

# Análisis de la estructura porosa y ciclo de vida de morteros de reparación en base cemento con polímeros

## *Analysis of the porous structure and life cycle of polymer-modified cement based repair mortars*

Ángel González Lucas, Paula Villanueva, Jaime Fernández Gómez and María Jesús Rubio Encinas

**Resumen:** Los morteros de reparación deben ser capaces de reproducir, o incluso superar, las prestaciones del soporte en términos de resistencia y durabilidad. Además, los morteros de reparación deben tener una adherencia al soporte suficiente para garantizar el buen comportamiento de la estructura reparada. Se presentan los resultados de una campaña experimental llevada a cabo con dos morteros de reparación de base cemento, uno de los cuales ha sido formulado con un contenido de polímero de un 3,2% de la masa total. Los morteros han sido evaluados conforme a los estándares de la norma europea UNE-EN 1504 para morteros estructurales R4; además, se ha estudiado el comportamiento de ambos morteros en estado fresco y su estructura porosa y microestructura mediante porosimetría por intrusión de mercurio; adicionalmente, se han realizado ensayos de propiedades durables. Los resultados obtenidos indican un refinamiento de poros en el mortero con polímeros, mejorando sus prestaciones. Por último, se incluye un análisis comparativo del ciclo de vida de ambos morteros en dos ambientes con distinto nivel de agresividad, con objeto de evaluar la sostenibilidad y la repercusión a lo largo de la vida útil de la incorporación de polímero a los morteros de reparación.

**Palabras clave:** repair mortars, polymer-modified mortars, durability, structural repair

### 1. Introducción

Gran parte del patrimonio construido de obra civil y de edificación tiene estructura de hormigón; el hormigón armado está sometido a una exposición ambiental que puede causar su deterioro durante la vida útil de la estructura; para alargar la vida útil de las construcciones, se precisan planes de mantenimiento y, frecuentemente, acciones de rehabilitación. En la actualidad los trabajos de reparación y refuerzo de estructuras existentes representan una parte significativa del gasto anual en el sector de la construcción en distintas partes del mundo.

El interés creciente en el mantenimiento del patrimonio construido ha llevado al desarrollo de materiales específicos para estos trabajos. En proyectos de reparación debe eliminarse el hormigón dañado, reemplazándolo por un material que mejore o al menos reproduzca las prestaciones del soporte; dichas prestaciones se miden en términos de resistencia, y también de protección frente a la entrada de agentes agresivos [1][2]. Dentro de los materiales disponibles para reparación de hormigón armado, los morteros de reparación ocupan un lugar relevante ya que permiten restablecer la funcionalidad de las estructuras y recuperar el recubrimiento necesario para una adecuada protección de las armaduras [3].

Los morteros de reparación deben cumplir una serie de requisitos para garantizar una buena respuesta ante las sollicitaciones y una suficiente compatibilidad con el soporte; las propiedades exigibles a los

morteros de reparación se agrupan en: propiedades mecánicas, adherentes, de impermeabilidad y propiedades durables. Actualmente la norma europea UNE-EN 1504 "Productos y sistemas para la reparación y protección de hormigón" [4] recoge las prestaciones de los morteros de reparación y aporta una clasificación de los mismos para uso estructural y no estructural; las propiedades que deben cumplir los morteros de reparación se exponen en la norma atendiendo a los siguientes aspectos: resistencia a compresión, contenido en iones cloruro, adhesión, retracción/expansión controladas, resistencia a la carbonatación, módulo de elasticidad, coeficiente de dilatación térmica, resistencia al deslizamiento y absorción capilar y compatibilidad térmica en ciclos hielo-deshielo, lluvia tormentosa y ciclos secos.

Hoy en día existen dos vías de investigación en materiales de reparación, fundamentalmente: el desarrollo de nuevos materiales y el estudio de métodos para evaluar la idoneidad de los materiales de reparación existentes. Dicha idoneidad suele relacionarse con los principios básicos de la conservación expuestos por C. Brandi [5], y que siguen estando vigentes: reversibilidad, mínima interacción, durabilidad y compatibilidad; dentro de la compatibilidad existen factores químicos, fisicoquímicos y mecánicos que puedan proporcionar perdurabilidad en el tiempo [6].

La adherencia entre soporte y material aportado ha centrado gran parte de los estudios y desarrollos de los últimos años, en los que se ha buscado "integrar" los morteros de reparación en la estructura empleando naturalezas químicas que tradicionalmente se empleaban como promotores de adherencia. Como parte de este intento de incrementar la adherencia al soporte, aparecieron morteros poliméricos que tenían los inconvenientes de un coste elevado y unas prestaciones mecánicas demasiado distintas a las del hormigón. Una alternativa de reciente desarrollo son los morteros de reparación de base cementosa pero modificados con polímeros, habiendo aparecido una gama muy completa de morteros para aplicaciones específicas de reparación; la mayoría de morteros con polímeros se emplean para reparaciones cosméticas y de revestimiento, pese a que también pueden ser aptos para rehabilitación estructural con una dosificación adecuada. Con carácter general, los morteros de reparación de cemento con polímeros presentan una mayor adherencia y una mayor resistencia a la penetración de agentes agresivos.

## **2. Campaña experimental**

Se han ensayado dos morteros en base cemento: un mortero de referencia sin polímeros, al que se ha denominado M-A, y un mortero con un contenido de polímero de un 3,2% sobre la masa total, M-B. Los morteros han sido dosificados para cumplir los requisitos a corto plazo de la norma UNE-EN 1504 [4] para morteros de reparación estructural R-4 según los ensayos de resistencia a compresión, módulo de elasticidad y adherencia a tracción directa.

