

Reaproveitamento de resíduos de borracha de pneus em betões

■ Eng.º F. Pacheco Torgal, Doutor em Materiais de Construção, Grupo de Construção Sustentável Unidade de Investigação C-TAC, Universidade do Minho
Eng.º Saïd Jalali, Professor Catedrático, Dept. de Eng.ª Civil, Universidade do Minho

Estima-se que anualmente 1.000 milhões de pneus atingem o fim da sua vida útil e que no ano 2030 esse número atinja 5.000 milhões de pneus. Actualmente só uma pequena parte desses resíduos é reciclada, sendo que milhões de pneus são apenas amontoados, colocados em aterro ou enterrados. O presente artigo sintetiza o estado actual dos conhecimentos técnicos e científicos sobre o desempenho dos betões contendo resíduos de borracha de pneus. São objecto de análise a influência dos tratamentos dos resíduos de borracha, a dimensão das partículas da borracha e o volume de substituição de agregados por resíduos de borracha nas propriedades dos betões no estado fresco e endurecido.

Introdução

Os resíduos de pneus representam um problema ambiental de gravidade crescente. Actualmente 1.000 milhões de pneus atingem o fim da sua vida útil a cada ano que passa [1]. Elevadas quantidades de resíduos de pneus são simplesmente amontoadas (Figura 1) em depósitos clandestinos (pneus inteiros) ou depositadas em aterro (pneus triturados), representando 3.000 milhões de pneus na União Europeia e 1.000 milhões nos Estados Unidos [2]. No ano 2030 espera-se que o número de veículos com motor atinja 1.200 milhões, o que implicará a necessidade de reciclar 5.000 milhões/ano. A deposição de pneus em aterro apresenta riscos ambientais consideráveis. Por um lado porque essa opção contribui para

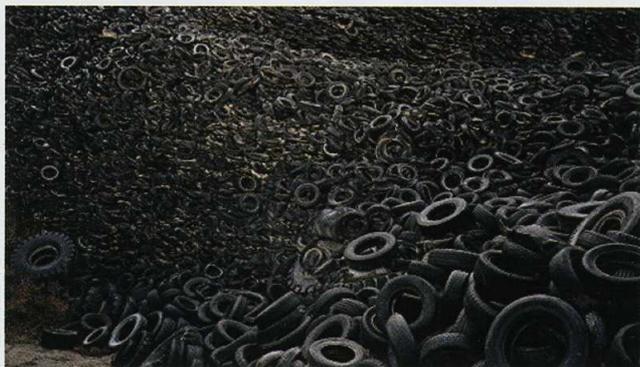


Figura 1. Depósito de pneus na Califórnia (Fotografia tirada em Dezembro de 2009)

a redução das áreas necessárias à preservação da biodiversidade e, por outro, porque estes resíduos contêm compostos tóxicos solúveis. Além disso, e embora os resíduos de pneus sejam de difícil ignição, o risco de que tal aconteça está sempre presente. E assim que os pneus começam a arder devido a causas acidentais há emissão de fumos tóxicos e as temperaturas elevadas provocam a dissolução da borracha gerando óleo que vai contaminar o solo e a água. Nos Estados Unidos (Ohio) um depósito com 25 milhões de pneus, ocupando uma área de 44 hectares, começou a arder em Agosto de 1999 tendo sido necessários 250 bombeiros durante 5 dias para combater o fogo (Figura 2). A implementação da Directiva sobre Aterros 1999/31/EC e a Directiva sobre o fim de vida dos pneus 2000/53/EC vieram proibir a deposição em aterro dos resíduos de pneus forçando a procura de soluções alternativas. Infelizmente, milhões de pneus em fim de vida continuam ainda hoje a ser enterrados em



