

Avaliação de desempenho da substituição da areia natural por areia de resíduos de vidro em betões estruturais



Luiz A. Pereira de Oliveira¹



João Paulo Castro Gomes²



Pedro Santos³

RESUMO

O artigo apresenta um estudo experimental que explora a viabilidade da reciclagem de resíduos de vidros coloridos, coletados nos serviços municipalizados de triagem de resíduos sólidos urbanos, na composição de betões estruturais. Betões produzidos com a substituição parcial ou total de areia natural de aluvião procedente do Rio Tejo pela fracção areia obtida da moagem de resíduos de vidros tiveram os seus desempenhos avaliados através das suas propriedades mecânicas e de durabilidade.

Para a avaliação do desempenho das misturas, com diferentes teores de substituição da areia natural por areia de vidro, foram determinadas as resistências à compressão dos betões, nas idades de 7, 28 e 90 dias. A durabilidade dos betões foi primeiramente avaliada através do ensaio expansividade ASTM C 1260, com a finalidade de detectar uma possível acção deletéria do tipo reacção álcalis-sílica, e através dos ensaios de absorção de água por capilaridade e de permeabilidade ao ar e à água.

Os resultados mostram um aumento significativo da resistência à compressão com o aumento da percentagem da substituição da areia natural pela areia de vidro. A substituição total da areia natural por areia de vidro é também responsável pela diminuição significativa da permeabilidade do betão. Os ensaios de expansividade testemunham a inocuidade dos resíduos de vidro como agente deletério da reacção álcalis-sílica, verificando-se aqui o efeito da mitigação desta reacção pelo uso de cinza volante na composição dos betões estudados.

PALAVRAS-CHAVE

durabilidade, expansão, permeabilidade, resistência à compressão, resíduo de vidro,

¹ Universidade da Beira Interior, Centre of Materials and Building Technologies, 6201-101 Covilhã, Portugal. luiz.oliveira@ubi.pt

² Universidade da Beira Interior, Centre of Materials and Building Technologies, 6201-101 Covilhã, Portugal. castro.gomes@ubi.pt

³ Universidade da Beira Interior, Centre of Materials and Building Technologies, 6201-101 Covilhã, Portugal. pmsantos@portugalmail.pt

1. INTRODUÇÃO

Em Portugal, as garrafas e outros recipientes de vidros coloridos coletados pelos serviços municipalizados constituem um problema aos municípios, pois nem sempre é possível dar destino ao material coletado como potencialmente reciclável na fabricação de vidros. De facto, as impurezas, os custos de transportes e os resíduos compostos de diferentes cores tornam pouco atrativo esse material como matéria-prima na indústria de vidros. A prática corrente na maioria dos municípios ainda é a deposição dos vidros não-recicláveis em aterros, o que revela uma solução pouco amiga do ambiente uma vez que o vidro não é um material biodegradável. Por outro lado, a indústria da construção civil necessita e procura alternativas para satisfazer o acréscimo da demanda na produção de betão e ao mesmo tempo dar respostas positivas nas questões ambientais e de sustentabilidade. Deste modo, o resíduo de vidros coloridos pode se tornar um atrativo para a produção de materiais de construção.

As Nações Unidas estimam que o volume de resíduos sólidos depositado é da ordem de 200 milhões de toneladas, dos quais 7% é constituído de resíduos de vidros [1]. Em Portugal, entre 1999 e 2005, foram produzidos 4 712 458 toneladas de resíduos sólidos urbanos dos quais 7.5% é constituído de vidros. De facto, apenas 30% do total de garrafas usadas é atualmente reutilizada e reciclada, significando que os restantes 70% são depositados em aterros.

O esforço de reduzir a deposição do resíduo de vidros em aterros tem sido perseguido, nas últimas décadas por vários investigadores, em estudos nos quais o resíduo de vidro foi utilizado como agregados, nomeadamente nos trabalhos de Schmidt & Saia [2], Johnston [3], Figg [4], Polley et al [5] and Shayan & Xu [6]. Resultados recentes [7] também mostram que os resíduos de vidro quando utilizados com dimensões entre 75µm-150µm não apresentam expansão excessivas no ensaio acelerado com corpos de prova de argamassa, tal como as observações de Shayan & Xu [8]. Porém, de acordo com Bazant et al [9] as partículas de vidro da ordem de 1,5 mm causam expansões excessivas, o que podem comprometer a durabilidade dos betões.