### **2.1. Granulometría de los morteros ensayados**

Para la selección del contenido de polímeros, se realizaron estudios previos con distintas cantidades buscando la dosificación que lograra alcanzar las prestaciones mecánicas exigidas por la norma UNE-EN 1504; en estos estudios previos se ensayaron varios contenidos de polímero desde un 2% hasta un 25% de la masa total; se concluyó que un contenido de 3,2% permitía cumplir la mayoría de requisitos de la norma, con un equilibrio entre la resistencia a compresión y el módulo elástico.

La granulometría de los morteros M-A y M-B se ajustó para conseguir un esqueleto granular de gran compacidad; en el caso de M-B, el esqueleto granular se considera como el conjunto de áridos y polímero. Ambos morteros tienen curvas granulométricas similares, como puede apreciarse en la figura 1.

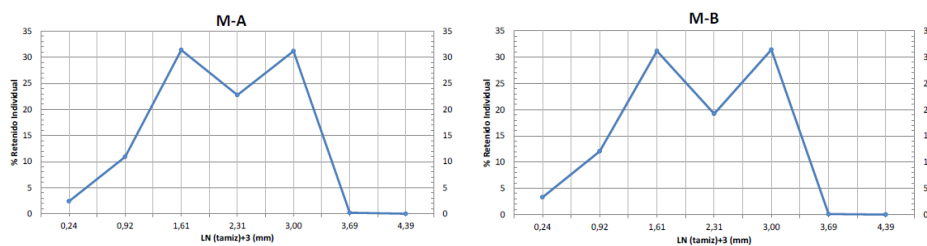


Figura 1. Curvas granulométricas de los morteros M-A y M-B.

La influencia de la incorporación de polímero en la compacidad del esqueleto granular se consideró como un paso previo al estudio de la porosidad y durabilidad de los morteros. Por ello se analizó el porcentaje de huecos en la mezcla de áridos; el cálculo se realizó siguiendo la metodología expuesta en la norma UNE-EN 1097-6 [7], con ciertas modificaciones motivadas por la presencia de polímero: para evitar el desencapsulamiento del polímero, el ensayo se realizó con acetona en lugar de agua, de forma que el polímero quedara incluido entre los áridos del mortero M-B. El porcentaje de hueco obtenido según el método seguido fue de 36,1 para M-A y de 34,13 para M-B; la menor cantidad estimada de huecos en M-B sugiere una mejor acomodación de los áridos, que hace esperable una mejor densificación del material en estado endurecido.

## 2.2 Caracterización de los morteros en estado fresco

La caracterización de los morteros en estado fresco se llevó a cabo con objeto de analizar la influencia de la incorporación de polímero en la trabajabilidad del mortero, y también para correlacionar las propiedades en estado fresco con las prestaciones mecánicas de ambos morteros.

Para la caracterización de los morteros en estado fresco se evaluó la consistencia de M-A y M-B con una mesa de sacudidas, según el procedimiento de la norma UNE-EN 13395-2:2002 [8]; se estimó el contenido de aire ocluido y se midió el tiempo de fraguado con un equipo de aguja Vicat siguiendo el método escrito en UNE-EN 196-1:2005 [9] distinguiendo entre tiempo de inicio de fraguado y final de fraguado y calculando el tiempo de fraguado como la diferencia entre los el final y el inicio de fraguado.

## 2.3 Caracterización de las propiedades físicas

Los ensayos de caracterización de las propiedades físicas se realizaron atendiendo a los criterios de clasificación de morteros de reparación estructural de la norma UNE-EN 1504 [4]. Se efectuaron ensayos de resistencia a compresión y flexión, módulo de elasticidad, adherencia a tracción directa, expansión/retracción y adherencia a tracción tras el proceso de expansión/retracción. La resistencia a compresión se estimó conforme a la UNE-EN 12190:1999 [10], a 28 días; la resistencia a flexión a 28 días se ensayó con el método de carga en tres puntos expuesto en la norma UNE-EN 196-1 [9]; el módulo elástico se estimó aplicando la norma UNE-EN 13412:2008.

Como se indicó anteriormente, la adherencia a tracción directa es una propiedad crítica en los morteros de reparación, ya que lo que se evalúa es la capacidad del nuevo material de adherirse al soporte original y trabajar solidariamente con el mismo. La adherencia a tracción directa de M-A y M-B se ensayó según el procedimiento de la norma UNE-EN 1542:2000 [12]; se evaluó la degradación de la adherencia a tracción directa tras un procedimiento de expansión/retracción y tras ciclos hielo deshielo; la norma detalla la adhesión exigible tras un proceso en que entre en juego la compatibilidad térmica de los materiales, y sugiere tres sistemas: ciclos hielo/deshielo, lluvia tormentosa y ciclos secos.

## 2.4 Ensayos para estudiar la estructura porosa y las propiedades microestructurales

La influencia de la inclusión de polímero en la microestructura de los morteros de reparación era el principal objetivo de la presente investigación. La estructura porosa y la microestructura están muy relacionadas con el comportamiento a largo plazo y con la capacidad de los morteros de reparación de proteger al soporte de la penetración de agentes agresivos.

Se realizaron pruebas de porosimetría por intrusión de mercurio en M-A y M-B a edades de 28, 60 y 90 días desde su fabricación, lo que permitió estudiar la evolución de la porosidad total, del diámetro umbral, del diámetro crítico (definido como el predominante en la muestra ensayada) y de la distribución del tamaño de poro. El límite de intrusión apreciable para la determinación del diámetro umbral se fijó en un incremento del 2%.

## 2.5 Ensayos de caracterización de la durabilidad

Se realizaron los ensayos contemplados por la norma UNE-EN 1504 [4]: absorción capilar, resistencia a la carbonatación y adherencia a tracción directa tras ciclos hielo-deshielo, junto con ensayos complementarios para un análisis más exhaustivo de las propiedades durables: resistencia a la abrasión, y resistencia al ataque por sulfatos.