Figura 2. Depósito com 25 milhões de pneus no Ohio: a) Aspecto geral do depósito com indicação dos locais onde houve queima de pneus; b) Imagem da intensidade de libertação de fumos

todo o Planeta. Nalguns países a borracha proveniente dos resíduos de pneus é utilizada para efeitos de pavimentação, contudo o seu volume representa apenas uma pequena parte dos resíduos já existentes. Em Portugal a execução de betões betuminosos com borracha reciclada de pneus tem vindo a crescer desde 1999, data em que a Administração Rodoviária Portuguesa aprovou o uso de misturas com betume modificado com borracha reciclada de pneus. As referidas misturas permitem, em média, o reaproveitamento da borracha de aprox. 4.000 pneus por cada quilómetro de estrada (admitindo uma largura de via de 12m e uma espessura da camada de desgaste de 4cm), havendo registos que apontam para que desde 1999 até 2007 tenham sido reaproveitados em Portugal mais de 1.200.000 pneus para este fim. Uma outra alternativa para o reaproveitamento destes resíduos passa pela sua utilização em recifes artificiais, contudo algumas investigações [3], colocam em causa a validade desta solução. Os resíduos de pneus também podem ser usados para fins energéticos em fornos de unidades produtoras de cimento e, ainda, na produção de um subproduto de baixo valor comercial designado como "carvão negro" ou "negro de fumo", o qual é obtido através da pirólise dos pneus. Investigações levadas a cabo relativamente à substituição parcial de agregados em betões por partículas de borracha provenientes de pneus reciclados referem que os mesmos apresentam potencial para um desempenho melhorado em termos de tenacidade. Os agregados de borracha reciclada podem ser obtidos usando duas tecnologias distintas: trituração mecânica à temperatura ambiente ou trituração criogénica a uma temperatura inferior à temperatura de transição vítrea, temperatura para a qual a borracha adquire um comportamento frágil. O primeiro processo gera resíduos com um aspecto lascado que podem substituir agregados grossos; já o segundo produz um resíduo com menor dimensão utilizado para substituição da areia. Como a procura de cimento a nível mundial se prevê que cresça dos actuais 3.000 milhões de toneladas para 6.000 milhões (Figura 3), é expectável que o consu-

mo de betão cresça a um ritmo semelhante, o que constitui um fim muito interessante para o reaproveitamento da borracha dos resíduos de pneus.

Propriedades dos betões com resíduos de borracha no estado fresco

Trabalhabilidade

Albano *et al.* [5] utilizaram agregados de borracha com duas dimensões (0,29mm e 0,59mm) que substituiu por 5% e 10% de areia tendo obtido uma redução de 88% no ensaio de abaixamento. Outros autores [6] usaram agregados de borracha grossos (0,5 e 2mm) e agregados finos (0,05 e 0,7mm) para substituir respectivamente 22,2% e 33,3% dos agregados finos de um betão auto-compactável, tendo observado que a utilização dos agregados reciclados não reduz a trabalhabilidade se a quantidade de superplastificante for aumentada. Batayneh *et al.* [7] utilizaram agregados de borracha com duas dimensões (0,075 e 4,75mm) para diversas percentagens de substituição (20%, 40%, 60% e 100%) tendo observado que o aumento do volume de agregados de borracha reciclada diminui a trabalhabilidade. Topçu & Bilir [8] estudaram o desempenho de betões auto-compactáveis contendo agregados de borracha (dimensão máxima de 4mm) tendo observado que o aumento da quantidade dos agregados de borracha até 180kg/m³ conduz a um aumento da trabalhabilidade, facto que na opinião daqueles autores se fica a dever à utilização de agentes de viscosidade. Aiello & Leuzzi [9] utilizaram borracha reciclada com dimensões entre 10mm e 25mm (Figura 4) para substituir areia e agregados grossos, juntamente com 1% de superplastificante por massa de cimento tendo observado um aumento da trabalhabilidade com o aumento do volume daqueles. Outros autores [10] utilizaram diferentes volumes de agregados de borracha reciclada (5%, 15% e 25%) conjuntamente com diferentes volumes de superplastificante. Estes autores referem que a mistura com um volume de 25% de agregados reciclados não conseguiu cumprir o abaixamento

