

Argamassas fabricadas com materiais finos provenientes da trituração de pneus

Mortars made with fine materials from shredded tires

Diogo Pedro¹, Jorge de Brito², Rosário Veiga³

¹*Eng.ª Civil, Mestre em Engenharia Civil (IST)*

diogo.pedro@ist.utl.pt

²*Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa*

jb@civil.ist.utl.pt

³*Investigadora Principal do Departamento de Edifícios do Laboratório Nacional de Engenharia Civil*
rveiga@lnec.pt

RESUMO: Nas últimas décadas, tem-se constatado uma alteração do estilo de vida do Homem, responsável por provocar um aumento dos tipos e quantidade de resíduos. Actualmente, estes são considerados um dos principais problemas a nível mundial. Neste sentido, têm sido realizados estudos sobre a incorporação de resíduos em elementos estruturais e não-estruturais, nomeadamente em argamassas. No entanto, ainda é praticamente desconhecida a influência da utilização de agregados de borracha provenientes da trituração de pneus sobre este material. Com este trabalho pretende-se efectuar uma análise exigencial de modo a testar a viabilidade de uma futura aplicação destas argamassas modificadas em revestimentos de paredes. Os resultados mostram que a incorporação de partículas de borracha é prejudicial à resistência à compressão e à flexão por tracção. Por outro lado, induz uma diminuição significativa do módulo de elasticidade e altera as características de resistência ao choque.

ABSTRACT: In the last decades a change in Man's lifestyle can be detected, which is responsible for an increase in the types and volume of waste. Nowadays they are considered one of the main problems worldwide. Consequently studies on the incorporation of waste in structural and non-structural elements have been performed, namely on mortars. However the influence of using rubber aggregates from shredded tires on mortars is almost unknown. This work intends to make a performance-based analysis in order to test the viability of applying these modified mortars in wall coatings in the future. Results show that the incorporation of rubber particles is detrimental to compressive and flexural strength. On the other hand it leads to a significant reduction of the modulus of elasticity of the mortar and alters its shock resistance characteristics.

1 INTRODUÇÃO

Na construção, a maioria dos materiais usados é de base cimentícia; não obstante os materiais cimentícios apresentam alguns inconvenientes como elevada rigidez, retracção e susceptibilidade à fendilhação. Contudo, actualmente, existem estudos que demonstram que é possível melhorar algumas destas propriedades através da criação de compósitos cimentícios ([1] [2] [3] - vidro; [4] - cinzas; [5] [6] - tijolos; [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] - borracha; [20] [21] - polímeros; [22] [23] - betão)

O interesse na utilização deste tipo de materiais tem aumentado significativamente, pois o mundo começa a estar consciente da importância da questão ambiental e tem procurado encontrar soluções que consigam aliar ao crescimento económico a preservação do património natural.

Neste sentido, nos últimos anos têm sido realizados estudos que pretendem dar um destino final adequado a vários tipos de resíduos, uma vez que estes constituem uma fonte de poluição, sendo considerados no tempo corrente como um dos principais problemas com que o mundo se debate. Relativamente aos pneus usados, verifica-se que este tipo de resíduos tem vindo a aumentar devido

ao crescimento da indústria automobilística, constituindo cada vez mais um problema para o ambiente. Devido ao processo de vulcanização a que a borracha é sujeita, torna-se difícil reaproveitar os constituintes originais do pneu, sendo por isso, a reciclagem de pneus usados uma tarefa complexa. Por esta razão, nos últimos anos, os pneus usados deram origem a depósitos ao ar livre de grandes dimensões que são um risco para o ambiente e para a saúde pública [12] [24]. Devido a esta situação, os países desenvolvidos têm criado legislação de forma a proibir o depósito de pneus inteiros e triturados nos aterros.

Face ao exposto a borracha proveniente da trituração de pneus é um dos recentes resíduos que tem sido investigado devido ao seu potencial uso na construção. Com esta solução pretende-se obter materiais cimentícios mais deformáveis devido às propriedades elásticas da borracha.

O presente trabalho surge assim no seguimento de um conjunto de projectos experimentais na área de construção e reciclagem de resíduos de demolição que têm sido desenvolvidos no Instituto Superior Técnico (IST), Portugal. Além desta instituição, esta investigação teve o apoio do Laboratório de Ensaios de Revestimentos de Paredes (LNEC), Portugal, onde foi realizada a campanha experimental.

Neste estudo, apresenta-se uma análise da influência da adição deste resíduo em argamassas cimentícias. Para se proceder a esta avaliação ensaiaram-se argamassas com agregados de borracha de pneus usados a substituírem a areia. Por fim, além do óbvio interesse ambiental presente, esta investigação centra-se no objectivo de encontrar soluções que aproveitem as características de ductilidade conferidas pela borracha.

2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Segundo a literatura consultada, o principal problema da incorporação de agregados de borracha está relacionado com a diminuição significativa da resistência mecânica.

Na verdade, segundo Turatsinze et al. [15], a resistência à compressão foi a principal razão para que fosse definido como limite máximo de taxa de substituição o valor de 30%. Os resultados mostraram que, para uma taxa de substituição de 20%, existia uma queda de 50% na resistência à compressão e, para 30%, a perda de resistência era

de cerca de 80%.

Noutro estudo, realizado por Uygunoğlu e Topçu [18], verificou-se ainda que a resistência à compressão diminuía não só com o aumento da taxa de substituição mas também com o aumento da relação A/C. Os resultados indicam que a resistência à compressão aos 7 dias diminuiu 40-64% e aos 28 dias 48%-58%, para intervalos de A/C de 0,40-0,51, respectivamente. Um aumento da relação A/C de 0,40 para 0,51 na argamassa de referência fez com que a resistência à compressão aos 7 dias diminuísse 16% e aos 28 dias 37%. No entanto, para a taxa de substituição de 50%, um aumento da relação A/C de 0,40-0,51 fez com que a resistência à compressão aos 7 dias diminuísse cerca de 49% e aos 28 dias 50%.

Também os resultados obtidos por Correia et al. [19] estão de acordo com os já expostos, ou seja, que a resistência à compressão diminuiu com o aumento da quantidade de borracha e com o aumento das relações A/C.

Tal como a resistência à compressão, também a resistência à flexão diminuiu com a substituição de agregados naturais por agregados de borracha. Segundo Uygunoğlu e Topçu [18], para uma taxa de substituição de 50% e dependendo das diferentes relações A/C, ocorre uma redução da resistência à tracção por flexão aos 28 dias entre 31 e 55%. Contudo, a resistência à tracção por flexão para taxas de substituição até 30% e para baixas relações A/C, nomeadamente para 0,40 e 0,43, não registaram diminuições significativas. Neste estudo constatou-se ainda que, no ensaio de flexão, as amostras não colapsaram de repente.

Relativamente ao módulo de elasticidade, verifica-se novamente uma diminuição nesta propriedade com a substituição parcial de areia natural por agregados de borracha. Segundo Uygunoğlu e Topçu [18], comparando a argamassa de referência com a argamassa contendo uma taxa de substituição de 50% (em peso de areia) de agregados naturais por agregados de borracha, verifica-se uma diminuição do módulo de elasticidade de 47,4, 55,8, 55,7 e 68,4% para relações de A/C de 0,40, 0,43, 0,47 e 0,51, respectivamente.

Estas diminuições significativas nas propriedades mecânicas parecem ser devidas em grande parte às heterogeneidades criadas pelos agregados de borracha na pasta de cimento, sendo a interface da pasta de cimento habitualmente designada de zona de transição interfacial (ITZ).