La absorción capilar se ensayó conforme a norma UNE-EN 13057:2002 [13], calculando la absorción de agua por unidad de superficie en cada incremento de tiempo. La resistencia a la carbonatación se evaluó obteniendo el perfil de carbonatación y la profundidad de carbonatación en las condiciones establecidas por la norma UNE-EN 13295:2005 [14].

La adherencia a tracción directa es crítica para el cumplimiento de los requisitos de la norma UNE-EN 1504 [4] para morteros de reparación estructural R4. Para estimar la degradación de la adherencia a tracción directa se ensayaron probetas sometidas a 50 ciclos hielo-deshielo.

Para ensayar la resistencia al ataque por sulfatos y agua de mar se siguió la norma francesa NF P 18-837:2003 [15], con medidas a 1, 2, 3, 4, 5 y 6 meses. La resistencia a la abrasión se evaluó según el procedimiento descrito en UNE 28250:2005 [16], con un abrasímetro Taber.

## 3. Discusión de resultados

### 3.1 Propiedades en estado fresco

Los ensayos de determinación de la consistencia realizados para M-A y M-B revelan una menor docilidad del mortero sin polímero, con un menor diámetro de extensión inicial y menor trabajabilidad a lo largo del tiempo. La consistencia de M-B se considera más idónea para trabajos de reparación, al facilitar la manipulación y aplicación del mortero en distintas superficies.

Tabla 1. Evolución del diámetro de extensión de M-A y M-B

	Diámetro de extensión (mm)	
	6 minutos	45 minutos
M-A	162	140
M-B	179	160

La estimación del contenido de aire ocluido es del orden de un 40% inferior en M-B. Esto es explicable por la mejor trabajabilidad del mortero con polímero, que habría permitido una mejor expulsión del aire. Los porcentajes de aire ocluido para las muestras ensayadas son de 6,7% y 4% en los morteros M-A y M-B, respectivamente.

El tiempo de fraguado es una propiedad que, al igual que la trabajabilidad, condiciona las aplicaciones en obra de los morteros de reparación. Los ensayos realizados sobre esta propiedad revelan que la incorporación de polímeros incrementa ligeramente el tiempo de fraguado, que pasa de ser 390 minutos en M-A a 420 minutos en M-B.

### 3.2 Propiedades físicas

En la tabla 2 se muestran los resultados de los ensayos de compresión, flexotracción y el módulo elástico de M-A y M-B. No hay una diferencia apreciable en la resistencia a compresión de ambos morteros; sin embargo, la resistencia a flexocompresión sí se ve muy afectada por la inclusión de polímero, experimentándose un incremento de un 22% en M-B que a su vez puede relacionarse con una mejora en las condiciones de fisuración que previsiblemente influirá en las propiedades a largo plazo.

La norma UNE-EN 1504 incluye el módulo de elasticidad entre los parámetros para la clasificación de los morteros de reparación como R-4. Cabe destacar que el valor de la norma no es muy restrictivo, cumpliendo ambos morteros holgadamente; dentro de los márgenes normativos, se considera que un módulo elástico menor permitirá una mayor tolerancia a las variaciones dimensionales entre el material de reparación y el soporte. La adherencia a tracción directa mejora con la incorporación de polímero; por todo ello puede afirmarse que el mortero M-B presenta una mayor adecuación a la situación de la reparación estructural de hormigón armado, desde la perspectiva de las propiedades físicas.

Tabla 2. Propiedades físicas de M-A y M-B

	Resistencia a compresión a 28 días (MPa)	Resistencia a flexotracción a 28 días (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Adhesión (MPa)
M-A	54.2	5.6	36.7	2.6
M-B	55.3	7.2	32.3	2.5
Referencia R-4	≥ 45	-	≥ 20	≥ 2

### 3.3 Estructura porosa y microestructura

La porosidad total y la distribución de poros en una muestra en distintas edades permiten comparar la hidratación del cemento en M-A y M-B. Además, es un modo de relacionar las propiedades durables con las propiedades microestructurales de los morteros, de modo que servirá de referente, sobre todo, en las propiedades relacionadas con la resistencia a la penetración de agentes agresivos. La figura 3 representa la evolución de la porosidad total y de la distribución de poros a distintas edades. Se aprecia una mejora en porosidad total con la adición de polímero en todas las edades, así como un refinamiento de la estructura porosa.