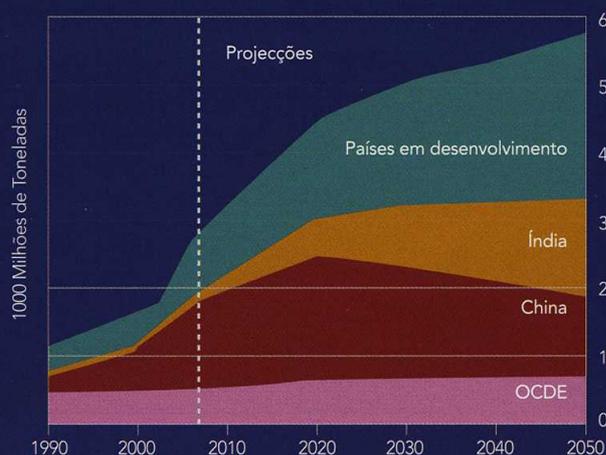


Figura 3. Previsão para o consumo de cimento Portland [4]



Figura 4. Agregados de borracha reciclados à saída do processo de trituração [9]

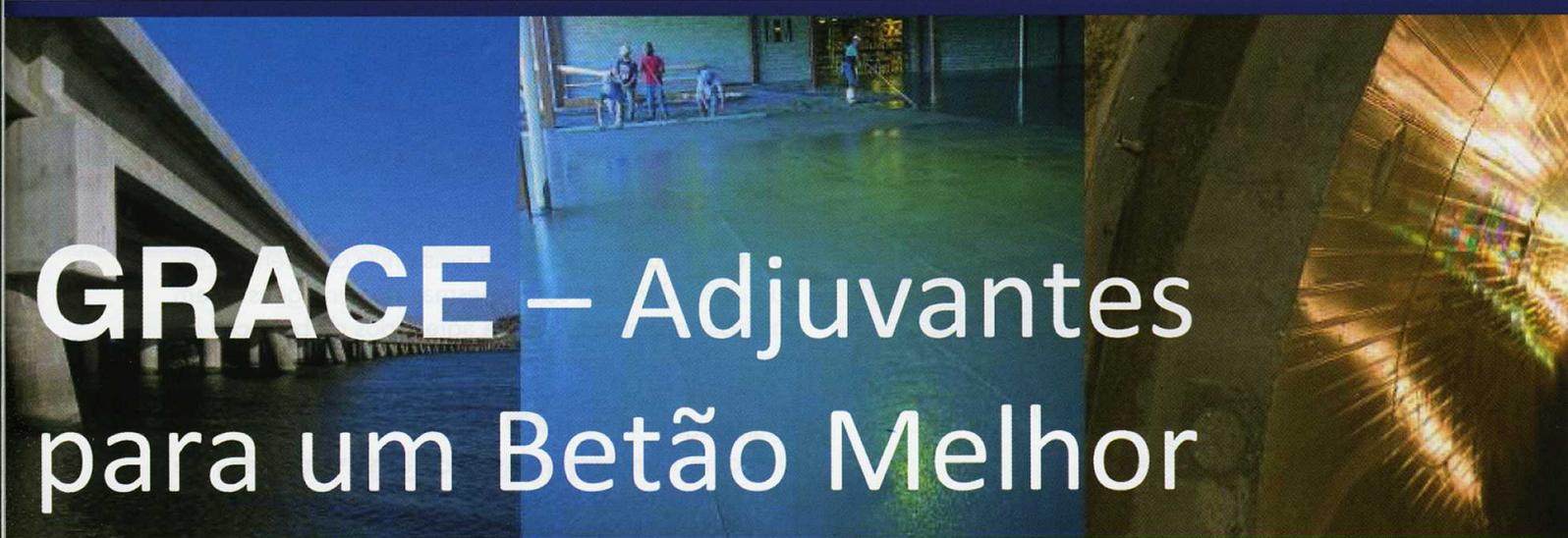
de 750mm \pm 50mm mesmo com 4% de superplastificante por massa de cimento. Referem ainda que a utilização de cinzas volantes permite reduzir a quantidade de superplastificante nas misturas com elevado volume de agregados de borracha reciclada. Embora a maioria das investigações mostrem que a utilização de agregados de borracha reciclada provocam uma redução da trabalhabilidade, alguns autores obtiveram resultados opostos, o que mostra que a trabalhabilidade destes betões está muito dependente das características geométricas dos agregados de borracha.

