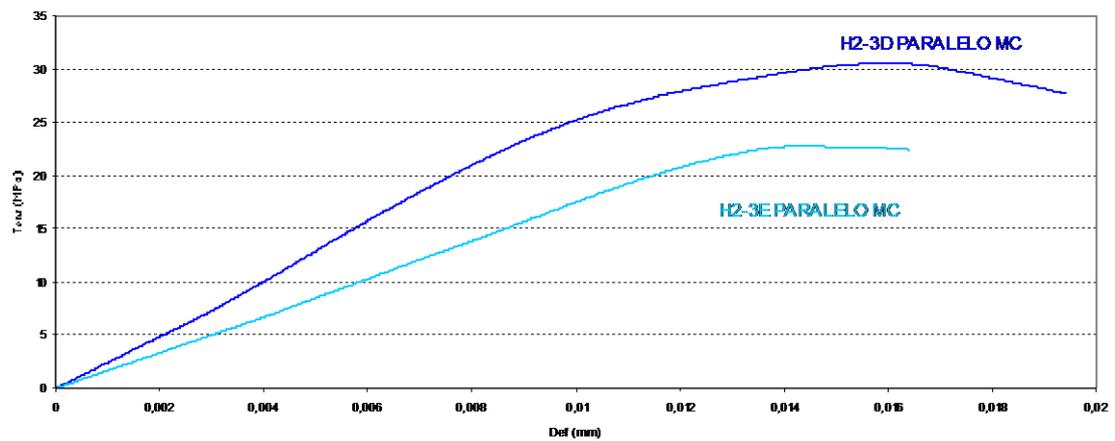




Tensión-Deformación (H2-3 PARALELO)



Tensión-Deformación (H2-3 PARALELO)



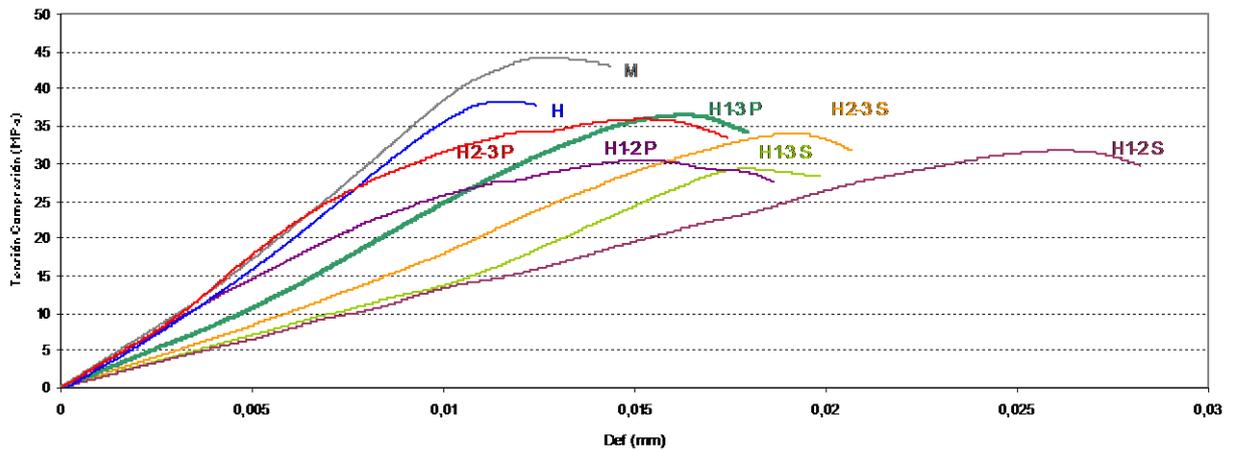
ANEXO 3

MEDIAS TOTALES DE LAS PROBETAS.

