

PROPIEDADES TÉRMICAS, ACÚSTICAS Y MECÁNICAS DE PLACAS DE MORTERO CAUCHO-CEMENTO

Bustamante, R. (1) *; Mayor, P. (2); Rangel, C. (1); Hernández-Olivares, F. (1)

(1) Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas – ETS de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid.

(2) Departamento de Construcciones. EUAT de la Universidad Politécnica de Madrid

(*) restauracion.arquitectura@upm.es

Abstract

This paper presents the main results of an investigation on composite plates of particulates crumbed rubber – cement mortar containing metakaolin. Increasing volume fraction of rubber is added to the mortar until 30%. The mortar composition is included. The physical and mechanical properties of the composite plates are measured in laboratory and compared with those of similar plates without rubber. Experimental measurements of the thermal conductivity and acoustic reduction coefficients –air sound and impact noise- of the plates are included too, in relation with their rubber content.

Keywords: Rubber-cement mortar; metakaolin; thermal conductivity; acoustic reduction; air sound; impact noise; mechanical properties; physical properties.

Resumen

Se presentan los principales resultados de una investigación sobre la fabricación de losas de mortero de cemento común y metacaolín, que incorporan crecientes fracciones volumétricas de polvo de caucho triturado procedente de neumáticos fuera de uso (NFU), hasta superar el 30% en volumen del producto final. Se describen las dosificaciones y las principales propiedades físicas y mecánicas de los productos obtenidos, comparándolas entre sí y con las de losas similares sin polvo de caucho. Se incluyen también medidas experimentales en laboratorio de la conductividad térmica y de la reducción del ruido aéreo y a impacto de estas losas, en función de su contenido en caucho.

Palabras clave: morteros cemento-caucho reciclado, metacaolín, propiedades acústicas, propiedades térmicas, propiedades mecánicas

1. Introducción

Esta investigación se elabora dentro de una línea general desarrollada por alguno de los autores sobre aplicaciones del polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) para la obtención de nuevos productos de construcción con propiedades mejoradas. Se aprovechan las características elásticas, baja densidad, compatibilidad con el cemento y estabilidad química del caucho de NFU, para explorar mejoras en morteros de cemento respecto de su capacidad de aislamiento acústico y térmico, disminuyendo al mismo tiempo la densidad y reduciendo la necesidad de utilizar otros componentes. Además, el uso del polvo de caucho en estos materiales incrementa su valorización.

Los trabajos publicados en esta línea de investigación sobre hormigones con partículas de caucho de NFU se refieren a las propiedades mecánicas de hormigones con partículas de caucho, sometidos a acciones estáticas y dinámicas, para diferentes temperaturas y frecuencias [1]; mejoras del comportamiento al fuego de hormigones de alta resistencia con fibras cortas de caucho reciclado de NFU [2], y diseño en fatiga de firmes de rodadura de hormigón-caucho [3].

Los resultados que aquí se presentan amplían las posibilidades del empleo del caucho reciclado de NFU al incorporarlo a morteros de cemento que pudieran ser empleados como material de revestimiento, de nivelación, albañilería o prefabricación de placas y losas para particiones verticales u horizontales, incluyendo también a obras de rehabilitación. La compatibilidad ya demostrada entre el cemento y el caucho [1] asegura la durabilidad de estas nuevas aplicaciones.

La investigación se ha realizado en laboratorio, fabricando pequeñas losas de $50 \times 25 \times 2 \text{ cm}^3$ y probetas de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ para obtener las principales propiedades físicas, mecánicas, térmicas y acústicas. La elaboración de estas probetas es sencilla en laboratorio y versátil, de tal modo que permite comparar propiedades variando los contenidos de caucho mientras se mantiene constante el resto de componentes del mortero de referencia, con excepción de la arena, que se reduce en similar volumen que el del caucho que se añade.