Propriedades dos betões com resíduos de borracha no estado endurecido

Resistência à compressão

A resistência à compressão dos betões com agregados reciclados de borracha decresce com o seu volume, contudo alguns autores [11] referem que ainda assim é possível produzir um betão com uma resistência de 40MPa e com um volume de agregados de borracha de 15%. Valadares [12] refere que a substituição de um volume de 15% conduz a uma redução da resistência de 50%. Este autor observou que a utilização de borracha de me-

nor dimensão está associada a uma menor redução da resistência e que o processo de produção de borracha (mecânico ou criogénico) não influencia a resistência à compressão. Freitas *et al.* [13] observaram uma redução da resistência à compressão de 48,3% para um volume de borracha reciclada de 15%. Outros autores [9] referem que a dimensão dos agregados de borracha tem uma influência elevada na resistência à compressão. Quando se utilizam agregados de borracha de maior dimensão a perda de resistência dos betões é quase o dobro relativamente à situação de se utilizarem partículas de menor dimensão. Estes resultados são diferentes dos obtidos por outras investigações [12] e podem estar relacionados com a origem da borracha utilizada em cada caso (carro, camião ou motociclo), sendo que pneus com diferentes origens tem diferentes teores de borracha e diferente composição química o que leva a diferentes níveis de aderência entre a pasta de cimento e os agregados de borracha. Vieira *et al.* [14] analisou três tipos de agregados de borracha e três volumes de substituição (2.5%, 5% e 7.5%) tendo observado que o betão com a melhor resistência à compressão continha apenas 2.5% de borracha reciclada com a dimensão de 2.4mm. A utilização de pré-tratamentos da borracha pode aumentar a sua



GRACE – Adjuvantes para um Betão Melhor

Grace Construction Products

GRACE é especialista em adjuvantes, fibras sintéticas e produtos para Betão Pronto, Préfabricado, e Arquitectónico.

MIRA®: Plastificantes, potenciadores de resistências.

ADVA®: Superplastificantes policarboxílicos para betão pronto

ADVA® Flow: Superplastificantes para betões autocompactáveis

ADVA® Floor: Superplastificantes para betões em pavimentos

ADVA® Cast: Superplastificantes para betões préfabricados

Gama Pieri®: Produtos para betões arquitectónicos

A PERFORMANCE TEM UM NOME

Para mais informação contacte-nos em **Tel./Fax: 213 869 213 Tel.mov: 919 690 152**

www.graceconstruction.com

sccINFORMA.es@grace.com

GRACE

aderência à pasta de cimento, como seja por exemplo a utilização de uma solução de 10% NaOH para lavar a superfície da borracha durante 20 minutos. O hidróxido de sódio provoca a remoção do estearato de zinco da superfície da borracha, um aditivo que é responsável pela sua baixa aderência. Segre & Joekes [15] referem que os pré-tratamentos que podem ser usados para o aumento da aderência das partículas de borracha reciclada incluem imersão em meio ácido e o uso de plasma e ainda de substâncias à base de silanos. Outros autores [16] sugerem a utilização de agregados de borracha previamente cobertos com pasta de cimento (Figura 5).



Figura 5. Agregados de borracha com 20 mm:
a) Normais; b) Cobertos com pasta de cimento [16]

Outros autores [5] analisaram betões contendo agregados de borracha tratados com NaOH e silanos; contudo não observaram diferenças relevantes na comparação com o desempenho de betões com agregados de borracha não tratados. Chou *et al.* [17] sugere o pré-tratamento dos agregados de borracha com um produto à base de enxofre orgânico referindo que o mesmo pode modificar a superfície da borracha aumentando a aderência à pasta de cimento. As investigações sobre a utilização de agregados de borracha revelam que os mesmos podem provocar a redução da resistência à compressão dos betões. Este comportamento fica a dever-se por um lado à baixa resistência à compressão dos próprios agregados mas, fundamentalmente, à baixa aderência entre estes agregados e a pasta de cimento, havendo vários pré-tratamentos que apresentam potencialidades para ultrapassar esta desvantagem.