O uso de resíduo de vidro como agregado grosso no betão não tem revelado um efeito marcante sobre a trabalhabilidade, como deveria de se esperar pela sua lamelaridade, porém a resistência à compressão é reduzida proporcionalmente ao acréscimo da quantidade de resíduo utilizado [1]. Por outro lado, observou-se uma tendência da redução do abaixamento do tronco de cone com o aumento do conteúdo de agregado fino de resíduo de vidro nos betões, comportamento este que Park et al [10] justificam como sendo resultado da influência da forma dos grãos e do módulo de finura dos agregados de vidros. Estes autores também observaram que o aumento dos agregados finos de vidro provoca um decréscimo da resistência à compressão nos betões.

Por consequência, este trabalho foi desenvolvido no sentido de conhecer o comportamento mecânico e determinadas propriedades de avaliação da durabilidade de betões produzidos com areia de resíduos de vidro coletados na região centro de Portugal. Para a mitigação do potencial deletério do vidro nas propriedades mecânicas e de durabilidade do betão foi utilizado, neste trabalho, uma adição do tipo cinza volante e para a manutenção da classe de consistência e da relação água/cimento utilizou-se um adjuvante redutor de água.

2. ESTUDO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Os materiais utilizados para a produção dos betões foram: cimento Portland CEM I 42,5 R, em conformidade com a norma EN-197-1, com superfície específica Blaine de 384,8 m²/kg e massa volúmica de 3140 kg/m³; cinza volante com superfície específica Blaine de 400,9 m²/kg e massa volúmica 2380 kg/m³; areia do Tejo de dimensão máxima de 4,76 mm, módulo de finura 3,47 e massa volúmica 2520 kg/m³. Como agregado grosso utilizou-se uma brita granítica de dimensão máxima de

12,7 mm e massa volúmica de 2698 kg/m³. O resíduo de vidro âmbar foi moído em um britador de mandíbulas para produzir um agregado fino com dimensão máxima de 4,76 mm, massa volúmica de 2509 kg/m³ e módulo de finura de 2,40.

2.2 Misturas de betão

Uma mistura de referência foi produzida com as seguintes proporções em massa: 1:0,29:1,87:3,14 (cimento : cinza volante : agregado fino : agregado grosso) e com uma relação água/cimento 0,60. Com o intuito de estudar o efeito da areia de vidro nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos betões produziram-se outras misturas com a substituição da areia natural por areia de vidro nas seguintes proporções: 25, 50 e 100%. O Quadro 1 apresenta a composição das 4 misturas utilizadas neste estudo.

Quadro 1. Quantidades dos materiais componentes das misturas (kg/m³).

Descrição	Cimento	Cinza Volante	Agregado grosso	Areia natural	Areia de vidro	Água
Referência	350	101.5	1099	654.5	0	210
25% ARV ^a	350	101.5	1099	490.8	163.6	210
50% ARV	350	101.5	1099	327.25	327.25	210
100% ARV	350	101.5	1099	0	654.5	210

^a ARV = areia de resíduo de vidro

2.3 Trabalhabilidade

A avaliação da potencialidade de trabalhabilidade dos betões frescos foi realizada através dos ensaios de abaixamento do tronco de cone e da mesa de espalhamento, de acordo com a EN 12350-2 e EN 12350-5, respectivamente. Definiu-se para a mistura de referência um abaixamento do tronco de cone de 100 mm ± 10 mm. Devido a influência da areia de vidro, sobretudo da sua forma e do módulo de finura, na redução da consistência foi utilizado um adjuvante redutor de água para manter nas misturas com areia de vidro a mesma consistência definida para a mistura de referência. A dosagem do adjuvante foi de 0,2% da massa de cimento para a mistura com 25% de areia de vidro e de 0,3% para as misturas com 50% e 100% de areia de vidro.

2.4 Resistência à compressão

A resistência à compressão das misturas produzidas foi determinada em conformidade com a EN 12390-3, aos 7 e 28 dias de idade, em cubos de 150 mm de arestas mantidos em condições padrões de temperatura e umidade (21 ± 2°C, 100%).