En lo que sigue se describe la composición de las muestras, los ensayos realizados y los detalles de un simple dispositivo experimental que ha permitido hacer una evaluación ajustada de la conductividad térmica y de la resistencia al ruido de impacto y aéreo, sobre las mismas placas que se emplearon posteriormente para medir propiedades mecánicas y físicas.

2. Materiales

En la fabricación de los morteros se ha usado cemento común Cem II / A-V 42,5R de La Robla (León), polvo de caucho 0-1 mm nominal, fabricado por RENEAL (Guardo (Palencia) procedente de NFU, arena de sílice 0-2 mm procedente de Castraz (Salamanca); metacaolín y superplastificante ADVA Flow 410, ambos de GRACE, este último para reducir la cantidad de agua de amasado. Las proporciones en porcentaje en peso se especifican en la Tabla 1. La adición de metacaolín (Mk) en un 10% de la cantidad de cemento, se ha realizado para mejorar la trabajabilidad de la mezcla, aunque también por compensar la previsible pérdida de la resistencia mecánica por la adición del polvo de caucho [1].

La relación agua/cemento se fue incrementando a medida que aumentaba la cantidad de polvo de caucho en el amasado para mantener la consistencia, por lo que la relación de 0,29 en los morteros sin caucho se incrementó a 0,46 con la máxima adición del mismo, equivalente a la proporción de 1:1,20:0,40 (cemento-caucho-arena).



Figura 1.- Izquierda a derecha. Morteros con adición de 0%, 7%, 10% y 12% de caucho en peso.

Como ya se indicó, se han preparado dos tipos de probetas hechas con el mismo procedimiento de amasado, prismáticas de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ para someterlas a ensayos físicos y mecánicos, y placas de $50 \times 25 \times 2 \text{ cm}^3$, estas últimas hechas en moldes de tablero de

melamina, para las mediciones térmicas y acústicas. Tras desmoldar, el curado de las probetas se realizó en condiciones de laboratorio entre 10 y 20° C. Los ensayos se han hecho pasados 28 días de edad de las probetas.

Tabla 1: Composición en porcentaje (peso) de los materiales componentes de los morteros cemento-caucho

Componentes							
Cem II / A-V 42,5R	42,92%	42,37%	42,55%	41,67%	41,84%	41,09%	40,08%
Caucho 1 mm	0%	7,72%	10,34%	12,66%	15,48%	15,20%	17,04%
Arena de Si 2mm	39,70%	31,47%	29,02%	25,89%	23,22%	22,81%	20,04%
Metacaolín (Mk)	4,29%	4,24%	4,26%	4,17%	4,18%	4,11%	4,01%
Agua	12,45%	13,56%	13,19%	15,00%	14,64%	16,44%	18,44%
Superplastificante	0,64%	0,64%	0,64%	0,63%	0,63%	0,35%	0,40%
Rel. a/c	0,29	0,32	0,31	0,36	0,35	0,40	0,46
Rel. a/(Cem + Mk)	0,26	0,29	0,28	0,33	0,32	0,36	0,41

3. Ensayos

Los ensayos físicos y mecánicos se han realizado con los procedimientos habituales, de acuerdo a las normas UNE EN correspondientes, mientras que para los ensayos térmicos, a ruido aéreo y a impacto, se ha diseñado un ensayo propio para mediciones a pequeña escala, como se aprecia en la Figura 2. La caja de 35 cm de ancho x 70 cm de largo y 60 cm de alto, está forrada con Poliestireno extrusionado (XPS) de 5 cm, mas una placa interior de yeso laminado de 10 mm para evitar que se queme el XPS. Tiene dos recintos, separados por la placa a ensayar que se coloca al centro, embutida en unas acanaladuras hechas en parte superior e inferior; con el recinto emisor y el recinto receptor a cada lado de la placa.

En el recinto emisor se coloca una fuente térmica de 60 W y un termómetro de bulbo seco y de bulbo húmedo, o un emisor de ruido rosa. El recinto receptor contiene un termómetro de bulbo seco y de bulbo húmedo, y un receptor de presión acústica, respectivamente, según los ensayos a realizar.



