



## **DURABILIDADE DE BETÃO COM AGREGADOS RECICLADOS INFLUÊNCIA DO PROCESSAMENTO E FABRICO**

*Isabel M. Martins<sup>1</sup>, Carina Ulsen<sup>2</sup>, Mirko Landmann<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>Departamento de Materiais, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, imartins@lnec.pt, <sup>2</sup>Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, carina@lct.poli.usp.br,*

*<sup>3</sup>Departamento de Materiais de Construção, IAB-Institut fuer Angewandte Bauforschung Weimar GmbH, M.Landmann@IAB-Weimar.de*

### **RESUMO**

A promoção da eficiência de recursos e da reciclagem no âmbito da Iniciativa das Matérias-Primas visa impulsionar a transformação de resíduos em recursos. Neste contexto, o sector da construção desempenha um papel relevante devido à elevada quantidade de materiais que movimenta bem como à meta estabelecida a nível europeu para a reciclagem dos resíduos de construção e demolição (RCD).

A utilização da fração mineral de RCD, como agregados reciclados (AR) no fabrico de betão, tem evidenciado que a durabilidade deste é condicionada pelo teor e pela qualidade da pasta de cimento aderente à superfície dos agregados.

Do ponto de vista microestrutural, a distribuição do tamanho de poros no betão com AR reflete-se em interfaces pasta/agregado mais porosas que as observadas em betões produzidos com agregados naturais, no aparecimento de novas interfaces, por exemplo entre a pasta antiga e a nova pasta de cimento. Consequentemente, diversos estudos identificam uma degradação mais acentuada do betão com AR, nomeadamente no que respeita à resistência à penetração de cloretos e à carbonatação, devido a alterações nos mecanismos de transporte de agentes agressivos no seu interior. As considerações anteriormente apresentadas são tanto mais significativas quanto maior for a heterogeneidade dos agregados reciclados.

Esta comunicação centra-se na apresentação de diferentes opções de processamento de RCD, que asseguram uma maior homogeneidade dos materiais secundários triados, e de processos de fabrico de betão com agregados reciclados tendo em vista melhorar as características de durabilidade, concorrendo assim para o fecho do ciclo de vida dos materiais.

Palavras-chave: Degradação / Agregados reciclados / Processamento / Fabrico



## IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

### 1. INTRODUÇÃO

Na Europa, o setor da construção é o setor económico que consome mais recursos minerais (BIO Intelligence Service 2013), em particular areia e britas, ao mesmo tempo que gera cerca de 33% do total dos resíduos produzidos (EIO 2011). Numa perspetiva de eficiência de recursos e, consequentemente, do desenvolvimento de um setor da construção mais sustentável, têm sido efetuados diversos estudos relativos à reutilização, reciclagem ou outros processos de valorização dos materiais de construção no fim da sua vida útil.

No que respeita aos resíduos de construção e demolição (RCD) têm sido aplicadas diferentes tecnologias de processamento visando a produção de agregados reciclados de elevada qualidade, isto é, com características mais próximas das dos agregados naturais, que permitam fechar o ciclo de vida desses materiais. Deste modo, são expectáveis microestruturas semelhantes entre agregados naturais e agregados reciclados, o que se deve traduzir em durabilidade semelhante dos betões com eles fabricados.

Em países como Portugal onde o custo dos agregados naturais é baixo pode ser inviável, numa perspetiva económica, melhorar a qualidade dos agregados reciclados produzidos através da inclusão de novas tecnologias. Contudo, noutros países em que o custo do transporte de agregados naturais é elevado, ou em que são escassos estes agregados, a utilização de novas tecnologias de processamento de RCDs é muito relevante.

### 2. PROCESSAMENTO DE RCD

As características dos agregados reciclados são em grande parte determinadas pelo tipo de processamento utilizado (de Juan e Gutiérrez 2009), o qual, na sua forma mais convencional, inclui a remoção dos contaminantes (exº: plásticos, madeira) da fração mineral maioritária, a fragmentação em britadeira com libertação das diferentes fases e redução do tamanho das partículas e a classificação por peneiração nas diferentes granulometrias.