2.5 Expansividade

Com o objetivo de avaliar a capacidade de mitigação, pela presença de cinza volante, de reações expansivas do tipo reação álcalis-sílica (RAS) que são possíveis de ocorrerem com a incorporação de partículas de vidros superiores a 150 mm, foi realizado um ensaio acelerado de expansão em barras de argamassa. Para cada mistura estudada foi produzido, para o ensaio de expansão, três corpos de prova com as dimensões de 40 x 40 x 160 mm. Após 24 horas de cura normal os corpos de prova foram imersos em água por 24 horas e em seguida foram colocados em recipientes fechados com uma solução de 1 N NaOH a 80°C. Durante 14 dias foram medidos os comprimentos dos corpos de prova através de um aparelho comparador digital com precisão da ordem de 0,002 mm.

2.6 Absorção de água por capilaridade

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram conduzidos em corpos de prova com 7,5 x 7,5 x 15cm, após a secagem dos mesmos em estufas na temperatura de 60°C ± 5°C até constância de

massa. As faces laterais dos corpos de prova foram impermeabilizadas a fim de reduzir o efeito da evaporação de água. Após o registo da massa, os corpos de prova foram colocados em contacto com uma lâmina de água de cerca de 5mm. A cada tempo predefinido, os corpos de prova eram retirados do recipiente, a água em excesso na superfície de contacto era removida com o auxílio de um tecido molhado e em seguida pesados. Imediatamente após a pesagem os corpos de prova eram recolocados no recipiente até a próxima pesagem. O procedimento era repetido em vários instantes tais como, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 90, 130 e 150 minutos até a última pesagem.

Em razão da tensão superficial no início ser muito baixa e devido aos efeitos de embebição, a relação entre a absorção de água acumulada (kg/m^2) e a raiz quadrada do tempo em minutos ($t^{0.5}$) apresenta nos primeiros minutos um desvio da sua linearidade [3]. Assim, para o cálculo do coeficiente de capilaridade, considerou-se apenas o intervalo de tempo de 10 min a 90 min, onde os resultados se alinham linearmente com maior consistência. O coeficiente de capilaridade (k) foi obtido a partir da seguinte expressão:

$$\frac{W}{A} = k\sqrt{t} \quad (1)$$

Onde W = quantidade água adsorvida (kg); A = a secção transversal do corpo de prova em contacto com a água (m^2); t = tempo (min); k = coeficiente de capilaridade ($\text{kg/m}^2/\text{min}^{0.5}$).

2.7 Permeabilidade à água e ao ar.

Os ensaios de permeabilidade à água e ao ar foram realizados em células de permeabilidade segundo um procedimento descrito por Gomes et al [11]. Estes ensaios foram realizados nas células de permeabilidade com corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 4 cm de altura submetidos à uma certa pressão que garante o escoamento uniaxial do fluido de ensaio através do corpo de prova. Tratando-se de uma metodologia adaptada, os corpos de prova foram inicialmente secos em estufa à temperatura de 60°C, durante 48 horas. O ensaio de permeabilidade à água foi realizado após o ensaio de permeabilidade ao ar, de maneira similar e com o mesmo corpo de prova.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são apresentados na Fig 1. Observou-se que a resistência à compressão aumenta com o acréscimo do conteúdo de areia de vidro no betão. Para cada proporção de substituição de areia natural por areia de vidro (25%, 50% e 100%), a resistência à compressão cresce na ordem de 26%, 26% e 34%, respectivamente, aos 7 dias. Aos 28 dias o aumento foi de 24%, 25% e 29%. Estes resultados são contrários aos obtidos por Park et al [10] e por Topçu & Canbaz [1]. Em geral, a resistência à compressão de betões contendo agregados de vidro são inferiores aos que utilizam agregados naturais. As resistências são particularmente mais baixas quando se utilizam cimentos com alto conteúdo de álcalis. Este aparente desacordo é provavelmente causado pelo uso da cinza volante, cerca de 30%, que demonstrou efectivo controlo mitigando as reacções expansivas, evitando assim um decréscimo das resistências.

Por outro lado, a parte mais fina da areia vidro além de poder agir com material reativo ainda pode contribuir para a melhoria do empacotamento granular através do seu efeito de “filer”. Quando a superfície específica do agregado é aumentada numa mistura de proporções constantes, a quantidade de cimento relativamente a superfície do agregado diminui. Lallard & Belloc [12] constataram que quando a espessura máxima de pasta entre as partículas de agregados diminui, a resistência à compressão aumenta. Verificou-se também a existência de altas tensões nos pontos de contactos de partículas dos agregados nos empacotamentos secos. Assim, quando a pasta é introduzida no

empacotamento e esta se posiciona entre dois agregados, a pasta passa a ser submetida a altas tensões transferindo ou criando uma matriz mais resistente.