Segundo Uygunoğlu e Topçu [18], através da análise da sua microestrutura recorrendo a microscopia electrónica de varrimento, observa-se que, na argamassa de referência existe uma aderência completa entre a matriz de cimento e os agregados siliciosos, enquanto que na argamassa com agregados de borracha existe um espaço vazio entre os agregados de borracha e a matriz de cimento.

Segundo Correia et al. [19], as heterogeneidades microestruturais de argamassas e betões, em particular na ITZ entre os agregados e a matriz de cimento, são responsáveis pelo comportamento mecânico final, afirmando estes investigadores que a adesão entre o agregado e a matriz de cimento na zona de transição é um factor que regula a resistência do betão. Os seus resultados vieram também confirmar a influência da zona de transição interfacial sobre a resistência à compressão aos 28 dias nas argamassas. Assim, uma argamassa com agregados de borracha (30% de taxa de substituição e uma relação A/C de 0,52) apresentou uma resistência de compressão aos 28 dias de apenas 14 MPa, enquanto que a argamassa sem borracha apresentou aos 28 dias uma resistência à compressão de 18 MPa.

Além da resistência mecânica, também a retracção constitui uma das propriedades em que é necessária especial atenção aquando da substituição de agregados naturais por agregados de borracha. Isto porque, com esta incorporação espera-se um aumento desta propriedade devido à redução da restrição interna (pois estes agregados apresentam um módulo de elasticidade mais baixo).

Os resultados obtidos por Turatsinze et al. [16] confirmam estas expectativas, tendo-se registado maiores valores de retracção livre com a presença de agregados de borracha.

A partir dos valores obtidos por Uygunoğlu e Topçu [18], verifica-se também que o aumento das partículas de borracha faz aumentar a porosidade das argamassas e que, para as relações mais altas de A/C estudadas, 0,47 e 0,51, existe um claro aumento da retracção com o aumento da quantidade de borracha.

No que diz respeito à fendilhação por retracção restringida, no estudo elaborado por Turatsinze et al. [16], demonstrou-se que era benéfica a incorporação de agregados de borracha. Observou-se que a fendilhação por retracção restringida era atrasada e que existia um caminho de fendas

descontínuo para a taxa de substituição de 20% e múltipla fissuração para a taxa de substituição de 30%. Este comportamento contrastava com a da argamassa de referência, que apresentou uma das primeiras fendas, de uma única variedade, que percorria a amostra ao longo da sua altura.

Uma outra propriedade interessante e que foi estudada apenas em betões é o teor de ar. Segundo Khatib e Bayomy [10], verifica-se a existência de um maior teor de ar no betão com incorporação de borracha do que no betão de referência, mesmo sem a utilização de introdutores de ar. Segundo os investigadores, isto pode ser devido à natureza não-polar das partículas de borracha que apresentam tendência para repelir a água.

Relativamente a propriedades no estado fresco, segundo Correia et al. [19], verifica-se que, para uma relação A/C constante, o índice de consistência diminui (pior trabalhabilidade) quando aumenta a quantidade de partículas de borracha vulcanizada. Noutro estudo, elaborado por Uygunoğlu e Topçu [18], constata-se que os valores do diâmetro médio no ensaio de espalhamento para relações A/C de 0,40-0,43 permanecem inalterados devido à falta de lubrificação entre as partículas de cimento e os agregados. No entanto, para outras relações A/C, os valores do diâmetro médio no ensaio de espalhamento diminuem com o aumento da quantidade de borracha.

3 SEQUÊNCIA DOS ENSAIOS

Com o conjunto de ensaios realizados, procurou-se avaliar as características de argamassas de cimento com a incorporação de partículas finas de borracha. Utilizaram-se dois tipos de agregados de borracha que diferem entre si pelo processo de reciclagem a que foram sujeitos. Deste modo, neste estudo, analisou-se de que forma o processo de obtenção do granulado de borracha influencia as propriedades das argamassas.

Em Portugal, existem duas indústrias de reciclagem de pneus usados que produzem granulados: a BIOSAFE, que utiliza a tecnologia de trituração mecânica, e a RECIPNEU, que recorre a tecnologia criogénica. A tecnologia de trituração mecânica divide mecanicamente a borracha, obtendo-se deste modo um granulado de aspecto rugoso e áspero com elevada superfície específica [25]. No processo criogénico, a borracha

é arrefecida por azoto líquido e submetida à acção de forças elevadas, resultando um granulado de borracha liso e de aparência uniforme com uma baixa superfície específica [25].

A campanha experimental foi dividida em duas partes. Na primeira parte, realizou-se um conjunto de ensaios em argamassas com diferentes taxas de substituição de borracha, tendo os resultados sido comparados com uma argamassa padrão (sem partículas de borracha de pneus usados) com a finalidade de se efectuar uma escolha de taxa de substituição.

O critério de escolha que foi definido caso os diferentes tipos de argamassas apresentassem propriedades idênticas ou dentro dos valores regulamentares foi o da mais elevada taxa de substituição.

Na segunda fase, após a escolha da argamassa, efectuou-se um conjunto adicional de ensaios para uma melhor caracterização.

Desta forma, pretendeu-se determinar qual a taxa de substituição de agregados naturais por agregados de borracha de pneus seria mais interessante para uma futura aplicação destas argamassas modificadas em revestimentos de paredes.

3.1 Materiais

As características dos materiais utilizados estão descritas nas Tabelas 1 e 2. Em todos os casos, o tamanho dos agregados utilizados foi menor do que 2 mm. Uma vez que todo agregado de borracha disponível já se encontrava peneirado (na seguinte gama de granulados: <0,18 mm; 0,18-0,60 mm; 0,60-1,40 mm; 1,00-2,00 mm) e como se pretendia substituir a areia, com uma curva granulométrica idêntica a esta última, foi necessário definir novas fracções granulométricas. Para isso, teve-se em consideração as fracções de borracha disponíveis e a curva granulométrica apresentada pela areia (Tabela 1). Obteve-se, assim, uma nova curva granulométrica (Figura 1), a partir da qual foram realizadas as substituições de agregados naturais por agregados de borracha de pneus usados. Estas substituições foram as seguintes:

- substituição de 0% - proporção volumétrica de 1:4 (cimento: agregados de areia siliciosa) - 0% - argamassa de referência;
- substituição de 5% - proporção volumétrica de 1:4 (cimento: agregados de areia siliciosa e de

borracha de origem mecânica) - 5% M;

- substituição de 10% - proporção volumétrica de 1:4 - 10% M;

- substituição de 15% - proporção volumétrica de 1:4 - 15% M;

- substituição de 15% - proporção volumétrica de 1:4 (cimento: agregados de areia siliciosa e de borracha de origem criogénica) - 15% C.

Tabela 1 - Distribuição granulométrica dos agregados

Abertura do peneiro (mm)	Partículas retidas
	Areia borracha
0,15	7,4
0,3	40,5
0,6	39,2
1,18	9,8
2,36	2,1
4,75	0,4

Tabela 2 - Baridade do ligante e dos agregados

Material	Massa volúmica aparente (kg/m ³)
Cimento	1021,1
Areia de rio	1451,2
Borracha	450,8

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Procede-se à apresentação dos resultados obtidos durante a campanha experimental. Com estes dados, procura-se concluir sobre os aspectos negativos e positivos resultantes da incorporação de materiais finos provenientes da trituração de pneus.

4.1 Primeira etapa

Esta etapa consistiu em ensaios de carácter eliminatório e teve por objectivo identificar para que percentagem de substituição era obtida a argamassa com melhores propriedades para ser utilizada como revestimento de paredes.