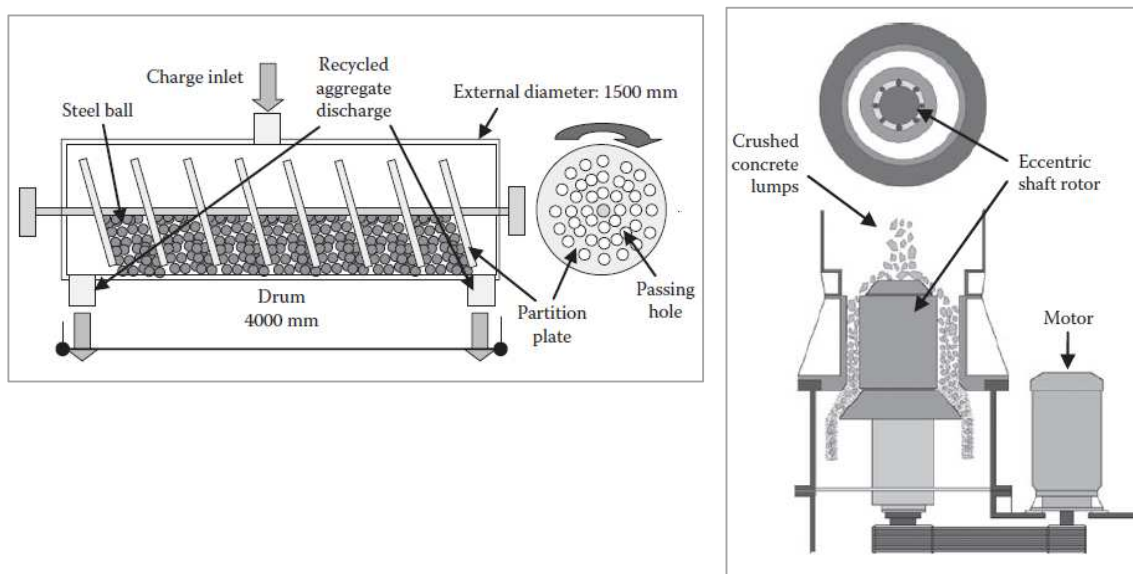
Embora com RCDs mais homogéneos seja possível obter agregados reciclados com características mais ou menos controladas estas são geralmente inferiores às dos agregados naturais quando se usa o processamento convencional. No caso específico da reciclagem de resíduos de betão, os agregados reciclados obtidos apresentam maior absorção de água e menor densidade relativamente aos agregados naturais, devido à argamassa que se encontra à superfície do agregado e à existência de interfaces argamassa antiga/agregado e argamassa antiga/argamassa nova com elevada porosidade



(Dhir *et al.* 2004). Para minimizar esta situação é necessário recorrer a outras tecnologias que conduzam à diminuição da argamassa residual ou que melhorem a sua qualidade.

A fragmentação mecânica da argamassa (Fig.1), ou a fragilização da matriz cimentícia, a temperatura próxima de 300 °C, seguida de ação mecânica, ou a imersão preliminar em soluções ácidas, são exemplos de processos que permitem reduzir a quantidade de argamassa residual dos agregados reciclados de betão (Tomosawa *et al.* 2005, Tam *et al.* 2007).

Relativamente à melhoria da qualidade da argamassa, é de referir a deposição na superfície da argamassa de materiais pozolânicos que podem preencher os vazios e os poros e reagir posteriormente com o hidróxido de cálcio (Kou e Poon 2012), ou a carbonatação do dos produtos de hidratação do cimento que conduz à diminuição da porosidade da argamassa. Estas alterações da microestrutura permitem que as interfaces argamassa/agregado fiquem mais resistentes permitindo assim melhorar a durabilidade dos betões produzidos com estes agregados.