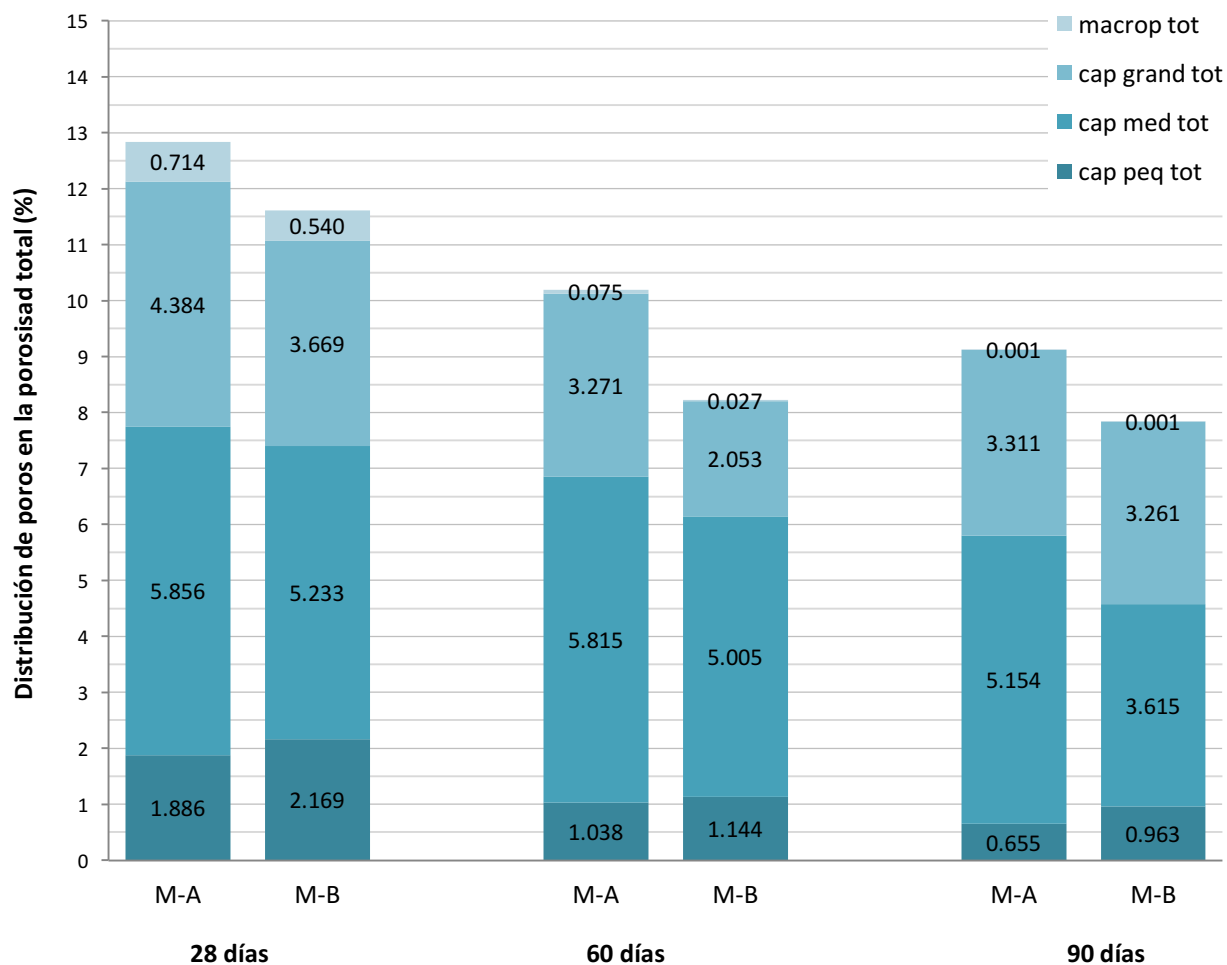


Figura 3. Distribución de poros y porosidad total en M-A y M-B a 28, 60 y 90 días

Los resultados del análisis de muestras a 28 días con porosimetría por intrusión de mercurio se presentan en la tabla 3. Se aprecia una menor intrusión en M-B en todas las edades, relacionada con un menor diámetro tanto de diámetro umbral como de diámetro de poro crítico. A 28 días la reducción del diámetro umbral es de un 63%, reducción que alcanza un 65% a 90 días indicando un mayor refinamiento de la estructura porosa. Puede concluirse que el mortero M-B tendrá una correcta hidratación, ya que un diámetro umbral bajo se relaciona con la buena hidratación del cemento; presumiblemente a distribución de poros y porosidad total de M-B aportarán unas mejoras propiedades durables al mortero con polímeros, y una mayor resistencia a la penetración de agentes agresivos.

Tabla 3. Propiedades observadas en la porosimetría por intrusión de mercurio

	28 días		60 días		90 días	
	Diámetro de poro umbral (μm)	Diámetro de poro crítico (μm)	Diámetro de poro umbral (μm)	Diámetro de poro crítico (μm)	Diámetro de poro umbral (μm)	Diámetro de poro crítico (μm)
M-A	0.68	0.022	0.55	0.018	0.43	0.016
M-B	0.43	0.018	0.35	0.015	0.28	0.014

### 3.4 Propiedades durables

Los resultados de los ensayos contenidos en la norma UNE-EN 1504 se presentan en la tabla 4. Si bien ambos morteros podrían catalogarse como R4 por su absorción capilar, cabe destacar que el mortero M-B presenta una mejora de un 42% en esta propiedad. La resistencia a la carbonatación también es afectada positivamente por la inclusión de polímero; la baja profundidad de carbonatación de M-B lo hace especialmente apropiado para reparación de hormigón, ya que proporcionará una mayor protección al soporte. La adherencia a tracción directa es, como se ha señalado anteriormente, especialmente crítica para la idoneidad de morteros de reparación estructural; la adherencia a tracción directa tras los ciclos hielo/deshielo es un 4% superior en M-B que en M-A; la reducción de la resistencia respecto al valor a 28 días ha sido de un 12% en M-A y de un 11% en M-B.

Tabla 4. Propiedades durables de M-A y M-B conforme a UNE-EN 1504

	Profundidad de carbonatación	Absorción capilar ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 3\text{h}^{-0.5}$ )	Resistencia tracción directa tras 50 ciclos hielo/deshielo (MPa)
M-A	1.67	0.07	2.2
M-B	0.57	0.04	2.3
Referencia R-4	$\text{dk}\leq\text{Control}$	$\leq 0.5$	$\geq 2$

La figura 4 recoge la expansión de las muestras de M-A y de M-B en diferentes medios. En agua potable se observa que M-B duplica la expansión de M-A en el primer mes, pero estabiliza antes su expansión. Una vez estabilizados, M-A presenta una mayor expansión. Sumergidos en agua de mar, la expansión de ambos morteros se estabiliza a los tres meses, siendo la expansión del mortero con polímeros un 5% superior a la del mortero de referencia. En una solución de sulfatos, el comportamiento de ambos morteros es muy similar no observándose una influencia significativa de la adición de polímero en el comportamiento ante ataque por sulfatos. De los resultados de expansión en diferentes medios puede concluirse que el mortero M-A de referencia tiene un mejor comportamiento frente al ataque por cloruros.