Figura 2.- Equipo para el ensayo de reducción de la presión sonora, aislamiento térmico y atenuación a impacto. Para el aislamiento térmico se recubre interiormente de placas de yeso laminado.

4. Resultados y discusión

4.1. Propiedades físicas

El aligeramiento del mortero por la adición de caucho era un efecto previsible, aunque con las proporciones de caucho que se le han añadido no alcanza el peso normalizado de 1,3 g/cm³ para tipificarlo como mortero ligero, inclusive en las proporciones de 42% en volumen respecto al volumen del cemento, pues la densidad es de aproximadamente 1,5 g/cm³ como se aprecia en la tabla 2.

El coeficiente de absorción aumenta a medida que se incrementa el contenido de caucho, aunque el efecto del 4% de adición de metacaolín en el peso total de la muestra incluyendo el agua de amasado, se aprecia en el bajo coeficiente obtenido. Pero la explicación del incremento de este coeficiente se debe fundamentalmente a la mayor cantidad de agua que exige el amasado de caucho aunque se ha usado superfluidificante para reducirla.

Respecto a la dureza superficial, medida en la cara de contacto con el molde de la placa, se establece también una relación directa, a menos caucho menos dureza, pero comparando estos resultados con los de la tabla 5, la relación es inversa, a más dureza superficial menor presión sonora dbA, y a menor dureza superficial mayor presión sonora, porque la mayor presencia de caucho provoca un incremento de la energía acústica transmitida, de acuerdo con la ley de masas.

Tabla 2: Densidad aparente, coeficiente de absorción y dureza Shore C

PROBETAS Contenido de caucho*	DENSIDAD APARENTE g/cm ³	COEF. DE ABSORCIÓN %	Dureza superficial Shore C
0%	2,09	1,02	93
7%	1,80	1,55	72
10%	1,56	2,66	83
12%	1,49	2,75	66
15%	1,16	-	60
17%	1,60	2,92	80

(*) porcentajes en relación al peso total del mortero.

4.2. Propiedades térmicas

En este ensayo se empleó como fuente de calor una lámpara incandescente de 60 W colocada en el recinto emisor, cuyas mediciones se realizaron en intervalos de 30, 60 y 90 min. Se han medido las temperaturas seca y húmeda en los recintos emisor y receptor, transcurridos los tiempos indicados. El balance energético realizado en base a estas medidas incluye la disipación de energía térmica a través del cerramiento, la absorción de calor por los materiales del dispositivo experimental y el flujo resultante a través de las diferentes placas ensayadas.

En la Figura 2 se presentan los datos obtenidos tras elaborar las medidas para obtener las conductividades térmicas de las diferentes placas, en función de las diversas fracciones volumétricas de caucho resultantes de las dosificaciones indicadas.