**Fig. 1 – Fragmentação mecânica da argamassa (Sakai e Noguchi, 2012)**

Até aqui todas as tecnologias apresentadas são mais indicadas para a produção de agregados reciclados grossos de betão. No que respeita à fração fina dos RCD, que pode representar cerca de 40% da massa destes resíduos, poucos estudos têm sido desenvolvidos para melhorar as suas características, talvez porque diversas especificações



## IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

técnicas restringem o uso de agregados reciclados finos no fabrico de betão devido à elevada absorção de água e ao teor de contaminantes presentes.

Em 2011, Ulsen estudou a viabilidade da fragmentação total de RCDs para produção de agregados reciclados finos utilizando na britagem primária e na britagem secundária britadeiras de impacto e de maxilas, respetivamente, e uma britagem terciária com britadeira de impacto vertical (VSI) que origina partículas com maior esfericidade e menor porosidade (Fig. 2). Os materiais obtidos foram depois sujeitos a operações de beneficiação, nomeadamente separação com base na densidade e na suscetibilidade magnética, permitindo que os agregados reciclados ricos em quartzo fossem separados da fração rica em pasta cimentícia, dos fragmentos cerâmicos, das micas e dos minerais pesados. O facto de se obterem agregados reciclados finos de elevada qualidade permite antever um aumento das taxas de reciclagem de RCDs.

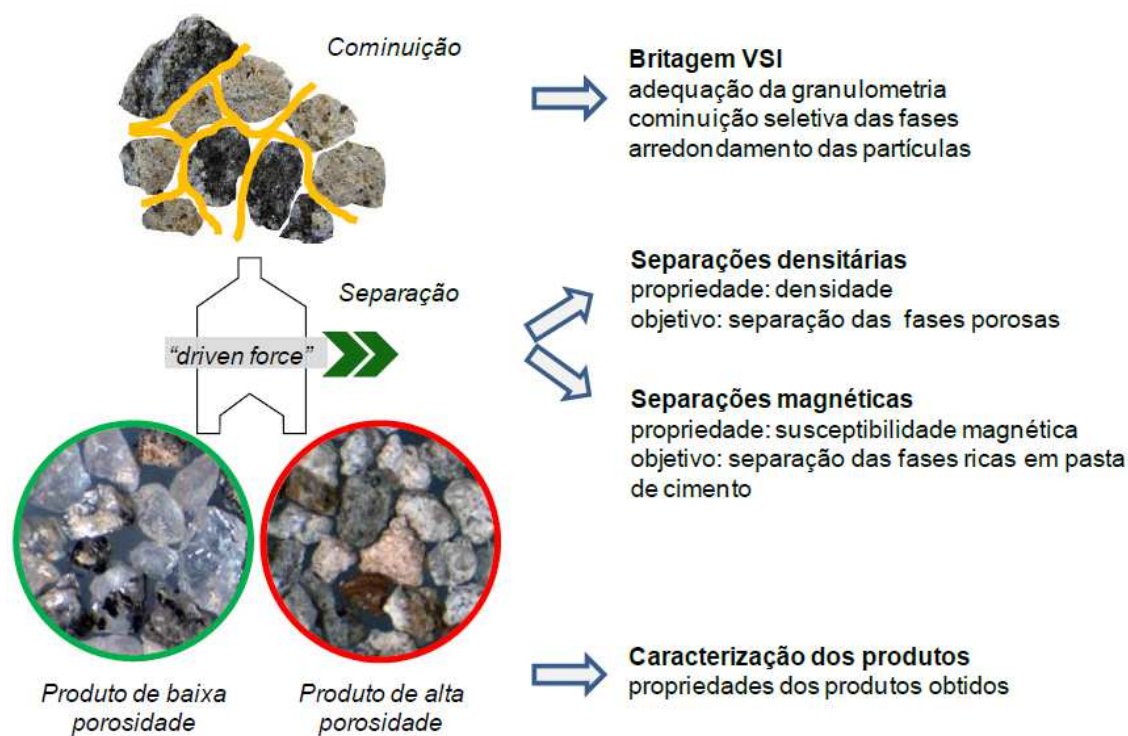


Fig. 2 – Processamento de agregados reciclados finos (Ulsen, 2011)