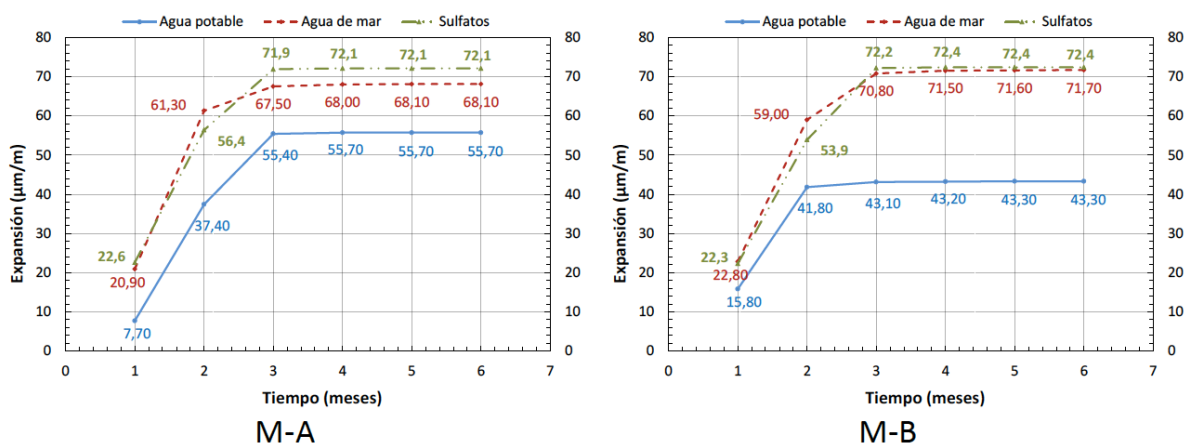


Figura 4. Expansión de los morteros en diferentes medios

La resistencia a la abrasión presenta tendencias similares en ambos morteros, registrándose las mayores pérdidas en los primeros ciclos de ensayo. En la tabla 5 se aprecia que el índice de desgaste es considerablemente mayor para M-A, suponiendo la incorporación de polímero una optimización significativa de la resistencia al desgaste.

Tabla 5. Índice de desgaste de M-A y M-B (mg/ciclos)

	250 ciclos	500 ciclos	1000 ciclos
M-A	7.67	5.83	4.43
M-B	3.45	2.57	1.81

Como resumen del estudio de las propiedades durables, se tiene que el mortero con polímeros presenta una mejora de todas las propiedades exceptuando la expansión en solución de cloruros y sulfatos. La significativa disminución de la velocidad de carbonatación y de la absorción capilar, relacionadas con el refinamiento de la estructura porosa en el mortero M-B, hacen de este un mortero óptimo para reparaciones estructurales. Incluso ante ataques por cloruros y sulfatos se prevé que la baja porosidad dificultará la penetración de estos agentes agresivos no alteando la vida útil del hormigón de soporte.

#### 4. Análisis del Ciclo de Vida

El Análisis del Ciclo de Vida de la cuna a la tumba permite analizar los beneficios potenciales a largo plazo y la sostenibilidad de los materiales de reparación, mediante la cuantificación del uso de recursos (“entradas” como energía, agua y materias primas) y emisiones ambientales generadas (“salidas” al aire, suelo y agua). En este caso se ha estudiado el impacto de la incorporación de polímero y de un inhibidor de corrosión en la vida útil de la reparación.

Se ha partido de dos escenarios distintos para evaluar la sostenibilidad de una reparación con los morteros M-A y M-B en distintas condiciones de agresividad ambientales. Los escenarios se han definido conforme a la norma española EHE-08 [17]. El primer escenario corresponde a un ambiente IIb, de clase normal en términos de agresividad y con una humedad media proporcionada por el agua de lluvia para precipitaciones anuales inferiores a 600 mm; el escenario se ha elegido para ejemplificar la situación de construcciones exteriores protegidas del agua de lluvia, tableros y pilas de puentes., El segundo escenario es un ambiente marino de tipo IIIa, entendiéndose como tal en proximidad a la línea costera (a menos de 5 km de esta); este escenario es representativo de un ambiente agresivo con presencia de corrosión por cloruros, siendo ejemplos de estructuras con este tipo de exposición las áreas de diques, pantalanés e instalaciones portuarias.

Para evaluar la sostenibilidad de las edificaciones, es preciso conocer la frecuencia de reparación para los morteros M-A y M-B en los dos escenarios propuestos y en base a las prestaciones de ambos morteros. La tabla 5 resume la tecnología y frecuencia de reemplazamiento de los morteros estudiados, basada en una vida útil de 25 años.