A.3.1 MEDIAS TOTALES HORMIGÓN - MORTERO DE RERARACIÓN DE BASE ORGANICA

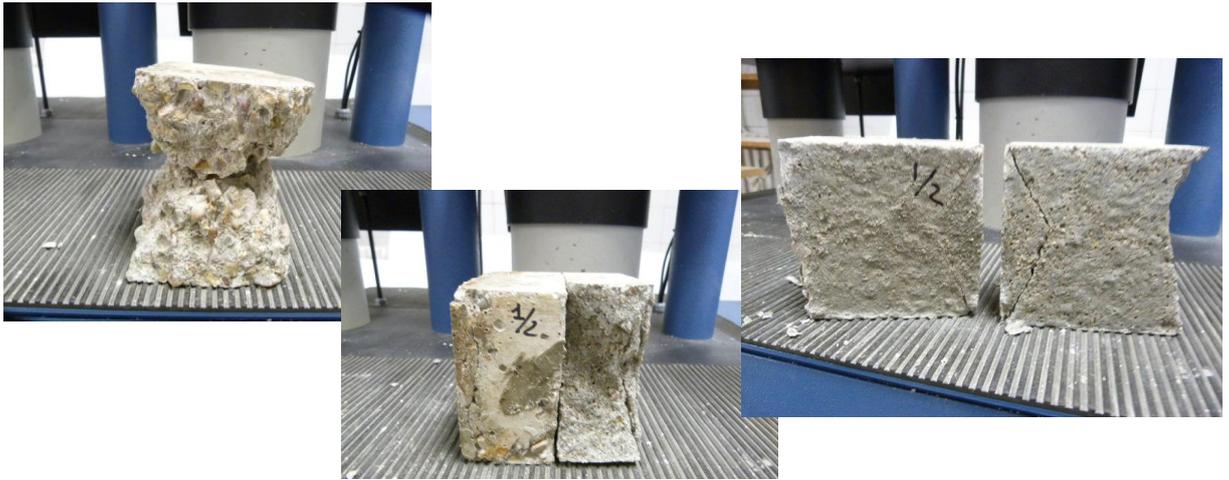


**Tensión-Deformación (MEDIAS TOTALES)
MORTERO DE REPARACIÓN**

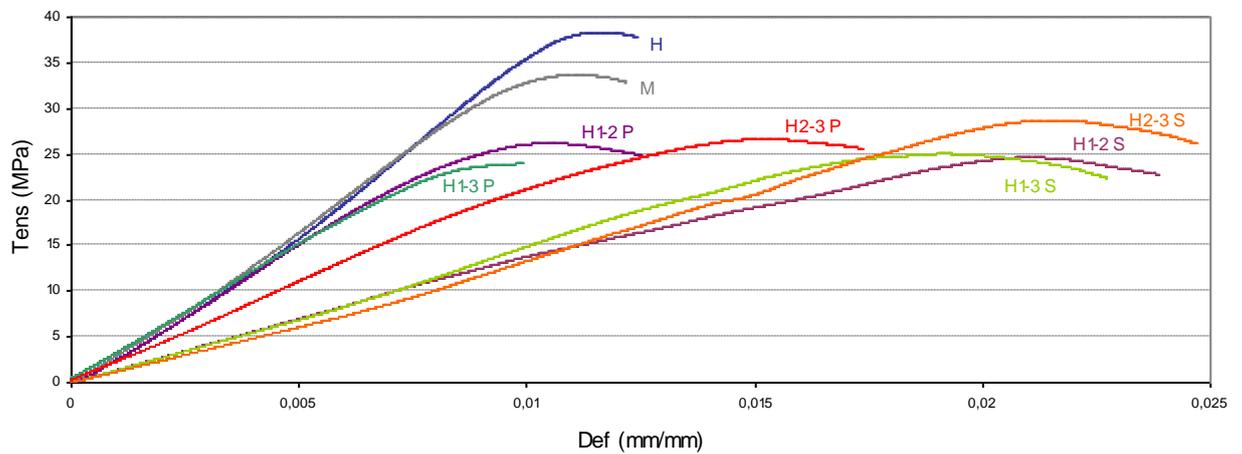


	Probeta	Q máx. (KN)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ (%)	f_{cm} (N/mm ²)	$E_{m\acute{a}x}$ (N/mm ²)	$\Omega_{m\acute{a}x}$ (N/mm ²)	Ω_u (N/mm ²)
COMPRESIÓN	H	387,34	0,0118	38,73	3278,51	0,2378	0,3114
	MR	453,95	0,0157	45,39	2890,34	0,3193	0,4187
PARALELO	H1-3 MR	365,53	0,0216	36,55	1692,51	0,3151	0,3814
	H1-2 MR	305,47	0,0214	30,55	1428,29	0,2885	0,3544
	H2-3 MR	324,41	0,0177	32,44	1844,41	0,3275	0,3859
SERIE	H1-3 MR	293,19	0,0304	29,32	962,89	0,2412	0,2992
	H1-2 MR	317,51	0,0329	31,75	962,47	0,4377	0,5066
	H2-3 MR	340,27	0,0264	34,03	1284,64	0,3356	0,3876