A fragmentação completa de resíduos de betão, visando a obtenção de agregados reciclados finos de betão, foi também estudada por outros autores (Fan *et al.* 2016): A diminuição da absorção de água destes agregados, relativamente a agregados reciclados grossos e finos de betão produzidos em simultâneo, evidenciou uma maior redução do teor



## IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

de argamassa aderente, ou seja, produção de agregados com características melhoradas. Estes resultados permitem antever que o betão processado com agregados reciclados finos de betão, obtidos por cominuição total de RCD de betão, apresentará melhor durabilidade.

A maioria dos RCD são resíduos mistos com composição bastante heterogénea pelo que as tecnologias de processamento acima referidas não permitem uma separação eficiente dos diversos materiais: a fragmentação e separação baseadas na granulometria não são adequadas. É necessário incorporar outras tecnologias que facilitem a libertação dos diferentes constituintes e, em seguida, fazer a triagem dos materiais já libertos com base na sua composição química e mineralógica.

Entre os diferentes processos de libertação com baixo consumo de energia e de rápida operação, Müller, A. (2016) propôs o uso de micro-ondas, para enfraquecer a ligação entre os materiais, complementado com fragmentação mecânica. Além do uso de micro-ondas, Menard *et al.* (2013) recomendaram também a aplicação de impulsos elétricos para fragilização da argamassa aderente em resíduos de betão.

Relativamente à triagem Landmann *et al.* (2014) consideram que a utilização de sensores de infravermelho próximo (NIR) permite elevadas taxas de separação (94 % a 99 %), tendo também como vantagens não ser necessário nenhuma preparação dos materiais a separar e permitindo uma análise rápida dos mesmos (Fig.3). A principal desvantagem é a impossibilidade de análise de materiais de cor preta.

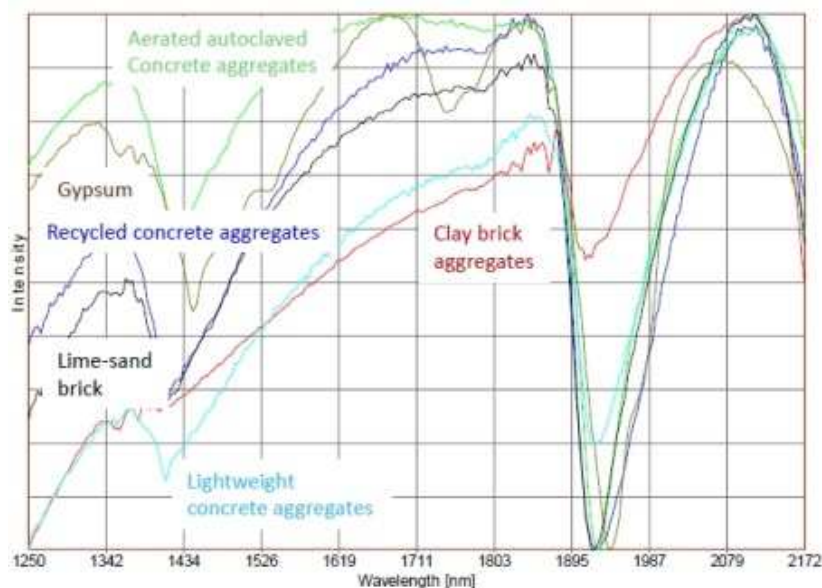


Fig. 3 – Reconhecimento dos constituintes de RCD por NIR (Landmann *et al.* 2014)



### **3. FABRICO DE BETÃO COM AGREGADOS RECICLADOS**

Tendo como objetivo a melhoria das características mecânicas e de durabilidade, o fabrico de betões com agregados reciclados tem também sido alvo de investigação. Para além dos métodos convencionais de mistura, em que se considera que o agregado reciclado substitui o agregado natural, outros métodos têm sido desenvolvidos.