Conductividad térmica. Mortero cemento - Caucho

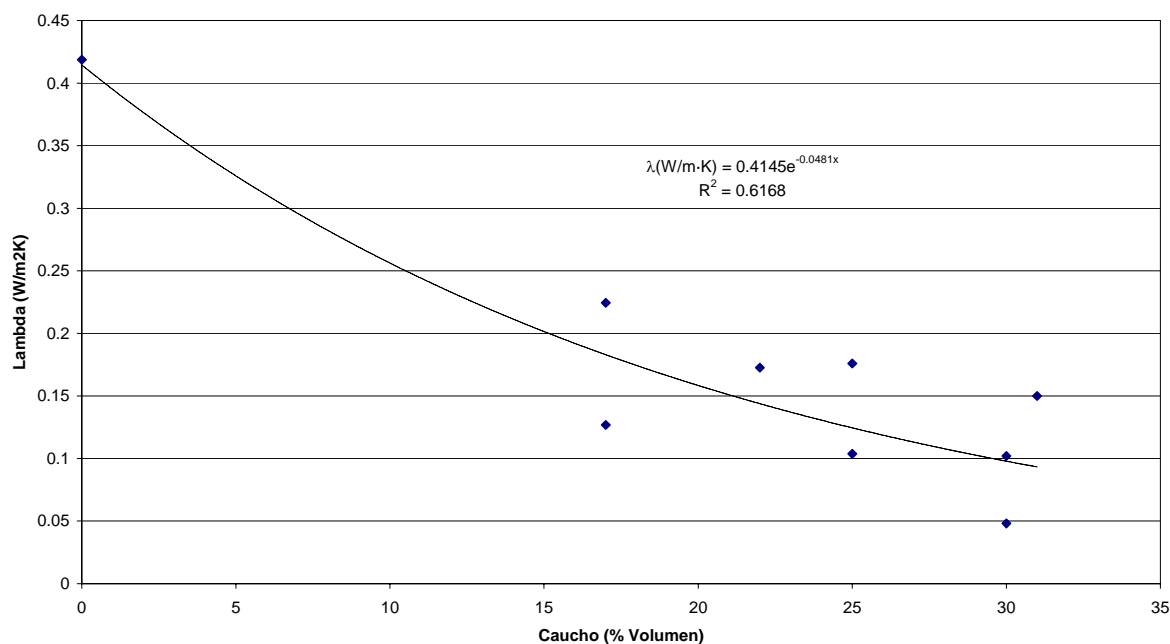


Figura 3. Conductividad térmica de las placas de mortero-caucho en función de la fracción volumétrica de caucho en la muestra hidratada.

La tendencia exponencial sigue una ley que se ajusta con un valor de R^2 aceptable para este tipo de ensayos de estimación experimental de propiedades. La conductividad, en efecto, disminuye exponencialmente con el contenido en caucho, desde un valor máximo de 0.41 W/m·K del mortero de cemento sin caucho. Se adelanta una conclusión de que la adición de polvo de caucho hace disminuir la conductividad térmica de las losas de mortero, convirtiéndolas en aislantes térmicos para fracciones volumétricas de caucho del orden del 50% en volumen sobre el total de la placa.

4.3. Propiedades acústicas: ensayos a ruido aéreo

4.3.1. Ruido aéreo

Estas mediciones se efectuaron con un sonómetro CESVA-Sc-2c. En la tabla 3 se puede apreciar que la placa sin adición de caucho de 2 cm de espesor reduce el ruido aéreo más que las placas con adición de caucho. A la vista de los resultados las placas cemento-caucho actúan como una membrana produciendo el efecto tambor.

Es decir, se cumple la ley de masas y debe concluirse que la adición de polvo de caucho al mortero de cemento no aumenta su capacidad de reducción del ruido aéreo, sino que lo aumenta respecto de las placas sin caucho: no se aísla reduciendo masa sino aumentándola.

No por conocida debe recordarse esta ley referente a los materiales adecuados para incrementar el confort acústico ante la transmisión de ruido aéreo: se requiere más masa por unidad de superficie o diseñar cavidades absorbentes sónicas y disipativas.

Tabla 3: Nivel de presión sonora de las placas de mortero caucho-cemento (emisión de salida 104 dBA a 1 Khz)

Placas	% en caucho	Medidas máximas recibidas en el espacio receptor dBA	Medidas mínimas recibidas en el espacio receptor dBA
Placa PX	prueba	56'10	48'60
6	0 %	49'30	44'70
5	7 %	69'30	69'30
7	7 %	50'73	50'27
8	10 %	51'40	51'10
9	12 %	37'63	30'95
2	15 %	68'90	68'87
3	15 %	68'40	68'40
4	15 %	38'63	37'43
15	17 %	69'60	69'60