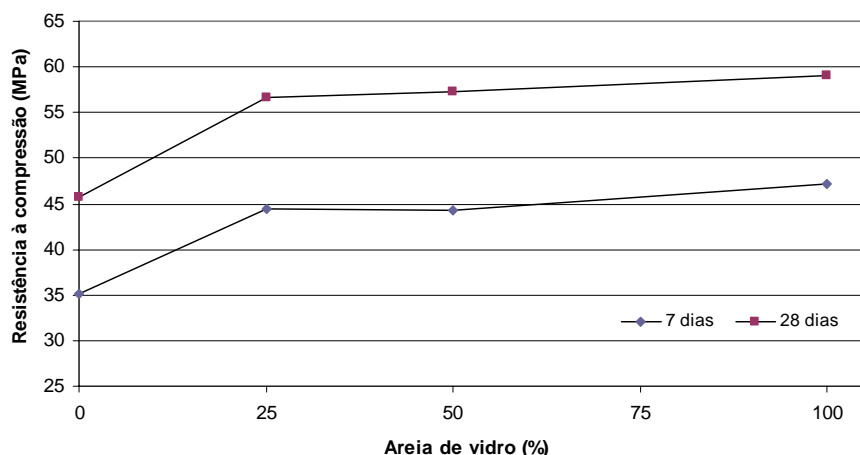


Figura 1. Resistência à compressão de misturas com areia de vidro, aos 7 e 28 dias de idade

3.2 Expansividade do betão com areia de vidro

Os resultados apresentados na Fig. 2, demonstram que a incorporação da areia de vidro no betão não causa reação expansiva que possa ser considerada suspeita de comprometer a durabilidade do betão. Os valores de expansão são relativamente baixos se compararmos com o valor limite de 0,1%, prescrito na norma ASTM C 1260, para a idade de 14 dias.

Na Figura 2, as curvas que representam a evolução da expansão das misturas com substituição de 100% e 50% da areia natural pela areia de vidro revelam um aumento de expansão no tempo similar ou inferior ao que se observa na mistura de referência. Embora a expansão aos 14 dias tenha atingido valores máximos 60% superior ao valor da mistura de referência, ainda assim pode-se argumentar que a adição de cinza volante ofereceu um comportamento mais estável às misturas com incorporação de areia de vidro. Este efeito coloca em evidência o potencial de fabricação de betões com cinza volante e areia de vidro para obtenção de resistência elevada sem nenhuma reação adversa.

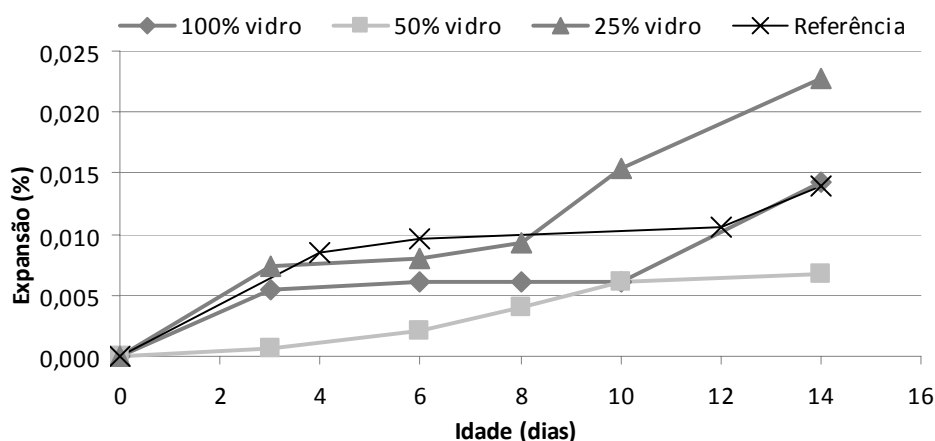


Figure 2. Expansão de corpos de prova de betão imersos em solução de NaOH

3.3 Avaliação da durabilidade

Foi observado uma redução dos coeficientes de capilaridade com a adição da areia de vidro nos betões. A Figura 3 mostra que a redução atinge um máximo de 39% aos 28 dias e 29% aos 63 dias, quando se substitui 100% da areia natural pela areia de vidro. Esta redução pode ser influenciada pelo melhoramento do empacotamento de grãos provocado pela granulometria da areia de vidro reduzindo assim a presença de poros capilares.