Tabla 5. Frecuencia de reparación en escenarios IIb y IIIa

	Aplicación y tecnología	Imprimación	IIb	IIIa
M-A	Reparación con mortero cementoso	Imprimación epoxi-cemento de refuerzo con inhibidor de corrosión	2 (cada 8,3 años)	4 (cada 5 años)
M-B	Reparación con mortero cementoso con polímeros e inhibidor de corrosión		1 (tras 12,5 años)	2 (cada 8,3 años)

El Análisis del Ciclo de Vida se realiza teniendo en cuenta las entradas y salidas generadas en todas las etapas de la vida de la reparación. Se distingue entre “Fase de Producto” o cuna a puerta, que incluye los impactos de las materias primas utilizadas, su transporte a la fábrica y la producción de todos los sistemas utilizados, “Fase de Aplicación” que tiene en cuenta el transporte a la obra y la aplicación, “Fase de Uso” que incluye todos los productos y procesos necesarios para la reparación y “Fase de Fin de la Vida” incluyendo el transporte al vertedero de los sistemas usados (a lo largo de los 25 años de vida útil).. Todos



los datos empleados para el Análisis del Ciclo de Vida provienen de morteros y componentes de la empresa SIKA S.A.U.; habiéndose incluido los datos de transporte relativos a los centros de producción y proveedores y la planta de morteros de SIKA S.A.U. en Alcobendas. Los datos de aplicación (“de la Puerta a la Obra”) se han calculado para una distancia de la fábrica a la puesta en obra de 500 km, para los dos escenarios evaluados. Debido a que en la composición de morteros no se utiliza ningún tipo de materia prima que pueda generar emisiones a la atmósfera y que la aplicación de este tipo de morteros de reparación suele efectuarse de forma manual, con rodillo, no se han considerado emisiones de gases contaminantes durante la instalación. Las renovaciones se han calculado a partir de los datos de frecuencia de aplicación expuestos en la tabla 4. Para el transporte a vertedero se ha considerado una distancia de 50 km; no se han tenido en cuenta emisiones derivadas de la demolición, puesto que habrían de incluirse en la estructura principal de la que la reparación es una pequeña fracción.

El presente Análisis del Ciclo de Vida (ACV) fue realizado por SIKA Corporate Product Sustainability Group conforme a las normas ISO 14040:2006 [18] y EN 15804:2012 [19], empleando el software ACV GaBi 6.3.

En el ámbito de sistemas de reparación de hormigón se identifican tres categorías de impacto que son evaluadas por el Análisis del Ciclo de Vida: la CED, o Demanda de energía acumulada, que refiere la energía consumida en todo el ciclo de vida del producto procedente de fuentes renovables y no renovables; el GWP, o Potencial de Calentamiento Global, que estima la contribución de las emisiones generadas al cambio climático; y PCOF o Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico, que mide la contribución potencial a la calima en verano o contaminación estival, por la inducción de ozono debida a la incidencia de la luz solar en compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno.

#### 4.1 Discusión de resultados del Análisis del Ciclo de Vida

El impacto inicial, relativo a la fabricación del mortero, es mayor en M-B. Sin embargo, las altas prestaciones del mortero con polímero e inhibidor de corrosión reducen la necesidad de reparaciones periódicas y con ello la suma de impactos a lo largo de la vida útil de la estructura. El total de material empleado en una vida útil de 25 años sería de 77,4 kg para M-A y de 51,6 kg para M-B en el escenario IIb, y de 129 kg para M-A y 77,4 kg para M-B en el escenario IIIa.

Las figuras 4, 5 y 6 presentan las tres categorías de impacto consideradas para los dos morteros en los escenarios estudiados.

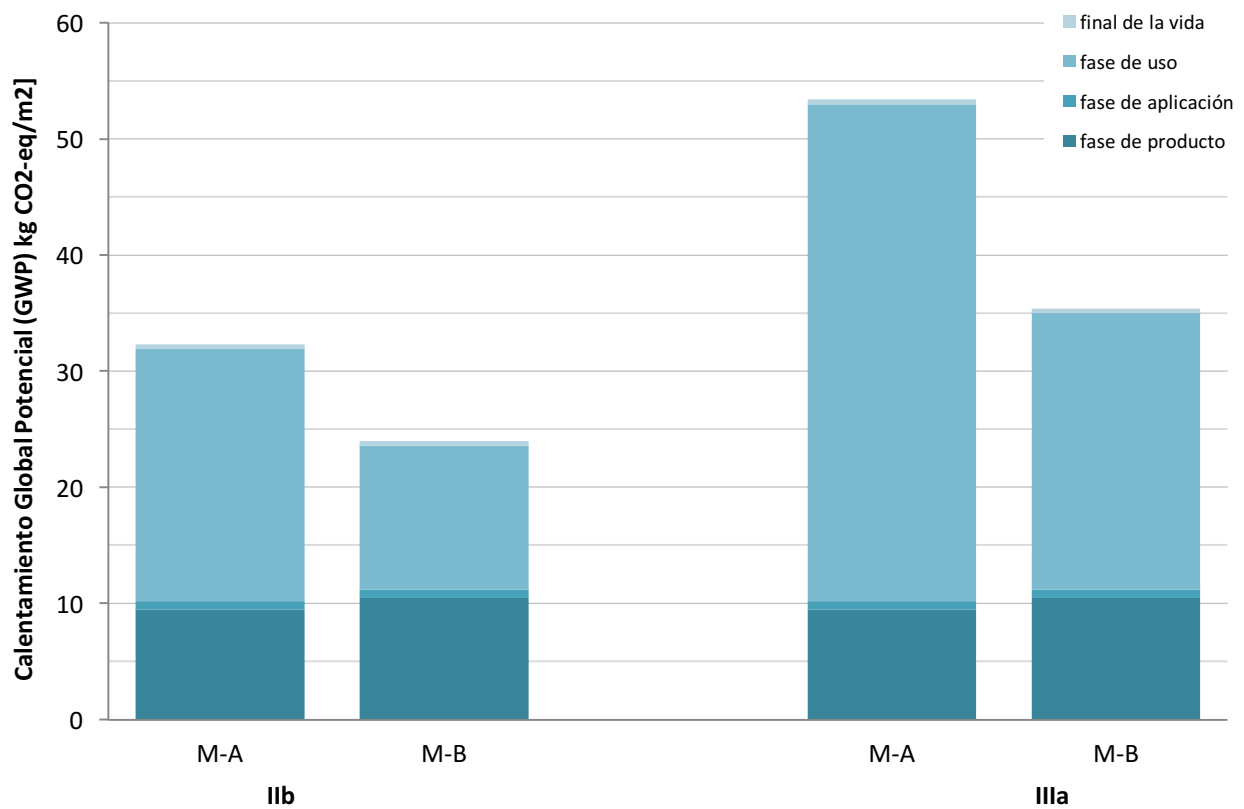


Figura 5. Calentamiento Global Potencial de M-A y M-B en los escenarios IIb y IIIa en 25 años