Resistência à tracção

Alguns autores [11] analisaram a resistência à tracção de betões contendo agregados de borracha reciclada, tendo observado que o aumento do volume destes conduz à redução daquele parâmetro. Os resultados obtidos revelam que a redução da resistência à tracção é menos influenciada pelo aumento do volume de agregados de borracha do que a resistência à compressão. Este comportamento parece ficar a dever-se ao facto das partículas de borracha terem um efeito de restrição de abertura das fissuras. Valadares [12] obteve os maiores valores da resistência à tracção em betões com partículas de borracha de maior dimensão o que confirma resultados de outros autores. Ganjian *et al.* [18] referem ter observado um comportamento oposto, sendo que a resistência à tracção de betões com agregados grossos de borracha é muito inferior à mesma resistência para betões com agregados de borracha de menor dimensão. No primeiro caso uma substituição de 5 a 10% conduz a uma redução da resistência entre 15 a 30%, já no segundo o mesmo volume provoca uma perda de resistência entre 15 a 30%. Este comportamento pode ter que ver com a baixa aderência entre os agregados de borracha grossos e a pasta de cimento, pelo facto de terem sido cortados com tesoura e apresentarem uma superfície pouco rugosa, um procedimento que é bastante diferente da trituração mecânica que favorece o aparecimento de partículas mais rugosas. De acordo com Aiello & Leuzzi [9] quando se utilizam partículas de borracha reciclada de baixa dimensão para substituir a areia obtêm-se betões cuja resistência à tracção é muito idêntica à do betão de referência. A substituição de um volume entre 50% ou 75% origina uma redução da resistência de apenas 5.8% ou 7.30%. Contudo se as mesmas percentagens forem utilizadas na substituição de agregados de borracha de maior dimensão a perda de resistência é de quase 30%.

Tenacidade

Os compósitos cimentícios contendo agregados de borracha reciclada apresentam uma elevada tenacidade [19] estando associados a uma capacidade de absorção de energia considerável. A norma ASTM C1018-97 define vários índices de tenacidade (I5, I10 e I20), os quais são obtidos através do quociente entre a área abaixo da curva carga/deslocamento num ensaio de flexão após a ocorrência da primeira fissura e a mesma área até à ocorrência dessa fissura. Alguns autores [20] observaram um aumento de 63.2% na capacidade de redução da amplitude das vibrações (amortecimento) de betões contendo 20% de agregados de borracha reciclada. Outros autores [21,22] confirmam o elevado potencial de amortecimento dos betões com agregados de borracha, o qual está no entanto dependente das dimensões dos agregados. Os mesmos referem que os betões com agregados finos (Figura 6a) apresentam um aumento de 75.3% na capacidade de amortecimento, subindo esse valor para 144% quando se

utilizam agregados grossos de borracha (Figura 6b).



Figura 6. Agregados de borracha reciclada: a) Moída; b) Triturada [21]

Durabilidade

Como os betões contendo agregados de borracha reciclada apresentam menor resistência à compressão e à tracção é expectável que apresentem menor resistência quando submetidos a ensaios de degradação acelerada. Alguns autores [22] confirmam a premissa atrás enunciada referindo que betões com aquele tipo de agregados apresentam menor resistência à abrasão e ainda que o aumento do volume de incorporação dos mesmos se traduz numa redução dessa resistência. Freitas et al. [13] analisou a resistência à abrasão em meio imerso, de betões com agregados de borracha, referindo que estes apresentam uma resistência maior comparativamente aos betões de referência, desde que o volume de borracha utilizado não seja superior a 5% em massa. Este resultado é interessante na justa medida em que esta mistura apresenta uma resistência à compressão que é 30% inferior à do betão de referência. Esta mistura apresenta no entanto uma resistência à tracção obtida no ensaio de compressão diametral que é apenas 11% inferior à do betão sem borracha, o que ajuda a compreender a sua elevada resistência à abrasão. Os referidos autores utilizaram esta mistura em obras de reabilitação de uma estrutura de betão de uma barragem. Fioriti et al. [24] analisaram o desempenho de betões contendo entre 8% a 12% de resíduos de granulado de borracha de pneus (60% com $d < 1,19\text{mm}$) para produção de blocos de pavê (Figura 7), verificando que os mesmos obtêm uma resistência ao impacto que é quase 300% superior à do betão de referência.