4.3.2. Ruido a impacto

El ensayo de ruido al impacto se realizó mediante una bola de acero de 113 g envuelta en una red, colocada a una altura de 23 cm y dejada caer por gravedad, por efecto pendular, desde el tabique opuesto a la placa de mortero. Los resultados se describen en la tabla 4, y se puede concluir que contrariamente a lo que se describe anteriormente en relación al ruido aéreo, las placas con caucho mejoran la capacidad de aislamiento de los morteros de cemento frente a impacto. En particular, a partir de placas con adición de 85% de caucho en volumen respecto al cemento (15% respecto al porcentaje total de la masa), mejora notablemente el aislamiento a impacto en relación a la placa que carecía de adición de caucho.

Tabla 4: Resultados del ruido a impacto mediante bola de acero

Prueba	Medidas (máximos en dBA)			Promedio
0%	115,0	116,3	119,0	116,77
7%	116,7	117,6	117,7	117,33
10%	115,4	116,3	116,7	116,13
12%	110,6	112,4	110,1	111,03
15%A	108,8	110,8	109,8	109,80
15%B	108,9	107,7	108,5	108,37
17%	111,2	110,7	112,5	111,47

5. Propiedades mecánicas

La determinación del módulo de elasticidad dinámico se realizó mediante un equipo de ultrasonido (TICO). Los resultados que se indican en la tabla 5 demuestran que el módulo de elasticidad y por consiguiente las resistencias a flexión y a compresión, disminuyen a medida que aumenta la proporción de polvo de caucho en el mortero. La adición de 15% de polvo de caucho implica una reducción del 25% de la resistencia a flexión, y del 10% de la resistencia a compresión. Pero debido a la retención de agua por el caucho y a la hidratación lenta del cemento, se puede apreciar que las probetas con la máxima adición de caucho, 17% en peso total de la masa, incrementaron su densidad, módulo de elasticidad y

resistencias mecánicas de forma similar a las de 12% de adición de caucho, porque el tiempo de endurecimiento y por consiguiente de secado fue mayor, en ese caso de 45 días.

Sin embargo a favor, se aprecia que la rotura tanto en los ensayos a flexión como a compresión no es frágil, sino ligeramente dúctil, pues no llegan a separarse las piezas completamente, como se aprecia en la Figura 4, con una capacidad mayor de deformación de la que carece un mortero de cemento-arena.



Figura 4.- Rotura de probetas de mortero cemento-caucho después de un ensayo a flexión.

Tabla 5: Módulo de elasticidad dinámico, resistencia a flexión y a compresión

Probetas prismáticas % de caucho en la mezcla	Densidad g/cm ³	Módulo de Elasticidad E(GPa)	Resistencia a flexión N/mm ²	Resistencia a compresión N/mm ²
Sin caucho	2,23	27,00	7,32	54,77
7%	1,97	17,67	6,16	26,48
10%	1,63	10,85	4,59	17,97
12%	1,58	9,06	4,14	14,80
15%(1)	1,29	5,75	2,76	7,88
15%(2)	1,16	4,02	1,91	5,28
17 %	1,60	8,50	4,48	13,82

En la Figura 5 se representan los valores medidos del módulo dinámico en relación con la resistencia a compresión. Se observa que a medida que se incrementa la fracción volumétrica de caucho, disminuyen tanto el módulo de Young como la resistencia a compresión, de modo relacionado por la ecuación que se muestra en la figura. Similar comportamiento se observa en relación a la resistencia a flexión.