A.3.2 MEDIAS TOTALES HORMIGÓN - MORTERO DE CEMENTO



Tensión-Deformación (MEDIAS TOTALES)
MORTERO DE CEMENTO



	Probeta	Q máx. (KN)	$\epsilon_{\text{máx}}$ (%)	f _{cm} (N/mm ²)	Emáx. (N/mm ²)	$\Omega_{\text{máx}}$ (N/mm ²)	Ω_u (N/mm ²)
COMPRESIÓN	H	387,34	0,0118	38,73	3278,50	0,2378	0,3114
	MC	344,08	0,0153	34,41	2316,14	0,2075	0,2707
PARALELO	H1-3 MC	282,34	0,0179	28,23	1667,89	0,1689	0,3533
	H1-2 MC	299,21	0,0221	29,92	1537,64	0,3825	0,4901
	H2-3 MC	266,71	0,0211	26,67	1267,07	0,2374	0,3109
SERIE	H1-3 MC	250,43	0,0257	25,04	973,991	0,2646	0,3500
	H1-2 MC	246,38	0,0267	24,64	921,709	0,3086	0,3983
	H2-3 MC	287,29	0,0217	28,73	1323,80	0,3192	0,4024

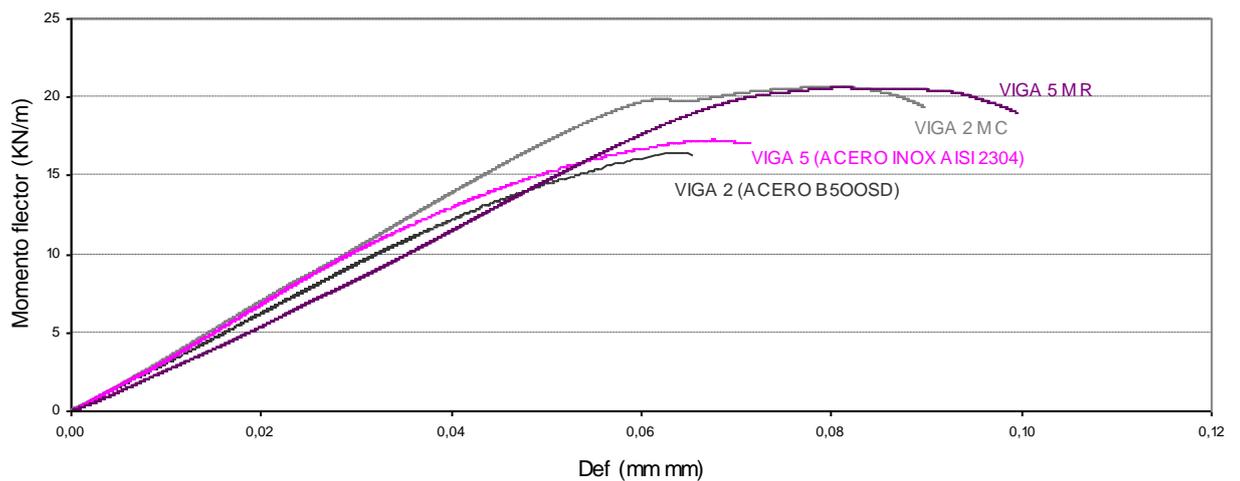
ANEXO 4

RESULTADOS DE LAS VIGAS SIN REPARAR Y REPARADAS.