Figura 7. Blocos de pavê em betão com resíduos de borracha [24]

Ling et al. [25] analisaram 348 blocos para calçada tendo observado que um aumento do volume de agregados de borracha provoca uma redução da resistência à abrasão, recomendando que para aquela aplicação não devem ser usadas misturas com um volume superior a 20%. Topçu & Demir [26] referem que betões com elevado volume de agregados de borracha, com dimensão entre 1 e 4mm, apresentam baixa durabilidade aferida em ensaio de gelo-degelo, imersão em água do mar e em ciclos de elevada temperatura. De acordo com estes autores a utilização de betões com um volume de 10% de agregados de borracha só é indicada para regiões com condições climáticas pouco severas. Importa ter em conta que estes autores utilizaram um cimento Portland II/B 32.5 o que poderá explicar os baixos desempenhos observados. Ganjian et al. [18] estudaram a durabilidade de betões com agregados de borracha através do ensaio de permeabilidade à água (Figura 8), revelando que os betões com uma percentagem de apenas 5% daqueles agregados apresentam um aumento da permeabilidade de 36%. Ainda assim as misturas com 5% e 7.5% de agregados de borracha apresentam um nível de permeabilidade inferior a 30mm o que, de acordo com a norma DIN 1048, os classifica como betões de baixa permeabilidade.

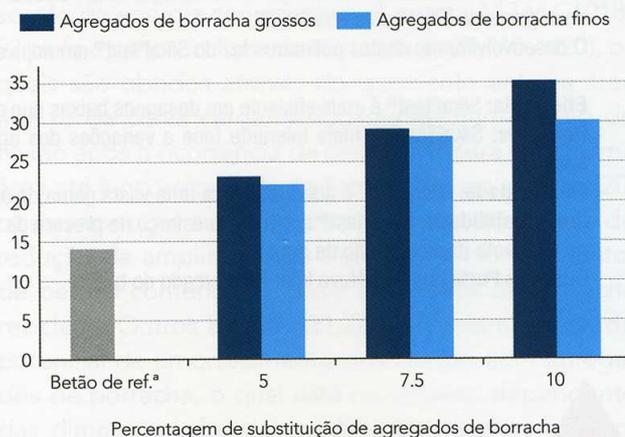


Figura 8. Permeabilidade à água em betões com agregados de borracha de pneus [9]

A utilização de agregados de borracha finos está associada e menores níveis de permeabilidade à água mas as diferenças não são relevantes. Aumentando o volume de agregados de borracha para 10% verifica-se uma duplicação da permeabilidade à água. Tal significa que betões com volumes de agregados de borracha superiores a 7.5% não são indicados para aplicações sujeitas a água sobre pressão, como pilares imersos ou reservatórios de água. A durabilidade dos betões com agregados de borracha é uma área que necessita ainda de mais investigações, particularmente no sentido de saber como os diferentes tipos de borracha influenciam os diferentes parâmetros de durabilidade e também para se saber de que forma os pré-tratamentos visando aumentar a aderência entre a borracha e a pasta de cimento influenciam a durabilidade destes betões.

Conclusões

Os resíduos de pneus constituem um grave problema ambiental cuja resolução assume um carácter de urgência. As investigações já realizadas sobre o reaproveitamento de borracha reciclada, proveniente de resíduos de pneus em betões na substituição parcial de agregados de origem mineral, revelam que o comportamento destes materiais é muito influenciado pelo volume e pelas características dos referidos resíduos. Importa, no entanto, ressaltar que os resultados obtidos são muito promissores, pois para além da vantagem ambiental que representa evitar a deposição destes resíduos em aterro, estes betões poderão ver algumas das suas propriedades melhoradas sendo por isso especialmente indicados para regiões sujeitas a um risco sísmico elevado e também para aplicações de materiais submetidos a cargas dinâmicas muito intensas, como aquelas a que estão sujeitas as travessas utilizadas em ferrovias.