Consistência por espalhamento

Este ensaio foi realizado com base na norma EN 1015-3 (1999). Com a sua realização, pretendeu-se determinar a quantidade de água a adicionar a cada tipo de argamassa, de modo a que o seu espalhamento tivesse valores de 175 mm ± 10 mm. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

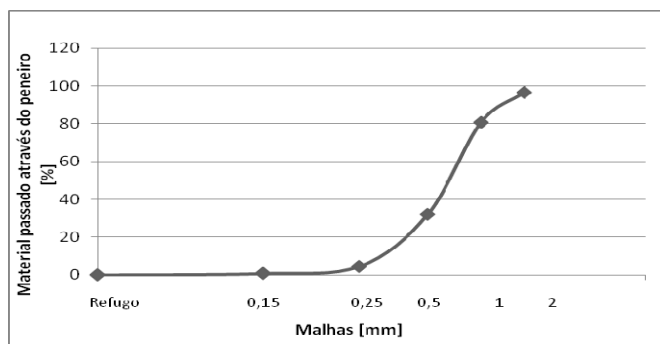


Figura1 - Curva granulométrica corrigida

Tabela 3 - Água de amassadura e respectivo espalhamento para os diferentes tipos de argamassa

Tipo de argamassa	Água de amassadura/dm ³ (ml)	Espalhamento (mm)
0% M	264	174
5% M	264	173
10% M	264	172
15% M	264	172
15% C	264	177

Os resultados mostram que se adicionou a mesma quantidade de água para os diferentes tipos de argamassas. Verifica-se assim que, para a mesma quantidade de água, o aumento da percentagem de borracha não influencia a trabalhabilidade nem provoca variações significativas dos valores de espalhamento. Uma explicação para esta situação pode estar relacionada com o facto de se estar a trabalhar com quantidades baixas de borracha, não sendo assim possível, observar as suas consequências nefastas em termos de trabalhabilidade. Estes resultados contrariam os de Uygunoğlu e Topçu [18] e Correia et al. [19] em que, para um aumento da quantidade de partículas de borracha era necessária uma maior quantidade de água.

Massa volúmica (argamassa no estado fresco)

Este ensaio foi realizado com base na norma EN 1015-6 (1998). Na Figura 2, são apresentados os resultados obtidos.

Os resultados mostram uma diminuição linear ($R^2 = 0,9905$) da massa volúmica com o aumento da taxa de substituição de agregados de borracha. Esta situação pode ser explicada através da menor baridade da borracha (451 kg/m^3) em relação à baridade da areia (1451 kg/m^3).

A Figura 3 compara adimensionalmente os resultados obtidos com os de Silva et al. [5], Neno et al. [23] e Valadares et al. [26], através da

divisão de cada valor pelo respectivo valor de referência.

A consulta desta figura permite concluir que a substituição de areia por agregados finos reciclados leva a uma diminuição da massa volúmica, sendo essa diminuição muito mais significativa no caso de incorporação de agregados de borracha. Isto é explicado pelo facto de, de entre os agregados reciclados, todos com baridade inferior à areia, os de borracha serem os que têm menor baridade. Analisando a massa volúmica tendo em conta o tipo de trituração dos agregados de borracha, conclui-se que as argamassas obtidas com agregados que resultaram do processo mecânico apresentaram valores inferiores (Figura 2). Este facto pode ser explicado pela forma mais angulosa dessas partículas que provoca um aumento de vazios na argamassa originando desta forma uma menor massa volúmica.

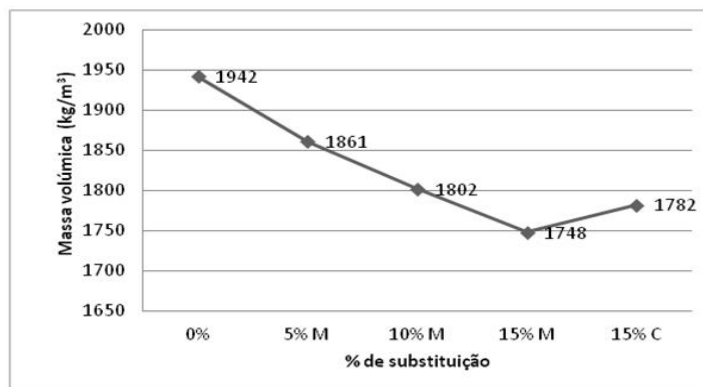


Figura 2 - Massa volúmica no estado fresco dos diferentes tipos de argamassas

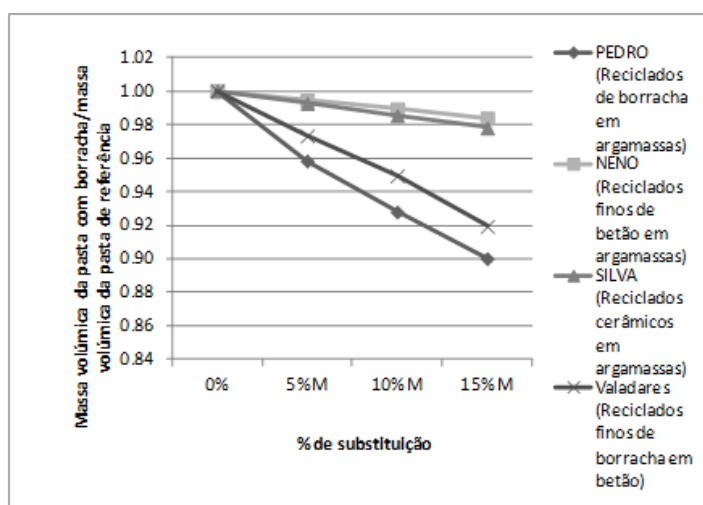


Figura 3 - Comparação adimensional dos resultados obtidos para a massa volúmica no estado fresco com os de [5] [23] [26]

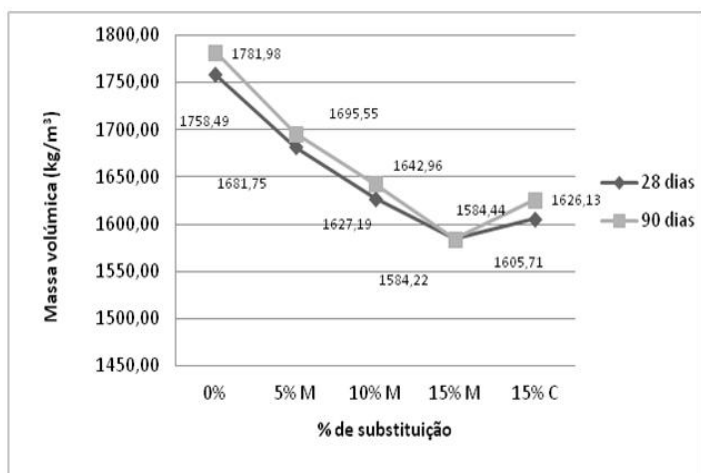


Figura 4 - Massa volúmica no estado endurecido aos 28 e aos 90 dias dos diferentes tipos de argamassas

Massa volúmica (argamassa no estado endurecido)

Este ensaio foi realizado com base na norma EN 1015-10 (1999) aos 28 e aos 90 dias. Na Figura 4, são apresentados os resultados obtidos.

Como os resultados indicam, a massa volúmica da argamassa no estado endurecido diminuiu de forma linear ($R^2 = 0,9829$) com a taxa de incorporação de borracha. A explicação para este facto está também relacionada com a menor baridade da borracha relativamente à areia.