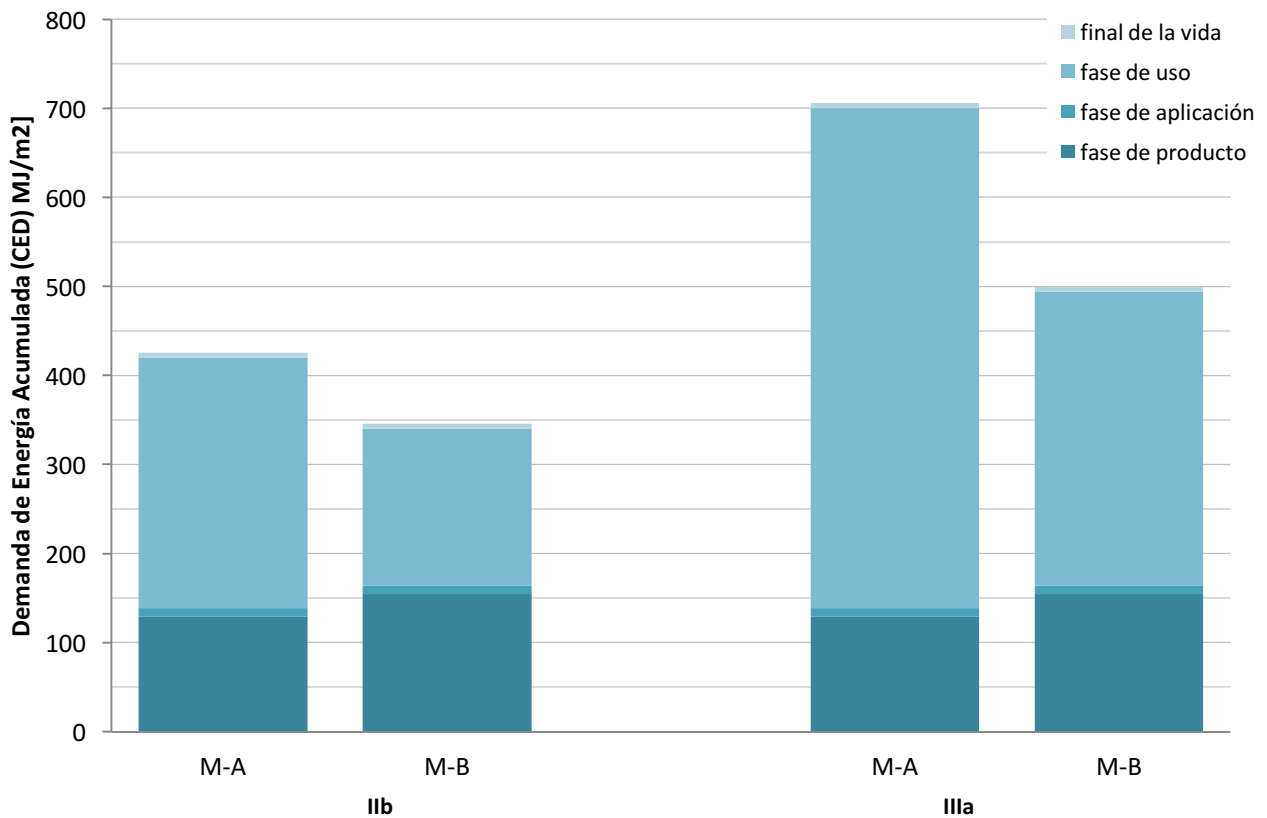


Figura 6. Demanda de Energía Acumulada por M-A y M-B en los escenarios IIb y IIIa en 25 años