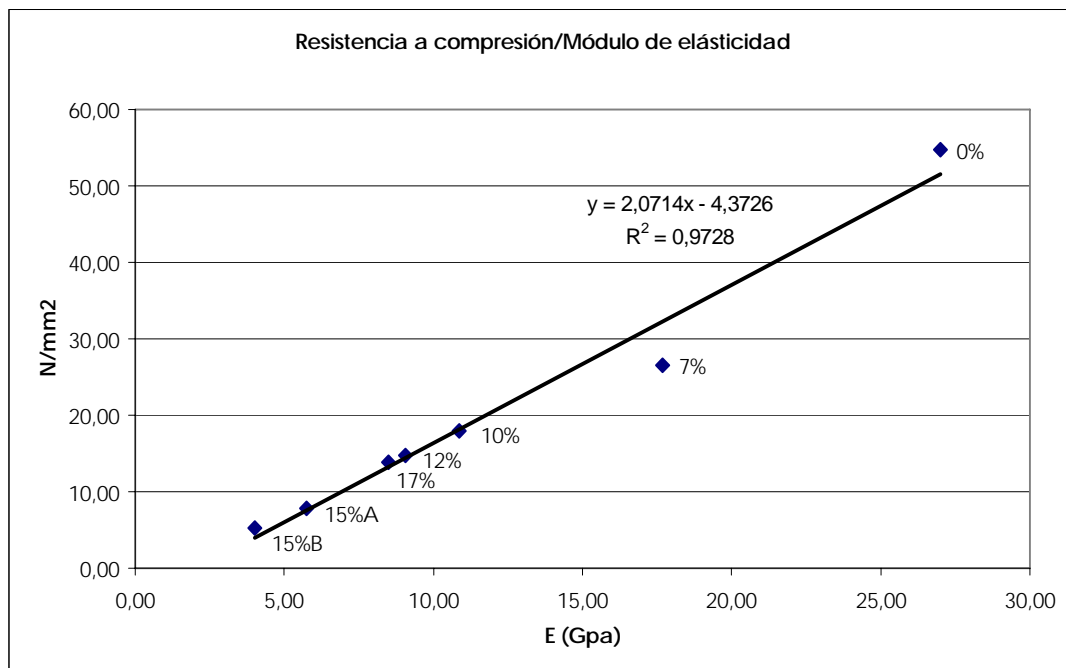


Figura 5.- Resistencia a compresión en relación al módulo de Young según las diversas cantidades de polvo de caucho añadido.

6. Conclusiones

1. El método de ensayo a pequeña escala ha demostrado que aporta suficiente información para determinar el comportamiento térmico y acústico de las placas diseñadas.
2. La adición de caucho a los morteros de cemento no mejora su capacidad de reducción del ruido aéreo, sino que al contrario, los hace mas permeables sónicos.
3. Los morteros de cemento caucho son mas resistentes a la transmisión de ruido procedente de impactos, lo que los hace adecuados para soleras y capas de compresión sobre forjados en particiones horizontales en edificios.
4. La adición de polvo de caucho de NFU mejora la capacidad de aislamiento térmico de morteros de cemento, lo que los hace idóneos como materiales de revestimiento y morteros de albañilería para mejorar el aislamiento térmico y a impacto.
5. La conductividad térmica de los morteros de cemento disminuye exponencialmente si se adiciona polvo de caucho de NFU.
6. Los resultados de los ensayos mecánicos demuestran la utilidad del caucho por su aligeramiento en soleras principalmente, y la rotura dúctil que puede ser de utilidad en elementos constructivos sometidos a deformaciones.

7. Referencias

[1] F. Hernández-Olivares, G. Barluenga, M. R. Bollati, B. Witoszek, "Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete". **Cement and Concrete Research**, **32(10)** (2002) 1587-1596.

[2] F. Hernández-Olivares, G. Barluenga. "Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete" **Cement and Concrete Research**, **34(1)** (2004) 109-117.

[3] F. Hernández-Olivares, G. Barluenga, B. Parga-Landa, M. Bollati, B. Witoszek. "Fatigue Behaviour of Recycled Tyre Rubber-Filled Concrete and its implications in the Design of Rigid Pavements" **Construction and Building Materials**, 21(10) (2007), 1918-1927.

[4] Benazzouk et al, *Physico-mechanical properties of aereated cement composites containing shredded rubber waste*. **Cement & Concrete Composites**, 28 (2006) 650-657.