Comparando os valores obtidos com os de Silva et al. [5], Uygunoğlu e Topçu [18] e Neno et al. [23], conclui-se que no estado endurecido ocorre uma diminuição da massa volúmica com a incorporação de agregados reciclados (Figura 5). Só em Neno et al. [23] se verifica um aumento desta propriedade até 20% de incorporação, que segundo os autores se deve a uma diminuição de vazios, devido ao efeito de filler. No entanto, a partir da argamassa com 20% de substituição, existe uma tendência decrescente e linear.

Através da análise da Figura 4, constata-se que, também no estado endurecido, as argamassas obtidas com agregados resultantes do processo mecânico apresentaram valores inferiores, em relação à borracha de origem criogénica.

Resistência à flexão e à compressão

O ensaio de resistência à flexão e compressão foi efectuado aos 28 e 90 dias segundo a norma EN 1015-11 (1999). Nas Figuras 6 e 7, são apresentados os resultados obtidos.

Analisando a Figura 6, observa-se aos 28 dias, para taxas de substituição de 5, 10 e 15%, uma diminuição de resistência, relativamente à

argamassa de referência, de aproximadamente 12, 5 e 21%, e aos 90 dias de cerca de 34, 19 e 38%, respectivamente.

Com a excepção do aumento registado entre 5 e 10%, os resultados estão de acordo com o previsto, ou seja, existe uma tendência para a diminuição da resistência à tracção por flexão com o aumento da quantidade de borracha [15] [18]. Comparando os valores obtidos com os de Uygunoğlu e Topçu [18] verifica-se uma proximidade acentuada. Desta forma, os resultados obtidos permitem efectuar uma correcta análise à resistência à flexão.

A redução desta propriedade explica-se pelas heterogeneidades microestruturais das argamassas e dos betões, especialmente na zona de transição interfacial (interface da pasta de cimento com os agregados), em que se verifica uma aderência completa entre a matriz de cimento e os agregados siliciosos, ao invés das argamassas com agregados de borracha, em que existe um espaço vazio entre os agregados e a matriz de cimento [19].

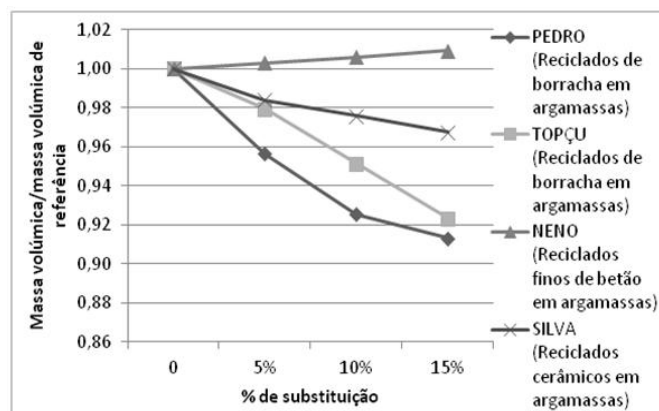


Figura 5 - Comparação adimensional dos resultados obtidos para a massa volúmica no estado endurecido aos 28 dias com os de [5] [18] [23]

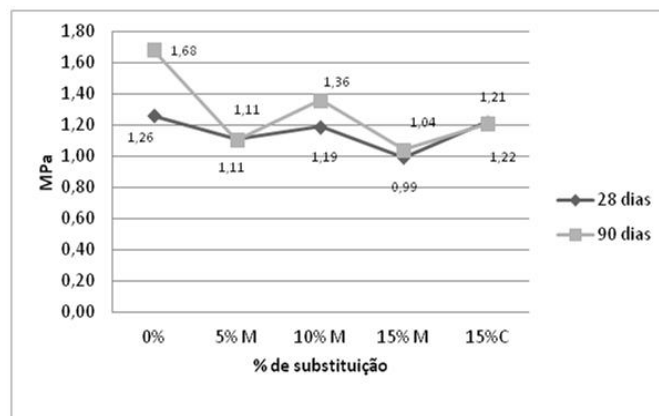


Figura 6 - Tensão de rotura à tracção por flexão aos 28 e 90 dias dos diferentes tipos de argamassas (média de 3 provetes)

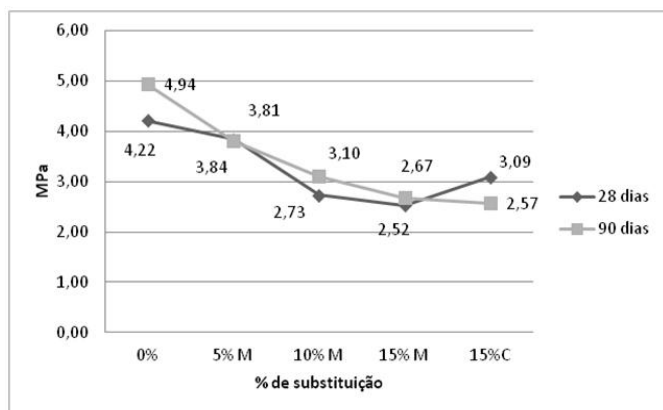


Figura 7 - Tensão de ruptura à compressão aos 28 e 90 dias dos diferentes tipos de argamassas (média de 3 provetes)

Fazendo uma análise à resistência à flexão tendo em conta o tipo de trituração dos agregados de borracha, a Figura 6 mostra que as argamassas de agregados de borracha obtidos pelo processo mecânico apresentam resistências mais baixas (cerca de 15%) relativamente às argamassas de agregados criogénicos.

Tal como a resistência à flexão, também a resistência à compressão diminui com a substituição de agregados naturais por agregados de borracha.

Através da análise da Figura 7, verifica-se que a resistência à compressão aos 28 e 90 dias diminui cerca de 40% e 46%, respectivamente, para a taxa de substituição máxima de 15%. Na verdade, foi esta propriedade a principal razão para que em Turatsinze et al. [15] fosse definido como limite máximo de taxa de substituição o valor de 30%. Comparando os resultados obtidos com os de Turatsinze et al. [16] e Correia et al. [19] verifica-se também nesta propriedade uma proximidade significativa entre os valores obtidos pelos diferentes estudos em que foram utilizados agregados de borracha. Assim, conclui-se que os resultados obtidos permitem fazer uma análise coerente da evolução da tensão de ruptura à compressão com o aumento da incorporação de agregados de borracha.

Na Figura 7, vê-se que na resistência à compressão as argamassas de agregados mecânicos também apresentam valores mais baixos de resistência relativamente às argamassas de agregados criogénicos. Esta situação pode ser explicada pela maior angulosidade dos agregados mecânicos que leva a um aumento do teor em vazios, o que, como referido, leva a um decréscimo de resistência.

Na Figura 8, procede-se a uma comparação dos resultados obtidos na presente investigação à resistência à flexão com os obtidos por Silva et al. [5], Uygunoğlu e Topçu [18] e Neno et al. [23]. Comparando as argamassas de borracha com as argamassas de resíduos de construção e demolição (RCD), mais concretamente de reciclados finos de betão e reciclados cerâmicos, conclui-se que estas últimas e contrariamente às de borracha apresentam para baixas taxas de substituição um crescimento da resistência à flexão.

Em Neno et al. [23], este comportamento é explicado pelo facto de as partículas de betão possuírem uma superfície específica maior do que a areia e também por estes resíduos poderem conter alguma pasta de cimento ainda não hidratada. No que respeita a Silva et al. [5], o aumento de resistência para baixas taxas de substituição deve-se, segundo o investigador, à combinação do efeito pozolânico dos finos cerâmicos com o efeito de filler.