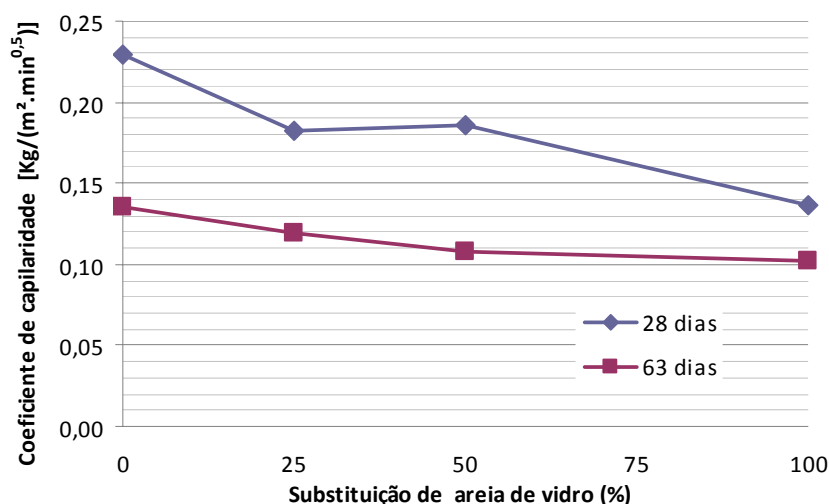


Figure 3. Coeficiente de capilaridade de diferentes misturas de betão aos 28 e 63 dias

As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados obtidos em betões produzidos com diferentes percentagens de substituição da areia natural. Todos os resultados apresentados nessas figuras são valores médios obtidos em 4 corpos de prova. A Figura 4 mostra a influência da substituição da areia natural pela areia de vidro nos coeficientes de permeabilidade ao ar nas idades de 28 e 63 dias. Aos 28 dias observou-se um aumento, entre 20 e 30%, na permeabilidade ao ar das misturas com 25% e 50% de areia de vidro, porém há uma diminuição significativa quando se usa 100% de areia de vidro no betão.

De maneira geral, a permeabilidade ao ar é reduzida pela metade com a evolução da idade do betão. Ao fim de 63 dias a permeabilidade ao ar nos betões com areia de vidro são similares ao betão com areia natural.

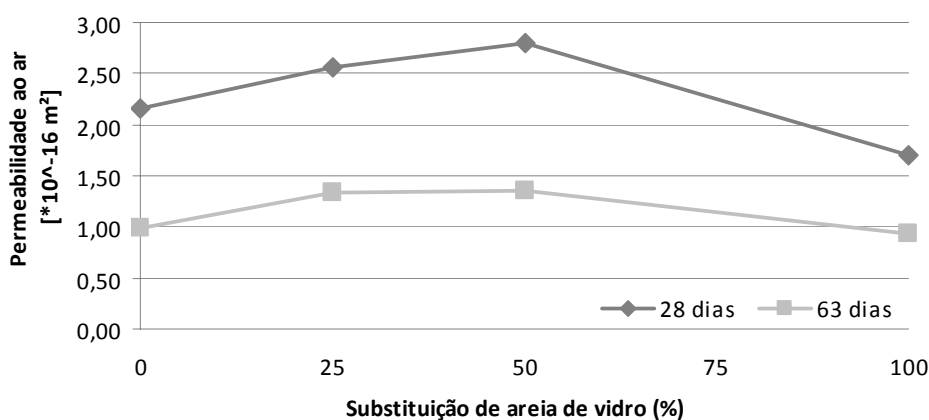


Figure 4. Coeficiente de permeabilidade ao ar de diferentes misturas de betões aos 28 e 63 dias

A Figura 5 mostra que as misturas estudadas apresentam uma evolução da permeabilidade à água no tempo semelhantes, o que significa uma redução dos coeficientes com o tempo, um aumento quando

se combina a areia natural com a areia de vidro e a mesma ordem de valores nos betões produzidos com um só tipo de agregado fino, seja areia natural ou areia de vidro.