Tam e Tam (2008) desenvolveram uma abordagem de mistura em duas etapas (TSMA) em que a água necessária é dividida em duas partes e adicionada em diferentes alturas: a primeira parte é adicionada aos agregados reciclados permitindo a formação de uma “pasta” na superfície do agregado, com diminuição da porosidade da argamassa aderente, e só posteriormente é adicionada a restante água para o fabrico do betão. A melhoria da interface agregado/matriz cimentícia conduz a um aumento da resistência do betão quando comparado com betão obtido pelo método convencional e consequentemente também melhora a durabilidade.

É o caso do método do volume de argamassa equivalente (EMV) que considera a existência de duas fases nos agregados reciclados de betão - o agregado natural e a argamassa aderente à sua superfície. A aplicação deste método requer a quantificação da argamassa residual dos agregados reciclados e a sua contabilização no volume total de argamassa, permitindo assim uma redução da quantidade de cimento relativamente ao usado nas misturas convencionais (Razaqpur *et al.* 2010).

Em termos de durabilidade, os betões com agregados reciclados grossos de betão obtidos pelo método EMV apresentam melhor resistência à penetração de cloretos e à carbonatação, idêntica à do betão estrutural convencional (Razaqpur *et al.* 2010, Jiménez *et al.* 2014).

### **4. DURABILIDADE DE BETÃO COM AGREGADOS RECICLADOS**

A deterioração do betão resulta muitas vezes da ação simultânea de diversos processos, físicos e químicos entre outros. Dada a relevância para a despassivação das armaduras em betão estrutural, só foram analisadas a resistência à penetração de cloretos e a resistência à carbonatação de betões produzidos com agregados reciclados.

#### **4.1. Resistência à penetração de cloretos**

Em betões com incorporação de agregados reciclados grossos de betão tem-se verificado, à semelhança do que ocorre em betões convencionais, um aumento da profundidade de



## IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

penetração de cloretos com o aumento da razão água/cimento (Gonçalves *et al.* 2004). Em ambiente marítimo, Villagrán-Zaccardi *et al.* (2008) verificaram que a taxa de penetração de cloretos aumenta na presença de agregados reciclados grossos de betão mas que em simultâneo a capacidade de fixação de cloretos também aumenta: o que se reflete numa concentração de cloretos solúveis em água similar ao longo do tempo para betões convencionais e para betões reciclados.

### 4.2. Resistência à carbonatação

No que respeita à resistência à carbonatação de betões com agregados reciclados os estudos realizados nem sempre são consensuais. Diversos casos indicam que a resistência à carbonatação diminui quando se utilizam agregados reciclados grossos. Levy (2001) verificou que a resistência à carbonatação não é afetada quando os agregados naturais grossos são substituídos por agregados reciclados de betão ou de alvenaria, em percentagens inferiores a 20%. Segundo Gomes e Brito (2009) a resistência à carbonatação de betões com agregados reciclados grossos de betão, com percentagens de substituição até 50%, é próxima da dos betões tradicionais. De acordo com Werle *et al.* (2011), a resistência à carbonatação de betão contendo agregados reciclados de betão depende da relação das resistências mecânicas do betão reciclado e do novo betão: se for igual ou superior a resistência à carbonatação é idêntica, mas se for inferior a velocidade de carbonatação aumenta.

## 5. CONCLUSÕES

Atualmente as tecnologias de processamento mais utilizadas não permitem uma separação adequada dos materiais presentes nos resíduos de construção e demolição. Este facto reflete-se na qualidade dos agregados reciclados produzidos colocando em questão a durabilidade dos betões com eles fabricados.