Relativamente à resistência à compressão na Figura 9, efectua-se a comparação dos valores obtidos com os valores de Silva et al. [5], Turatsinze et al. [16], Correia et al. [19], Neno et al. [23] e Valadares et al. [26].

No que concerne às argamassas de RCD, também a resistência à compressão ocorreu um aumento para as taxas de substituição em estudo, tendo-se verificado em Silva et al. [5] e Neno et al. [23] diferenças de 27 e 10%, respectivamente.

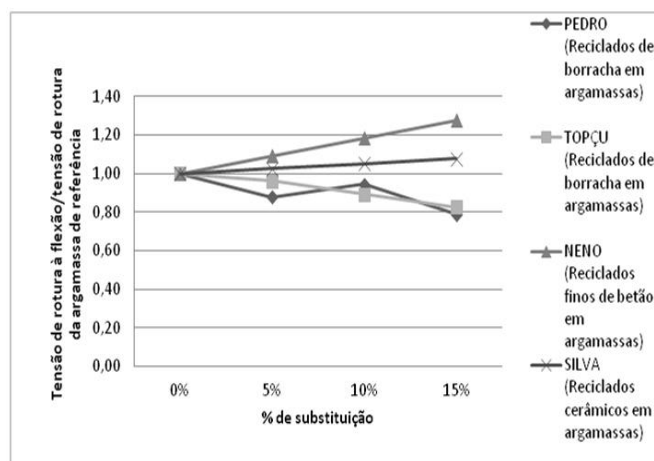


Figura 8 - Comparação adimensional dos resultados obtidos à flexão aos 28 dias com os de [5] [18] [23]

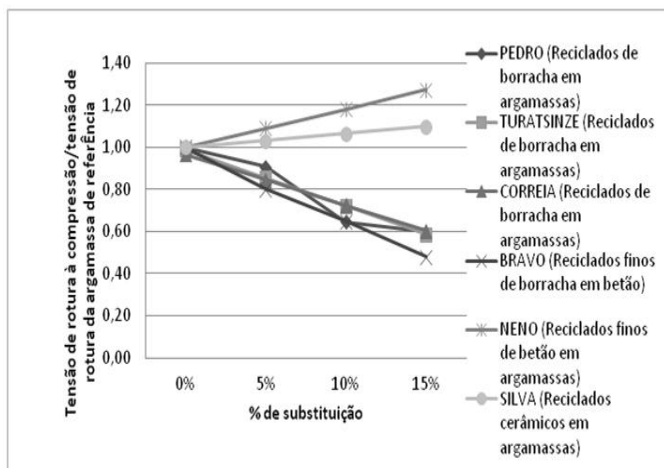


Figura 9 - Comparação adimensional dos resultados obtidos à compressão aos 28 dias com os de [5] [16] [19] [23] [27]

Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi efectuado aos 28 dias segundo a norma EN 1015-18 (2002). Nas Figuras 10 e 11, são apresentados os resultados obtidos.

Através da observação das Figuras 10 e 11, constata-se a existência de um comportamento de absorção de água por capilaridade aproximadamente idêntico para as diferentes taxas de substituição.

No respeitante ao coeficiente de capilaridade, nota-se que os valores mínimos e máximos são obtidos para as taxas de substituição de 5 e 10%, respectivamente, tendo uma variação inferior a cerca de 15% (variação insignificante face aos desvios-padrão associados).

No entanto, esperava-se um aumento da absorção de água por capilaridade com o aumento de incorporação de borracha, pois este agregado é responsável por uma pior compactação devida à diminuição do peso próprio das argamassas. Por outro lado, segundo Khatib e Bayomy [10], um aumento da quantidade de borracha conduz a um aumento do teor de ar incorporado, sendo assim expectáveis menores valores de absorção de água para maiores taxas de substituição. Estes dois efeitos contraditórios acabaram por se equilibrar, resultando curvas de absorção muito próximas.

Também segundo Bravo e de Brito [27], para as mesmas taxas de substituição, não fica claro o aumento desta propriedade com o aumento da taxa de substituição. Assim, os resultados obtidos na Figura 11, parecem reforçar hipótese de que o aumento da porosidade nas argamassas com

agregados de borracha é compensado por um aumento do teor de ar incorporado.

Analisando a absorção de água por capilaridade tendo em conta o tipo de trituração dos agregados de borracha, conclui-se que, as argamassas obtidas com agregados que resultaram do processo mecânico apresentaram valores ligeiramente superiores de coeficiente de capilaridade (Figura 10). Estes resultados tendo em conta o desvio-padrão registado, são idênticos aos de Bravo e de Brito [27].

Susceptibilidade à fendilhação

O ensaio de susceptibilidade à fendilhação não se encontra normalizado e segue uma metodologia empírica. Este ensaio consiste em aplicar uma camada de argamassa de 2 cm a um tijolo cerâmico e observar se existe fissuração dentro de um período pré-determinado. Os resultados mostram que, ao fim de 3 meses, nenhum tipo de argamassa apresentava fissuração. Assim, conclui-se que as argamassas produzidas para as diferentes taxas de substituição de agregados naturais por agregados de borracha de pneus usados não apresentam susceptibilidade à fendilhação.

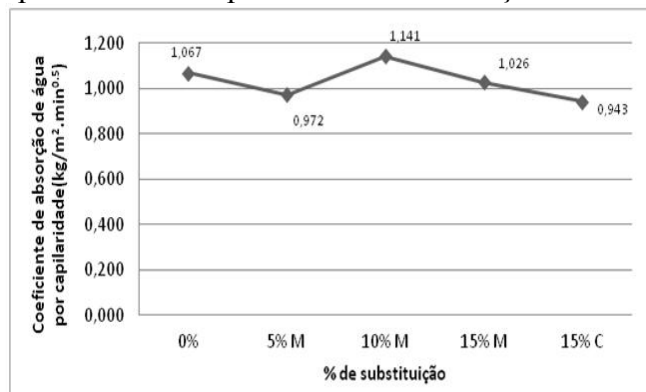


Figura 10 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade dos diferentes tipos de argamassas (média de 3 provetes)

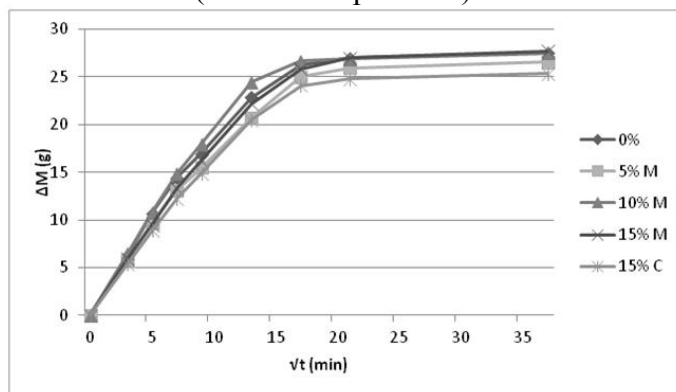


Figura 11 - Absorção de água por capilaridade dos diferentes tipos de argamassas (média de 3 provetes)

4.2 Selecção da argamassa para a segunda fase

Na segunda fase da campanha experimental, escolheu-se a argamassa com 15% de agregados de borracha (relativamente ao volume total de agregados).

Os critérios de classificação adoptados tiveram em conta dois indicadores: taxa de substituição e propriedades analisadas na primeira fase.

