



Vida Associativa: Seminário “Novos Desafios e Perspectivas na Utilização do Betão” 04

Técnica: Cor, Textura e Forma: As Múltiplas Perspectivas do Betão 10

Obra: Betão Colorido na Requalificação do Teatro Thalia 16

Ambiente e Segurança: Betão Eco-eficiente: o Futuro da Indústria do Betão Pronto 22

Técnica: A Utilização do Betão como Sistema de Segurança na Protecção Rodoviária 46

Betão Eco-eficiente: O Futuro da Indústria do Betão Pronto

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

Sumário

O futuro da indústria de betão pronto passa inevitavelmente por um esforço continuado na redução dos impactos ambientais do betão. O presente artigo apresenta nesse contexto alguns contributos para a eco-eficiência do referido material. Descrevem-se resumidamente os principais impactos ambientais associados à sua produção. Analisa-se o contributo decisivo proporcionado pela substituição parcial de cimento por adições pozolânicas e a importância da substituição de agregados naturais por agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD) e como estes podem também constituir uma importante fonte de sequestro de dióxido de carbono. Por fim aborda-se a contribuição da nanotecnologia para o aumento da resistência e da durabilidade do betão e ainda no sentido de dotar este material de capacidade de autolimpeza.

1. Introdução

Com uma produção de quase 10.000 milhões de toneladas anuais, o betão continuará a ser a curto e a médio prazo o material mais consumido no Planeta Terra. A sua versatilidade e o seu baixo custo fazem dele um material imprescindível face às elevadas taxas de urbanização do nosso Planeta. A título de exemplo, nos próximos 20 anos a China urbanizará uma área equivalente à da Suíça, enquanto que por sua vez a Índia urbanizará uma área equivalente à do Koweit.

O conceito de eco-eficiência foi apresentado pela primeira vez em 1991 pelo World Business Council for Sustainable Development-WBCSD (2000) e compreende o "desenvolvimento de produtos e serviços, com preços competitivos que satisfazem as necessidades da espécie humana com qualidade de vida, enquanto progressivamente reduzem o seu impacto ecológico e o consumo de matérias-primas ao longo do seu ciclo de vida, até um nível compatível com a capacidade do Planeta". Dito de outra forma, este conceito implica a produção de mais produtos, com menos recursos e menos resíduos. Relativamente às emissões de CO₂ do betão [1], a produção de cimento Portland representa 74-81%, a produção dos agregados contribui

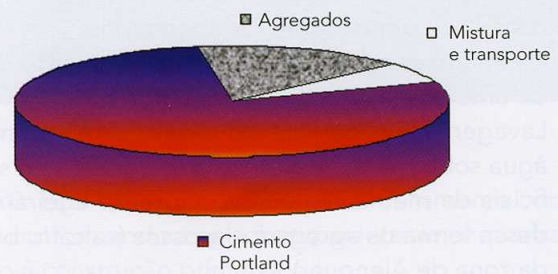


Figura 1. Desagregação das emissões de CO₂ do betão.

com 13 a 20%, restando um valor quase residual para a mistura, transporte e betonagem do betão (Figura 1).

As emissões de CO₂ associadas à produção de clínquer de cimento Portland subdividem-se basicamente em duas parcelas, a do carbono de origem química proveniente da calcinação do calcário (0.55 ton.) e a parcela relacionada com a queima de combustíveis para gerar a energia necessária a todo o processo industrial (0.39 ton.), num total de 0.94 ton. de CO₂ [2]. Outros autores referem um valor médio de 0.87 ton. [3]. Josa et al. [4] analisaram as emissões de diversas cimenteiras europeias tendo observado um valor de 0.8 ton. de CO₂ na produção de cada tonelada de cimento Portland do Tipo I. Esta diferença de valores insere-se no intervalo de variação de 20% observado por Chen et al. [5] em diferentes cimenteiras. Recentemente alguns autores [6] propuseram dois índices (bi e ci) para avaliar a eco-eficiência do cimento Portland. A intensidade do ligante (bi) que mede a quantidade de cimento mínima necessária para atingir 1MPa de resistência à compressão aos 28 dias de cura e a intensidade de CO₂ que mede a quantidade mínima de carbono necessária para atingir 1MPa. Para estes autores as melhores práticas de bi e ci rondam respectivamente 5 kg/m³/MPa e 1,5 kg/m³/MPa. Nos impactos ambientais do betão pronto é ainda necessário considerar o elevado consumo de água para lavagem das betoneiras. Esta água apresenta um elevado conteúdo de sólidos e uma elevada alcalinidade constituindo um impacto ambiental relevante que importa solucionar. Algumas investigações apontam no sentido da mesma poder ser utilizada na produção de

betão provocando reduções na resistência à compressão de apenas 4% [7]. O presente artigo apresenta assim alguns contributos para a eco-eficiência do betão, os quais incluem as adições pozolânicas, os agregados reciclados e a nanotecnologia. Tenha-se no entanto presente que este é um tema inovador, vasto e de alguma complexidade e que tal pode perceber-se pelo facto dos autores serem actualmente responsáveis pela edição de um livro sobre este tema intitulado "Eco-efficient concrete", que conta com a colaboração de autores de mais de dez países, a publicar pela Woodhead Publishing com a estrutura que abaixo se apresenta:

- C.1 – Introduction
- C.2 – Environmental impact of Portland cement production
- C.3 – LCA aspects of concrete
- C.4 – Natural pozzolans
- C.5 – Artificial pozzolans
- C.6 – Tests to evaluate the pozzolanic activity
- C.7 – Properties of concrete with high volume pozzolans
- C.8 – Influence of pozzolans on concrete durability
- C.9 – Performance of SCC with high volume pozzolans
- C.10 – Recycled glass concrete
- C.11 – Municipal solid waste incinerator concrete
- C.12 – Ground granulated blast furnace slag concrete
- C.13 – Concrete with polymeric wastes
- C.14 – Concrete with construction & demolition wastes
- C.15 – Concrete with polymers
- C.16 – Alkali-activated based concrete
- C.17 – Sulfoaluminate cement
- C.18 – Magnesia cement
- C.19 – Nanotechnology for "green" concrete

2. Substituição parcial de cimento Portland por adições pozolânicas

Como o cimento Portland é responsável pela parte mais expressiva dos impactos ambientais do betão, a substituição parcial do cimento por adições pozolânicas constitui um contributo decisivo para a eco-eficiência do betão. Várias normas definem as pozolanas como materiais constituídos por sílica e alumina, que por si só não possuem qualquer capacidade ligante, mas que após terem um certo grau de finura e na presença de água reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com capacidade ligante. As pozolanas podem ser naturais, artificiais ou obtidas a partir de subprodutos industriais. As pozolanas naturais são provenientes de magmas geralmente ricos em sílica que solidificaram rapidamente e ficaram no estado amorfo ou cripto-cristalino, enquanto que as pozolanas artificiais (argilas de qualquer tipo depois de sujeitas a temperaturas suficientes para a sua desidroxilação, mas inferiores ao início de recristalização) são obtidas pela criação de uma instabilidade interna à custa da saída de iões

OH: da rede cristalina dos minerais argilosos. Apresentam-se em seguida vários materiais com características pozolânicas, alguns já utilizados correntemente e outros ainda em fase de investigação e com potencial para o virem a ser:

Cinzas Volantes-CV

Alguns aditivos pozolânicos como as cinzas volantes (um subproduto gerado a partir do carvão nas centrais termoeléctricas), são caracterizadas por terem uma hidratação lenta e logo estão associadas a betões com baixas resistências em idades iniciais. As CV são provavelmente o aditivo pozolânico mais utilizado actualmente, e muito embora seja prática corrente a utilização de níveis de substituição inferiores a 40%, alguns autores comprovaram que a utilização de percentagens acima de 50% é uma opção tecnicamente viável [8]. Em Portugal a quantidade de cinzas volantes geradas anualmente representa menos de 4% da produção de cimento, tornando-se assim necessário procurar adições pozolânicas alternativas.

Sílica de Fumo-SF

A sílica de fumo é um subproduto da produção do silício e das ligas de ferro-silício em fornos eléctricos, apresentando elevada reactividade pozolânica. Este aditivo contribui para a densificação da microestrutura do betão tornando este material mais resistente e mais durável [9]. Apesar disso, em alguns países a sua utilização não tem interesse comercial, por ser muito mais caro que o próprio cimento Portland, além de que a sua produção a nível mundial não excede um milhão de toneladas anuais [10].

Cinzas de Casca de Arroz – CCA

As cinzas de casca de arroz são resíduos de elevada reactividade pozolânica, obtidas pela calcinação das cascas de arroz a uma temperatura inferior à temperatura de cristalização a 780 °C [11]. Como cada tonelada de arroz gera 40 kg de cinzas [12] isso significa que as 600 milhões de toneladas de arroz produzidas anualmente a nível mundial podem gerar aproximadamente 20 milhões de toneladas de CCA.

Cinzas de Lamas de Estações de Tratamento de Água

As cinzas provenientes da calcinação de lamas de estações de tratamento de água são um material silicioso cuja reactividade pozolânica está dependente da composição química das lamas e da temperatura de calcinação [13]. A produção destas lamas encontra-se em franco crescimento a nível mundial, e a sua quantidade é estimada entre 35 a 85 gramas por dia e por habitante [14]. Uma das soluções para o tratamento destas lamas, passa pela sua incineração, a qual destrói os componentes orgânicos, minimiza maus cheiros

e reduz o seu volume. Com o aumento da população mundial e da quantidade cada vez maior de estações de tratamento de água, é assim expectável que a produção destas cinzas cresça de forma significativa.