A investigação desenvolvida ou em fase de desenvolvimento, quer nas tecnologias de processamento dos RCD, quer ao nível do fabrico de betões com agregados reciclados, evidencia que é possível uma separação mais eficiente dos materiais sendo expectável uma melhor aceitação da incorporação de agregados reciclados em betão associada também à melhoria da durabilidade.

## 6. REFERÊNCIAS

BIO Intelligence Service, 2013. Sectoral resource maps. Prepared in response to an Information Hub request, European Commission, DG Environment.



## IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

- de Juan, M.S., Gutiérrez, P.A., 2009. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, 23 (2), p. 872-877.
- Dhir, R. K., Paine, K. A., Dyer, T. D., 2004. Recycling construction and demolition wastes in concrete, *Concrete*, 38(3), p. 25–28.
- EIO, Eco-Innovation Observatory, 2011. Resource efficient construction: The role of eco-innovation for the construction sector in Europe. Thematic Report.
- Fan, C.-C., Huang, R., Hwang, H., Chao, S.-J., 2016. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. *Construction and Building Materials*, 112, p.708-715.
- Gomes, M.; de Brito, J., 2009 Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance, *Materials and Structures*, 42 (5), p. 663-675.
- Gonçalves, A., Esteves, A., Vieira, M., 2004. Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability, *Proceedings of International Conference. on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*, RILEM, p. 554–562.
- Jiménez, C.; Barra, M.; Valls, S.; Aponte, D.; Vázquez, E., 2014. Durability of recycled aggregate concrete designed with the Equivalent Mortar Volume (EMV) method: Validation under the Spanish context and its adaptation to Bolomey methodology, *Materiales de Construcción*, 64 (313).
- John, V., 2000. Reciclagem de resíduos na construção civil – Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento, 102 p, Tese (Livre Docência), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Kou, S.C., Poon, C.S., 2012. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate, *Construction and Building Materials*, 35, p. 69-76.
- Landmann, M., Muller, A., Karrasch, A., Linß, E., Ulsen, C., 2014. Chemical-mineralogical sorting of mineral construction and demolition wastes for a better recovery, *Proceedings of First International Conference on Minerals on the Circular Economy*, Espoo, Finland.
- Levy, S. M., 2001. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria, 182 p. 2001, Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Menard, Y., Bru, K., Touze, S., Lemoign, A., Poirier, J.E., Ruffie, G., Bonnaudin, F., Von Der Weid, F., 2013. Innovative process routes for a high-quality concrete recycling, *Waste Management*, 33, p. 1561-1565.
- Müller, A., 2016. Recyclingstrategien – ein Ausblick. Fachvortrag IAB-Baustoff-Forum 2016, IAB Weimar gGmbH, Weimar.
- Razaqpur, A.G.; Fathifazl, G.; Isgor, B.; Abbas, A.; Fournier, B.; Foo, S., 2010. How to produce high quality concrete mixes with recycled concrete aggregate, *Construction Waste Recycling and Civil Engineering Sustainable Development. Proceedings of the ICWEM 2010*, p. 11-35.
- Sakai, K., Noguchi, T., 2012. The sustainable use of concrete, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York. ISBN 978-0-203-81717-9
- Tam, V. W., Tam, C.M., Le, K.N., 2007. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches, *Resources. Conservation and. Recycling*, 50 (1), p. 82–101.
- Tam, V. W., Tam, C.M., 2008. Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA and TSMA<sub>sc</sub>, *Construction and Building Materials*, 22, p. 2068–2077.
- Tomosawa, F., Noguchi, T., Tamura, M., 2005. The way concrete recycling should be, *Journal of Advanced technology*, 3 (1), p. 3-16.
- Ulsen, C., 2011. Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição, 202 p., Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Werle, A.P., Kazmierczak, C.S., Kulakowski, M.P., 2011. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto, *Ambiente Construído*, 11(2), p. 213-228.