No que respeita à taxa de substituição, definiu-se que este indicador seria tanto mais positivo quanto maior o volume de incorporação de agregados de borracha na argamassa. Desta forma, pretendeu-se dar importância a um dos objectivos da pesquisa: a questão ambiental.

Relativamente ao segundo indicador, foram avaliadas as seguintes propriedades: consistência por espalhamento; massa volúmica (argamassa no estado fresco); massa volúmica (argamassa no estado endurecido); resistência à flexão e à compressão; absorção de água por capilaridade e susceptibilidade à fendilhação. Estas propriedades foram analisadas com o objectivo de avaliar a máxima taxa de substituição de agregados naturais por agregados de borracha relativamente à qual, as argamassas poderiam continuar a desempenhar de forma competente as suas funções.

Em função dos resultados obtidos, as resistências à flexão e à compressão foram as que tiveram maior influência no processo de decisão, uma vez que, nas outras propriedades não foram detectadas grandes diferenças entre as três argamassas comparadas. Verificou-se que, apesar de as resistências diminuírem significativamente com a substituição de agregados naturais por agregados de borracha, estas continuaram a apresentar valores aceitáveis para a maior taxa de substituição em estudo (15%). Desta forma, foi escolhida argamassa com 15% de agregados de borracha.

4.3 Segunda etapa

Nesta etapa foi escolhida a argamassa que apresentou melhores resultados nos ensaios realizados anteriormente. Feita esta escolha, foi efectuada mais uma série de testes, de modo a obter-se uma caracterização mais pormenorizada. As características avaliadas nesta etapa foram seleccionadas com o objectivo de avaliar a viabilidade destas argamassas para serem utilizadas como rebocos tendo em conta as

especificações da EN 998-1.

Variação dimensional

Este ensaio foi realizado com base no documento normativo do CSTB (Cahier 2669-4) e consistiu em medir periodicamente o aumento de comprimento de prismas de argamassa desde a desmoldagem até aos 90 dias. Na Figura 12, são apresentados os resultados obtidos.

Pela observação da Figura 12, consta-se que as argamassas com incorporação de agregados de borracha apresentam uma maior retracção relativamente à argamassa de referência. Estes resultados estão de acordo com as expectativas pois este tipo de argamassas, ao terem uma menor restrição interna devido ao facto de a borracha possuir um menor módulo de elasticidade, expectavelmente conduzem a maiores valores de retracção.

Assim, pela análise da Figura 12, verifica-se um aumento da retracção relativamente à argamassa de referência de cerca de 43% para a argamassa obtida pelo processo criogénico e de cerca de 64% para a argamassa obtida pelo processo mecânico. Novamente o maior teor em vazios das argamassas com agregados de borracha processados mecanicamente parece ter levado a um aumento de deformabilidade e de retracção.

Adimensionalmente, comparando os resultados obtidos com os de Bravo e de Brito [27], concluiu-se que este investigador, para a mesma taxa de incorporação de agregados de borracha em betão, obteve aumentos semelhantes de retracção.

Aderência ao suporte

Este ensaio foi efectuado aos 28 dias segundo a norma EN 1015-12 (2000). Na Tabela 4, são apresentados os resultados obtidos. Estes mostram que esta propriedade diminui com a substituição de agregados naturais por agregados de borracha. Além deste facto, é possível observar que a aderência da argamassa obtida pelo processo mecânico é inferior à obtida pelo método criogénico, sendo as perdas destas argamassas para a de referência de 17 e 33%, respectivamente. A explicação para esta situação poderá ser idêntica à referida no ensaio de resistência à compressão e flexão, ou seja, a perda de aderência pode justificar-se pelas heterogeneidades microestruturais das argamassas com borracha, especialmente na zona de transição interfacial.

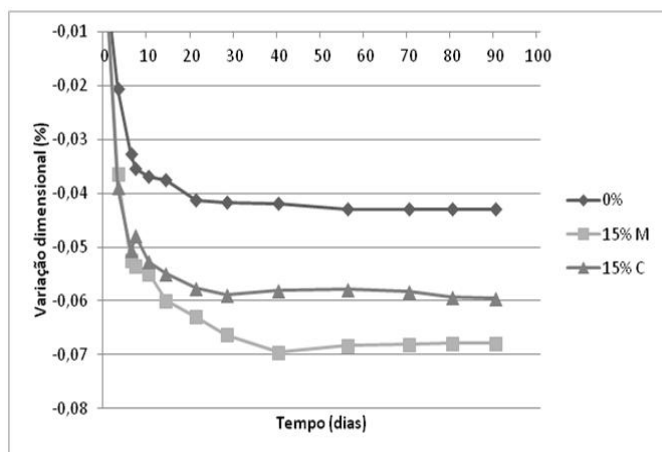


Figura 12 - Relação entre a variação dimensional e o tempo decorrido (média de 3 provetes)

Módulo dinâmico de elasticidade

Este ensaio foi efectuado aos 28 e 90 dias segundo a norma NF B10-511F (1975), pelo método da frequência de vibração de ressonância. Na Tabela 4 e na Figura 13, são apresentados os resultados obtidos. Neste ensaio decidiu-se analisar não só a argamassa escolhida como também todas as restantes, de modo a perceber-se a evolução desta propriedade com o aumento da quantidade de borracha.

Observando a Figura 13, constata-se que o módulo de elasticidade diminui com a incorporação de borracha. Esta tendência deve-se provavelmente à maior deformabilidade destes agregados. Adicionalmente, o aumento da estrutura porosa das argamassas com agregados de borracha e o maior teor de ar incorporado contribuirão também para a redução do módulo de elasticidade das argamassas com maior teor de borracha. Através da Figura 13, é possível observar que a diminuição desta propriedade com o aumento da taxa de substituição é feita de forma linear, quer aos 28 ($R^2 = 0,9493$) quer aos 90 dias ($R^2 = 0,9769$).

Comparando a argamassa de referência com as argamassas com taxas de substituição de 5, 10 e 15%, verifica-se uma diminuição do módulo de elasticidade aos 28 dias de 12, 28 e 32%, respectivamente. Relativamente ao módulo de elasticidade aos 90 dias, registam-se diminuições de 20, 33 e 43%, respectivamente.

Adimensionalmente, comparam-se na Figura 14 os resultados obtidos com os de Silva et al. [5], Uygunoğlu e Topçu [18] e Neno et al. [23]. Os resultados mostram que em Silva et al. [5] e Uygunoğlu e Topçu [18] também se verificaram descidas do módulo de elasticidade, tendo-se

registado para a argamassa de 15% de substituição diminuições de 19 e 12 %, respectivamente.

Em Uygunoğlu e Topçu [18], em que se utilizou agregados reciclados de borracha, apesar de os valores serem aproximados, verifica-se que a presente dissertação obteve maiores diminuições.

Só em Neno et al. [23], em que foram usados agregados reciclados de betão, é que houve um aumento desta propriedade. Segundo os investigadores, os resultados devem-se à maior massa volúmica (devida ao efeito de filler) que as argamassas constituídas por este tipo de agregados apresentaram para baixas percentagens de substituição.

Analisando o módulo de elasticidade tendo em conta o tipo de trituração dos agregados de borracha, constata-se através da observação da Figura 13 que esta propriedade aos 28 dias não varia significativamente para os diferentes tipos de borracha, verificando-se apenas uma diminuição ligeira de cerca de 5% na argamassa de agregados de borracha obtidos pelo processo mecânico relativamente à argamassa criogénica. No entanto, aos 90 dias essa diminuição foi de aproximadamente 12%. Estas diferenças confirmam a maior deformabilidade da argamassa com agregados de borracha processados mecanicamente, já revelada noutras características, por comparação com a argamassa com agregados criogénicos.