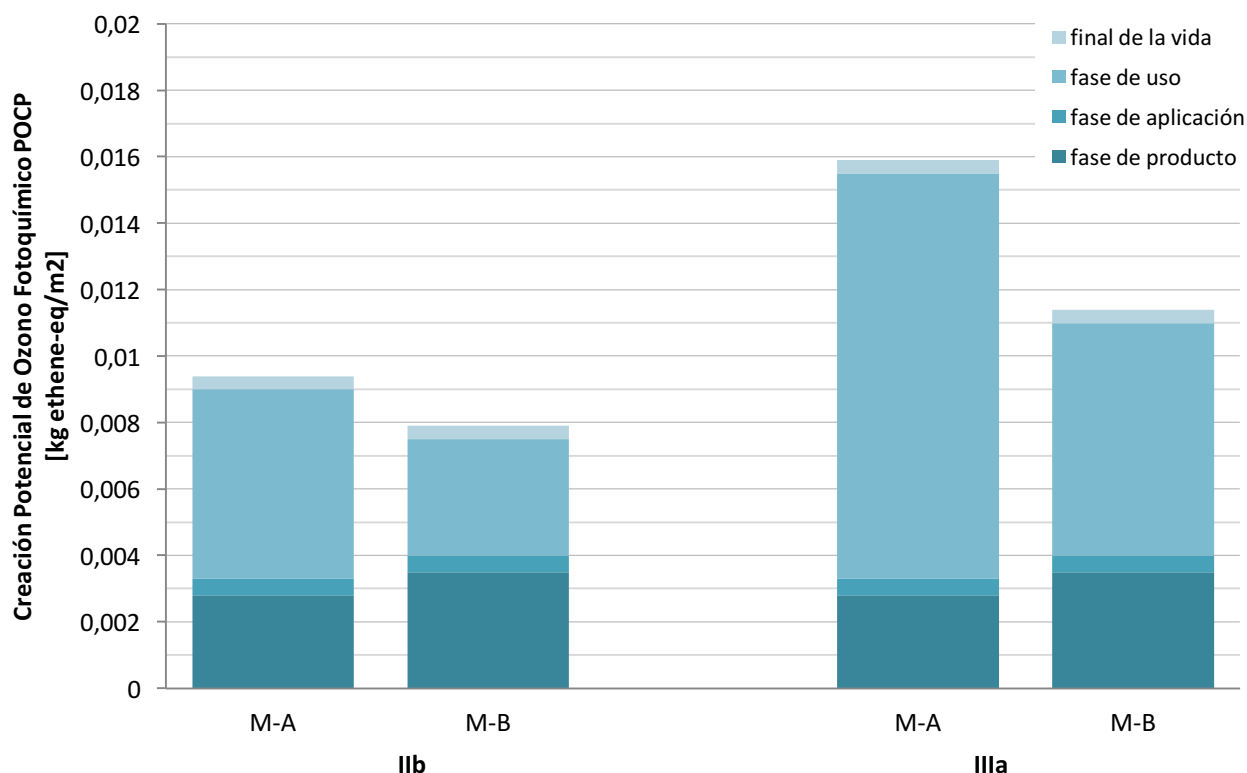


Figura 7. Creación potencial de Ozono fotoquímico por M-A y M-B en los escenarios IIb y IIIa en 25 años

## 5. Conclusiones

Dos morteros de reparación de categoría R4 conforme a la norma europea UNE-EN 1504 han sido comparados para su idoneidad para reparación estructural. Se ha comparado un mortero de referencia en base cemento con un mortero con adición de un 3,2% de polímero; este mortero en base cemento con polímeros ha mostrado unas mejores propiedades de compatibilidad con el soporte y mejores propiedades durables, junto con una menor porosidad, lo que a su vez se traduce en una menor necesidad de renovación de la reparación en la vida útil de la estructura.

-Las propiedades de los morteros en estado fresco apuntan a una mejor trabajabilidad del mortero con polímero, que redundará en una mayor flexibilidad para su aplicación al soporte. Además, el índice de huecos es coherente con una microestructura compacta, permitiendo una buena hidratación.

-Los ensayos de las propiedades físicas confirman que ambos morteros pueden ser catalogados como R4 conforme a los requisitos de la UNE-EN 1504. Es destacable la mejora en la flexotracción y menor módulo elástico de M-B, que se traducen en una mejor compatibilidad con el soporte limitando la aparición de fisuras.

-El análisis de la microestructura revela que el mortero con polímero tiene una menor porosidad total y un menor diámetro de poro crítico y umbral. La evolución de las porosidades y distribución de tamaños de poro en ambos morteros son indicativas de la buena hidratación de los mismos. Sin embargo, el mortero M-B tendrá presumiblemente unas mejores propiedades a largo plazo con la refinación de la estructura porosa.

-Las propiedades durables son en términos generales mejores en M-B. Esto es coherente con las observaciones de estado fresco y porosimetrías. Destaca la gran resistencia a carbonatación del mortero con polímeros, junto con un bajo coeficiente de absorción, que se traducen en una mayor protección del soporte reparado.

-Todas las propiedades en estado fresco, físicas y durables estudiadas permiten concluir que la adición de un 3,2% de polímero es beneficiosa para los morteros de reparación en base cemento, optimizando sus propiedades con vistas a una mejor adherencia y compatibilidad con el soporte, y mayor protección de este frente a agresiones ambientales.

-El Análisis del Ciclo de Vida revela un mayor impacto de M-B en la fase de producto, que se reduce a lo largo de la vida útil por el menor número de reaplicaciones necesarias debido al mejor comportamiento del mortero con polímeros. Tomando como referencia una vida útil de 25 años, el impacto del mortero con polímeros es inferior, siendo más acusada la diferencia en ambientes agresivos.

Como conclusión final destacar que si bien ambos morteros son clasificados como R4 según la norma UNE-EN 1504 el comportamiento global especialmente a lo largo del ciclo de vida es superior en el caso del mortero con polímero.

### Referencias bibliográficas

- [1] Quian, J.; You, C.; Wang, Q.; Wang, H.; Jia, X. (2014) *A method for assessing bond performance of cement-based repair materials*. Construction and Building Materials, 68, 307-313.
- [2] Park, D.; Ahn, J.C.; Song, H.C.; Noguchi, T. (2009) *Drying effect of polymer-modified cement for patch repaired mortar on constant stress*. Construction and Building Materials, 23:434-337
- [3] Da Porto, F.; Stievanin, E.; Pellegrino, C. (2012) *Efficiency of RC square columns repaired with polymer-modified cementitious mortars*. Cement and Concrete Composites, 34, 545-555
- [4] UNE-EN 1504
- [5] Brandi, C. (1963) *Teoría de la Restauración*. Alianza Editorial.
- [6] Ashurst, J.; Dimes, F.G. (1998) *Conservation of building and decorative Stone*. Routledge.
- [7] UNE-EN 1097-6.
- [8] UNE-EN 13395-2:2002.
- [9] UNE-EN 196-1:2005.
- [10] UNE-EN 2190:1999.
- [11] UNE-EN 13412:2008.
- [12] UNE-EN 1542:2000.
- [13] UNE-EN 13057:2002
- [14] UNE-EN 13295:2005
- [15] NF P 18-837:2003
- [16] UNE 28250:2005
- [17] EHE-08. *Instrucción española del hormigón estructural*.
- [18] ISO 14040:2006
- [19] EN 15804:2012