A.4.1 VIGAS Ø16 mm



Carga - Deformación (VIGAS Ø16)

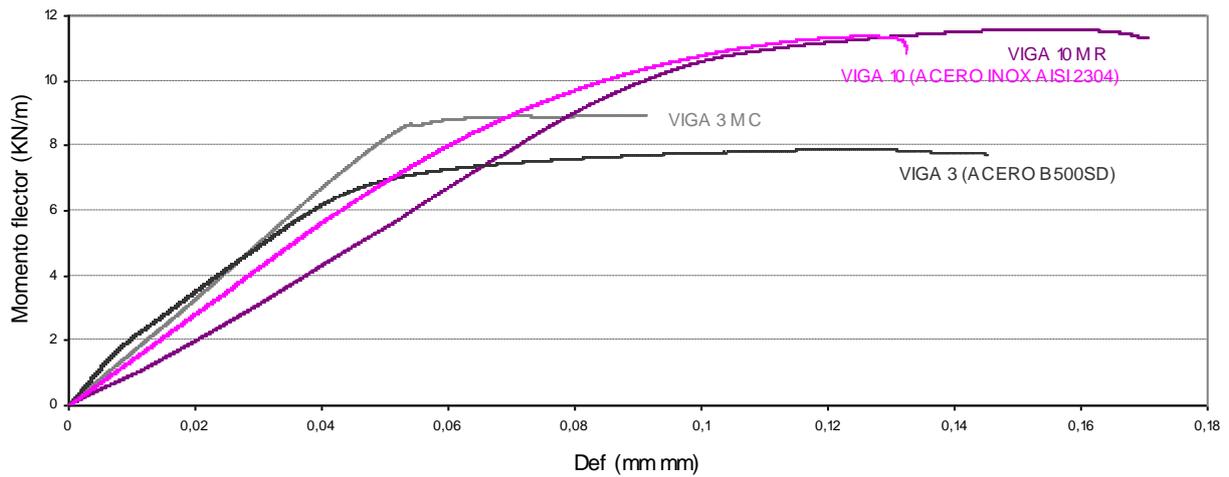


Vigas de Ø16 mm	Q máx. (KN)	ϵ máx. (mm mm)	Momento máx. (KN/m)	Anchura máxima de fisuras (mm)
VIGA 2	98,87582	0,08544117	16,47822885	0,10
VIGA 5	103,7104	0,08010005	17,28399219	0,10
VIGA 2_MC	123,819	0,07862041	20,63577681	0,50
VIGA 5_MR	124,3916	0,081209	20,61834253	0,40

A.4.2. VIGAS Ø8 mm



Momento - Deformación (VIGAS Ø8)



Vigas de Ø8 mm	Q máx. (KN)	ϵ máx. (mm mm)	Momento máx. (KN/m)	Anchura máxima de fisuras (mm)
VIGA 3	47,46182	0,1554049	7,909580146	0,30
VIGA 10	68,20938	0,1577592	11,36715552	0,30
VIGA 3_MC	54,26891	0,0880237	8,944366433	1,40
VIGA 10_MR	70,09991	0,1538379	11,58606208	1,50

ANEXO 5

CASOS PRÁCTICOS DE UTILIZACIÓN DE MORTEROS DE REPARACIÓN.

A.5.1 REPARACIÓN DEL DIQUE JUNTO A LA FORTALEZA DE SAN SALVADOR DE LA PUNTA – LA HABANA



Situación: Fortaleza de San Salvador de La Punta – La Habana – Cuba. Año 1999.

Empresa: Oficina del Historiador de la Ciudad de La Habana

Descripción: Reparación del dique mediante morteros estructurales

A.5.2 REPARACIÓN DE LOS ATRAQUES DE LA TERMINAL MARÍTIMA "HAIPHONG"



Nombre: atraques 1,2,3 y4 terminal marítima de haiphong. Septiembre 1999.

Lugar: la habana (cuba)

Tipo de obra: reparación de estructuras.

Descripción:

Saneamiento de hormigón deteriorado, pasivación de armaduras

Reparación y de estructuras de hormigones de muelles y diques

Imprimación como puente de unión

Impermeabilización y protección de las armaduras.

Fuente: <www.drizoro.com>