Permeabilidade ao vapor de água

Este ensaio foi realizado com base na norma EN 1015-19 (1998) aos 28 dias. Na Tabela 4, são apresentados os resultados obtidos. Estes mostram que a permeabilidade ao vapor de água aumentou com incorporação de borracha. Através da Tabela 4, verifica-se que esse aumento foi de 19% para a argamassa obtida pelo processo mecânico e 11% para a argamassa criogénica. Assim, conclui-se que a incorporação de agregados de borracha possibilita às argamassas um melhor desempenho no âmbito desta propriedade.

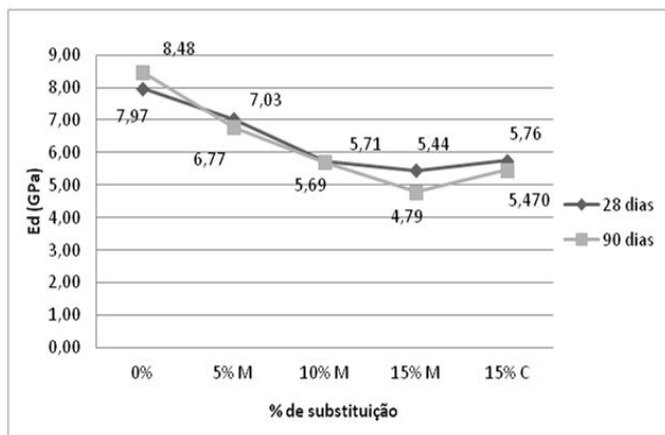


Figura 13 - Resultados do ensaio do módulo de elasticidade aos 28 e 90 dias dos diferentes tipos de argamassas (média de 3 provetes)

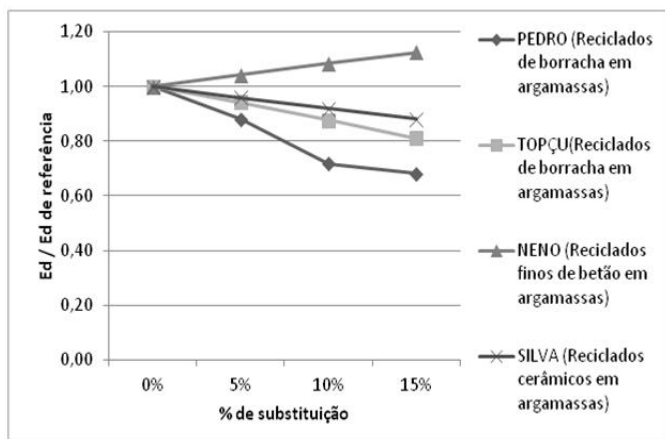


Figura 14 - Comparação adimensional dos resultados obtidos do módulo de elasticidade relativo aos 28 dias com os de [5] [18] [23]

Resistência ao choque através da queda de uma massa conhecida

Os resultados obtidos mostram que as argamassas com incorporação de agregados de borracha apresentam diâmetros de moesa (entre 2 e 2,5 cm) superiores ao da argamassa de referência (compreendido entre 1 e 1,5 cm). Além disto, verifica-se que a profundidade da moesa aumenta com o aumento da taxa de incorporação de agregados de borracha. Constata-se também que, quanto maior a taxa de incorporação de agregados de borracha, maior a altura de queda a que a argamassa consegue resistir sem fissurar. Finalmente, verifica-se que a largura das fissuras tende a diminuir com a incorporação de agregados de borracha. Desta forma conclui-se que os agregados de borracha, apesar de serem prejudiciais à resistência mecânica, conduzem a argamassas com módulo de elasticidade mais baixo e com maior capacidade de absorção de

energia (Figuras 15 e 16).



Figura 15 - Fissuras ocorridas na argamassa de referência no ensaio de resistência ao choque através da queda de uma massa conhecida



Figura 16 - Resultados obtidos na argamassa de 15% no ensaio de resistência ao choque através da queda de uma massa conhecida

Ensaio de envelhecimento acelerado

Este ensaio foi realizado aos 112 dias com base na norma EN 1015-21 (2002). Com a sua realização, pretendeu-se avaliar os efeitos dos ciclos climáticos através de dois testes: permeabilidade à água líquida e aderência. Os ciclos climáticos realizados foram de dois tipos: calor-gelo e gelo-degelo. No primeiro, foram realizados 4 ciclos, tendo cada um a duração de um dia. Em cada ciclo, os provetes eram submetidos a uma temperatura de 60 °C durante 8 horas consecutivas seguindo-se uma de descanso. Terminado o descanso, ficavam sujeitos a uma temperatura de -15 °C durante 15 horas. Relativamente ao segundo ciclo climático, foram

realizados 8 ciclos apresentando novamente cada um deles a duração de um dia. Cada ciclo era composto por 8 horas consecutivas de chuva e uma de descanso. Nas 15 horas restantes, os provetes eram submetidos a uma temperatura de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Não foram observadas variações no aspecto estético dos provetes.

Relativamente ao ensaio de permeabilidade à água líquida, este foi realizado recorrendo ao método dos tubos de Karsten, de acordo com a ficha LNEC FE Pa 39.1 (2002). Os resultados mostram que a argamassa com borracha criogénica foi a que apresentou maior volume de água absorvida com $3,73\text{ m}^3/\text{h}$, sendo seguida pela argamassa de referência e pela argamassa com borracha triturada mecanicamente, que apresentaram valores de 2,33 e 1,43. Consta-se que a argamassa com borracha criogénica e a argamassa de referência apresentam valores muito superiores de permeabilidade à água (na ordem de 160 e 63%, respectivamente) relativamente à argamassa com borracha mecânica. Estes resultados justificam-se pelo facto de estes dois tipos de argamassas terem sido mais sensíveis aos ciclos climáticos, apresentando maior porosidade devido à acção dos ciclos gelo / degelo.

Na Tabela 4, são apresentados os resultados obtidos no ensaio de aderência ao suporte, com recurso ao ensaio de *pull-off*. Os resultados mostram que os diferentes tipos de argamassas apresentaram resultados muito similares após terem sido submetidos aos ciclos climáticos. Em todos os casos, obteve-se uma rotura coesiva pela argamassa. Consta-se que a aderência aumentou significativamente nos provetes que foram sujeitos ao envelhecimento acelerado, tendo-se registado nas argamassas de 0%, 15% C e 15% M aumentos de cerca de 29, 67 e 94%, respectivamente. O aumento de aderência com o envelhecimento poderá estar relacionado com o aumento da hidratação do cimento que incrementou a coesão da argamassa e originou o desenvolvimento de cristais no interior dos poros do suporte que melhoram a ligação. É também possível que os ciclos tenham alterado os agregados de borracha, promovendo uma melhor ligação destes à matriz cimentícia, embota tal não tenha sido comprovado.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios realizados antes e após os ciclos de envelhecimento (média de 3 provetes)

Argamassa		0%	15% M	15% C
Antes dos ciclos de envelhecimento				
Aderência ao suporte (MPa)		0,51 (S.D. = 0,073)	0,34 (S.D. = 0,025)	0,42 (S.D. = 0,035)
Módulo de elasticidade (GPa)	Aos 28 dias	7,97 (S.D. = 0,52)	5,44 (S.D. = 0,18)	5,76 (S.D. = 0,14)
	Aos 90 dias	8,48 (S.D. = 0,26)	4,79 (S.D. = 0,21)	5,47 (S.D. = 0,20)
Permeabilidade ao vapor de água (ng/(m.s.Pa))		25,78	30,77	28,70
Depois dos ciclos de envelhecimento				
Permeabilidade à água líquida (kg/(m².√h))		0,53	0,32	0,84
Aderência ao suporte (MPa)		0,66 (S.D. = 0,109)	0,66 (S.D. = 0,062)	0,70 (S.D. = 0,038)

S.D. - Desvio-padrão

5 PRINCIPAIS CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à necessidade de encontrar soluções que possibilitem o reaproveitamento e a reciclagem de produtos e sendo a indústria da construção uma das principais responsáveis pelo elevado consumo de recursos naturais que se está a tornar insustentável, procurou-se neste estudo, analisar a influência da incorporação de materiais finos provenientes da trituração de pneus em argamassas.