REFERÊNCIAS

- [1] World Business Council for Sustainable Development - WBCSD End-of-life tyres: A framework for effective management systems, 2010.
- [2] Oikonomou, N.; Mavridou, S. The use of waste tyre rubber in civil engineering works. In Sustainability of construction materials Ed. J., Khatib, ISBN 978-1-84569-349-7, WoodHead Publishing Limited, Abington Hall, Cambridge, UK, 2009.
- [3] Hartwell, S.; Jordahl, D.; Dawson, C.; Ives, A. Toxicity of scrap tyre leachates in estuarine salinities: are tyres acceptable for artificial reefs? *Trans Am Fisheries Society*, 1998, v.127, p.796-806.
- [4] Taylor, M.; Gielen, D. Energy efficiency and CO2 emissions from the global cement industry. International Energy Agency, 2006.
- [5] Albano, C.; Camacho, N.; Reyes, J.; Feliu, J.; Hernández, M. Influence of scrap rubber addition to Portland concrete composites: destructive and non-destructive testing. *Compos Struct*, 2005, v.71, p. 439-446.
- [6] Bignozzi, M.; Sandrolini, F. Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 2006, v. 36, p. 735-739.
- [7] Batayneh, M.; Marie, I.; Asi, I. Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries. *Journal of Waste Management*, 2008, v.28, p. 2171-2176.
- [8] Topçu, I.; Bilir, T. Experimental investigation of some fresh and hardened properties of rubberized self-compacting concrete. *Materials and Design*, 2009, v.30, p.3056-3065.
- [9] Aiello, M.; Leuzzi, F. Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state. *Waste Management*, 2010, v.30, p.1696-1704.
- [10] Guneyisi, E. Fresh properties of self-compacting rubberized concrete incorporated with fly ash. *Materials and Structures*, 2010 (in press).
- [11] Guneyisi, E.; Gesoglu, M.; Ozturan, T. Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Journal of Cement and Concrete Research*, 2004, v.34, p. 2309-2317.
- [12] Valadares, F. Desempenho mecânico de betões estruturais com granulado de borracha proveniente de pneus usados. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, IST-UTL, 2009.
- [13] Freitas, C.; Galvão, J.; Portella, K.; Joukoski, A.; Filho, C. Desempenho físico-químico e mecânico de concreto de cimento Portland com borracha de estireno-butadieno reciclada de pneus. *Química Nova*, 2009, v.32, p.913-918.
- [14] Vieira, R.; Soares, R.; Pinheiro, S.; Paiva, O.; Eleutério, J.; Vasconcelos, R. Completely random experimental design with mixture and process variables for optimization of rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, 2010 (in press).
- [15] Segre, N.; Joekes, I. Use of tire rubber particles as addition to cement paste. *Cement and Concrete Research*, 2000, v.30, p.1421-1425.
- [16] Cairns, R.; Kew, H.; Kenny, M. The use of recycled rubber tyres in concrete construction. Final Report, The Onyx Environmental Trust, University of Strathclyde, Glasgow, 2004.
- [17] Chou, L.; Lin, C.; Lu, C.; Lee, C.; Lee, M. Improving rubber concrete by waste organic sulfur compounds. *Waste Management and Research*, 2010, v.28, p.29-35.
- [18] Ganjian, E.; Khorami, M.; Maghsoudi, A. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*, 2009, v.23, p.1828-1836.
- [19] Li, G.; Garrick, G.; Eggers, J.; Abadie, C.; Stubblefield, M.; Pang, S. Waste tire fiber modified concrete. *Composites: Part B*, 2004, v.35, p.305-312.
- [20] Balaha, M.; Badawy, A.; Hashish, M. Effect of using ground waste tire rubber as fine aggregate on the behaviour of concrete mixes. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 2007, v.14, p.427-435.
- [21] Zheng, L.; Huo, S.; Yuan, Y. Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, 2008, v.22, p.939-947.
- [22] Zheng, L.; Huo, X.; Yuan, Y. Strength, modulus of elasticity, and brittleness index of rubberized concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2008, v.20, p.692-699.
- [23] Sukontasukkul, P.; Chaikaew, C. Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber. *Construction and Building Material*, 2006, v.20, p.450-457.
- [24] Ling, T.; Nor, H.; Lim, S. Using recycled waste tyres in concrete paving blocks. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management*, 2010, v.163, p.37-45.
- [25] Topçu, I.; Demir, A. Durability of rubberized mortar and concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, v.19, p.173-178.
- [26] Fioriti, C.; Ino, A.; Akasaki, J. Concrete paving blocks with tyre wastes. *Revista Internacional Construlink*, 2007, N°15, v.5, p.56-67.