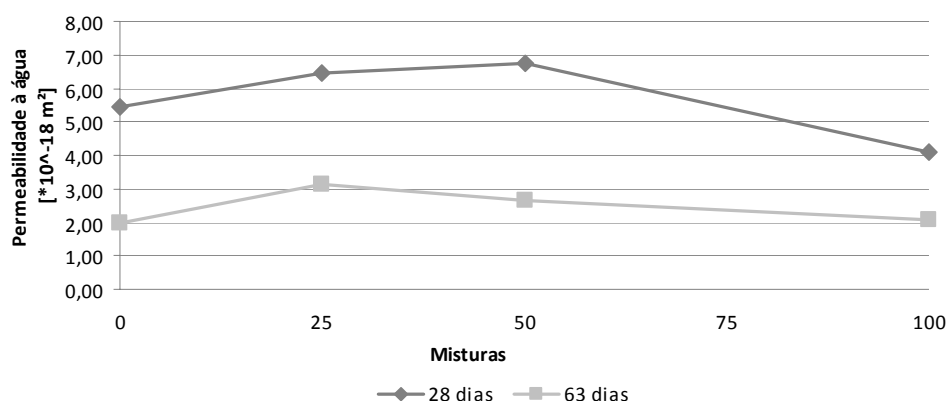


Figure 5. Coeficiente de permeabilidade à água de diferentes misturas de betões aos 28 e 63 dias.

4 CONCLUSÃO

A partir da investigação do efeito da substituição total e parcial da areia natural por uma areia produzida a partir de resíduos de vidros, pode-se esboçar as seguintes conclusões:

Com a manutenção da trabalhabilidade, em misturas de relações água/cimento mantidas constantes, foi possível manter a resistência característica de 40MPa em todos os casos de substituição.

A manutenção da consistência na classe S3, devido sobretudo o efeito da lamelaridade dos grãos de vidro, foi possível com a utilização de um adjuvante altamente redutor de água para manter constante a relação água/cimento.

A substituição parcial e total da areia natural pela areia de resíduos de vidro revelou uma melhoria significativa na resistência à compressão dos betões, nos quais a reação expansiva do tipo álcalis-sílica foi mitigada pela adição de cinza volante.

Os betões com areia de resíduos de vidro apresentaram coeficientes de capilaridade inferior ou similar ao valor da mistura de referência.

Finalmente, os resultados deste estudo indicam que a areia produzida a partir de resíduos de vidros coloridos pode ser um substituto satisfatório das areias naturais promovendo benefícios económicos e ambientais consideráveis às comunidades envolvidas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação para Ciência e Tecnologia pelo apoio através do financiamento ao projecto POCI/ECM/55588/2004.

REFERÊNCIAS

- [1] Topçu, I. B. & Canbaz M. - Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research* 2004, 34, 267-274.
- [2] Schmidt, A. & Saia, W. H. F. -Alkali-aggregate reaction tests on glass used for exposed aggregate wall panel work. *ACI Mat. J.*, 1963, 60, 1235 – 1236.
- [3] Johnston, C. D.- Waste glass as coarse aggregate for concrete. *J. Testing and Evaluation*, 1974, 2(5), 344-350.
- [4] Figg, J. W. - Reaction between cement and artificial glass in concrete. *Proc. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Cape Town, South Africa, 1981.
- [5] Polley, C., Cramer, S. M. and Cruz R.V. - Potential for using waste glass in portland cement concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1998, 10 (4), 210-219.
- [6] Shayan A. and Xu A. - Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34, 81-89.
- [7] Oliveira L. A. P., Gomes J. P. C. and Santos P. - Optimization on pozzolanic reaction of ground waste glass incorporated in cement mortars. *Portugal SB07 Sustainable Construction, Materials and Practices*, L. Bragança et al (Eds.) IOS Press, 2007, Part 2, pp. 928-934.
- [8] Shayan A. and Xu A. - Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: a field trial on concrete slabs. *Cement Concrete Research*, 2006, 36, 457-468.
- [9] Bazant Z. P., Jin W. and Meier C. - Fracture mechanics of concrete structures. *Proc. FRA MCOS*, 1998, 3, 1687-1693.
- [10] Park, S.B., Lee B. C. and Kim J. H. - Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. *Cement Concrete Research*, 2004, 34, 2181-2189.
- [11] Gomes, J. P.C, Oliveira, L.A.P., Gonilho, C.N.P. and Torgal, F.M.A.S.P. - Discussion of Aggregate and Concrete Water Absorption and Permeability Testing Methodology. *XXX IAHS World Congress on Housing*, Coimbra, Portugal, Oktay U, Abrantes V, Tadeu a (Eds.), 2002, Vol. III, pp 1761- 1768.
- [12] Lallard, F., Belloc A. - The influence of aggregate on the compressive strength of normal and high-strength concrete. *ACI Materials Journal*, 1997, Vol. 94, No. 5, pp. 417-426.