Deste modo, argamassas com diferentes taxas de substituição de agregados naturais por agregados de borracha de pneus usados (5, 10 e 15% do volume total de agregados) foram comparadas com uma argamassa padrão (sem partículas de borracha). Numa primeira fase, procurou-se avaliar as principais características das argamassas para que posteriormente fosse escolhida uma, capaz de ser utilizada com reboco em paredes e contendo na sua composição a maior quantidade de agregados de borracha possível.

Os resultados mostram que a incorporação de agregados de borracha permite às argamassas adquirir um melhor desempenho a nível de deformabilidade. Esta característica tem uma influência positiva na resistência ao impacto, como foi confirmado através de ensaios específicos, e poderá melhorar o comportamento à fendilhação.

Contudo, existe o inconveniente da sua resistência ser significativamente reduzida.

No entanto, este facto negativo deixa de ser relevante se estes materiais compósitos forem aplicados em situações não-estruturais. Um exemplo disto é a sua utilização como rebocos ou estuques em paredes. Neste âmbito e segundo a norma EN 998-1 todas as argamassas analisadas, incluindo as que apresentavam a taxa de incorporação máxima, pertencem à classe de compressão CS-II que é indicada como sendo adequada para este tipo de uso na maioria das situações.

Assim, este tipo de argamassas além de possuir a resistência necessária para ser utilizado como revestimento de paredes, contém no seu interior partículas de borracha que conferem uma maior capacidade à argamassa em absorver a energia de choque, mantendo a deformabilidade dentro de valores moderados.

Além disto, existem outras propriedades como a permeabilidade ao vapor de água em que também se verificam ganhos de qualidade nas argamassas com agregados de borracha relativamente à argamassa de referência. Obteve-se melhorias entre 11% e 19%.

No entanto, no que respeita à retração, ainda não é claro que os aumentos verificados nesta propriedade não originem acréscimos de susceptibilidade à fissuração ou se será compensada pelo decréscimo no módulo de elasticidade. Neste âmbito, é importante a realização de uma investigação adicional. Conclui-se também que não existem diferenças significativas entre o comportamento das argamassas com agregados de borracha obtidos pelo processo criogénico e as feitas com agregados obtidos pelo processo mecânico.

REFERÊNCIAS

- [1] Duman V., Mladenovic A., Suput J. S. Lightweight aggregate based on waste glass e its alkali-silica reactivity. *Cement and Concrete Research* 2002, 32 (2): 223-6.
- [2] Topçu I.B., Canbaz M. Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research* 2004, 34 (2): 267-274.
- [3] Wang H., Huang, W. Durability of self-consolidating concrete using waste LCD glass. *Construction and Building Materials* 2010, 24 (6): 1008-1013.
- [4] Sánchez E., Massana J., Garcimartín M. A., Moragues A. Mechanical strength and microstructure evolution of fly ash cement mortar submerged in pig slurry. *Cement and Concrete Research* 2008, 38 (5): 717-724.
- [5] Silva J., de Brito J., Veiga R. Recycled red-clay ceramic construction e demolition waste for mortars production. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2010, 22 (3): 236-244.
- [6] Bektas F., Wang K., Ceylan H. Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability. *Construction and Building Materials* 2009, 23 (5): 1909-1914.
- [7] Cairns R., Kenny M., Kew H. The use of recycled rubber tyres in concrete construction, Onxy Environmental Trust Final Report, University of Strathclyde, 2004.
- [8] Eldin N., Senouci A. B. Rubber-tire particles as concrete aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering* 1993, 5 (4): 478-496.
- [9] Fattuhi N., Clark L. Cement-based materials containing shredded scrap truck tire rubber. *Construction and Building Materials* 1996, 10 (4): 478-496.
- [10] Khatib Z. K., Bayomy F. M. Rubberized Portland cement concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 1999, 11 (3): 206-213.
- [11] Li G., Stubblefield M. A., Garrick G., Eggers J., Abadie C., Huang B. Development of waste tire modified concrete. *Cement and Concrete Research* 2004, 34 (12): 2283-2289.
- [12] Nehdi M., Khan A. Cementitious composites containing recycled tire rubber: an overview of engineering properties e potential applications. *Cement, Concrete and Aggregates Journal* 2001, 23 (1): 3-10.
- [13] Segre N., Joekes I. Use of tire rubber particles as addition to cement paste. *Cement and Concrete Research* 2000, 30 (9): 1421-1425.
- [14] Sukontasukkul P., Chaikaew C. Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber. *Construction and Building Materials* 2006, 20 (7): 450-457.
- [15] Turatsinze A., Bonnet S., Granju J. L. Mechanical characterisation of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres. *Building and Environment* 2005, 40 (2): 221-226.
- [16] Turatsinze A., Bonnet S., Granju J. L. Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: improvement in cracking shrinkage resistance. *Construction and Building Materials* 2007, 21 (1): 176-181.
- [17] Turki M., Bretagne E., Rouis M. J., Quéneudec M. Microstructure, physical e mechanical properties of mortar-rubber aggregates

- mixtures. *Construction and Building Materials* 2009, 23 (7): 2715-2722.
- [18] Uygunoğlu T., Topçu I. B. The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage e mechanical properties of self-consolidating mortars. *Construction and Building Materials* 2009, 24 (7): 1141-1150.
- [19] Correia S. L., Partala T., Loch F. C., Segadães A. M. Factorial design used to model the compressive strength of mortars containing recycled rubber. *Composite Structures* 2010, 92 (9): 2047-2051.
- [20] Ahmad S., Elahi A., Barbhuiya S. A., Farid Y. Use of polymer modified mortar in controlling cracks in reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.023.
- [21] Laukaitis A., Zurauskas R., Keriene J. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. *Cement and Concrete Composites* 2005, 27 (1): 41-7.
- [22] Braga M., de Brito J., Veiga R. Incorporation of fine concrete aggregates in mortars, *Construction and Building Materials* 2011 (submitted for publication).
- [23] Neno C., de Brito J., Veiga R. Using fine recycled concrete aggregates for mortar Production. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2011 (submitted for publication).
- [24] Collins R. J., Ciesielski S. K. Recycling e use of waste materials e by-products in highway construction, *Synthesis of highway practice 199*, TRB, National Research Council, Washington DC, 1994
- [25] Reschner K. Scrap tire recycling. A summary of prevalent disposal e recycling methods, *EnTire-Engineering*, Berlin, Germany, 2008.
- [26] Valadares F., Bravo M., de Brito J. Concrete with used tire rubber aggregates: Mechanical performance. *ACI Materials Journal* 2011 (accepted for publication).
- [27] Bravo M., de Brito, J. Concrete made with used tyre aggregates: Durability-related performance. *Journal of Cleaner Production* 2011 (submitted for publication).