Resíduos da Indústria Cerâmica e Lamas de Minas de Tungsténio

Vários autores [15,16] confirmaram já a reactividade dos resíduos da indústria cerâmica e recentemente Torgal et al. [17] mostraram que os betões com 20% destes resíduos em substituição de cimento Portland, embora apresentem uma ligeira redução da sua resistência mecânica apresentam por outro lado uma durabilidade acrescida. Na Europa os resíduos gerados nas diversas fases de produção da indústria cerâmica ascendem a um valor entre 3 a 7% da produção total, significando vários milhões de toneladas de argilas calcinadas que podem ser utilizadas na substituição de cimento Portland. Relativamente às lamas de minas de tungsténio, investigações recentes mostraram que a composição química das mesmas é constituída fundamentalmente por aluminossilicatos, os quais possuem um total de $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) > 70\%$ e ainda que as mesmas apresentam características pozolânicas após tratamento térmico [18].

Vidro Reciclado – RC

O vidro reciclado moído com partículas de dimensão inferior a 38 μm apresenta características pozolânicas e os betões com vidros moídos em substituição parcial de cimento apresentam uma elevada resistência, tanto a curto como no longo prazo, quando comparados com a resistência de betões nos quais a pozolana utilizada são as cinzas volantes [19]. Alguns autores [20] referem que o vidro moído pode ser utilizado para substituir até 30% do cimento Portland.

Resíduos de Catalizadores utilizados pela Indústria Petroquímica

A indústria petroquímica utiliza catalizadores que necessitam de substituição sempre que a capacidade de catálise se encontra esgotada. Alguns autores [21] mostraram que este resíduo da indústria petroquímica é composto por um zeólito com mais de 50% de SiO_2 e aprox. 40% de Al_2O_3 . Algumas investigações mostram que os betões contendo este resíduo não apresentam reduções de resistência e apresentam durabilidade melhorada, relativamente ao betão de referência [22].

3. Utilização de agregados reciclados provenientes de RCD

A utilização de agregados naturais no betão possui impactos ambientais em termos da extracção de recursos não renováveis e dos consumos de energia

necessários para o efeito, mas também os relativos à destruição da biodiversidade existente nos locais de extracção de agregados. Como além disso a incidência do custo de transporte no custo dos agregados naturais implica que cada tonelada duplique de valor para cada 50 km, tal leva a que as pedreiras de extracção de agregados se encontrem distribuídas “quase como cogumelos” por todo o território nacional com todos os prejuízos ambientais que daí decorrem. Consequentemente, a substituição de agregados naturais por agregados reciclados provenientes de RCD constitui mais um contributo para a eco-eficiência do betão. Segundo a Agência Portuguesa do Ambiente, os RCD produzidos na Europa variam entre 100 a 290 milhões ton./ano. Já para o território nacional é apontado um valor à volta de 7,5 milhões ton./ano. Muito embora a utilização de agregados reciclados na execução de betões seja uma técnica conhecida e praticada há quase 50 anos [23] a sua regulamentação só muito recentemente chegou a Portugal. Alguns autores [24] procederam a uma análise da regulamentação técnica sobre a utilização de agregados reciclados em betão, comparando a situação de Portugal com a da Alemanha, Hong-Kong, Reino Unido, Holanda e Suíça. Os mesmos puderam comprovar a existência de diferentes graus de exigência para os betões com agregados reciclados, tendo no entanto em comum uma visão conservadora sobre este material. Actualmente o instrumento legislativo mais relevante no domínio dos RCD, diz respeito ao Decreto-Lei N.º46/2008 de 12 de Março. Como se refere no Artigo n.º1 do mesmo, este “estabelece o regime das operações de gestão de resíduos resultantes de obras ou demolições de edifícios ou de derrocadas, abreviadamente designados resíduos de construção e demolição ou RCD, compreendendo a sua prevenção e reutilização e as suas operações de recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação”. Em 19 de Novembro de 2008 foi aprovada a Directiva N.º 2008/98/CE, que irá produzir alterações no Decreto-Lei N.º178/2006 de 5 de Setembro (que regula a gestão de resíduos em Portugal) e cuja transposição para a ordem jurídica interna está a cargo da APA. Esta Directiva estabelece para os RCD, valores de reciclagem os quais deverão ser no mínimo de 70% em massa até ao ano 2020 [25]. A utilização de agregados reciclados, provenientes de resíduos de construção e demolição, encontra-se regulamentada em Portugal através da especificação LNEC E 471 de Setembro de 2006, a qual transpõe para a regulamentação técnica portuguesa a norma EN 12260:2002, que foi objecto de uma revisão em Junho de 2006. De acordo com a especificação LNEC E 471 (2006), os agregados reciclados provenientes dos RCD são agrupados em 3 classes de acordo com a Tabela 1. Relativamente aos agregados reciclados ARC estes só podem ser utiliza-

dos em betões de enchimento ou regularização sem qualquer função estrutural e em ambientes não agressivos. Já os agregados reciclados das classes ARB1 e ARB2 podem ser utilizados em elementos de betão simples e betão armado, sendo que para esta última utilização a percentagem máxima de incorporação é respectivamente de 25 e 20%, para cada uma das referidas classes (Tabela 2). A referida especificação salienta que os agregados reciclados devem ser avaliados quanto à sua reactividade relativamente à reacção álcalis-silica (RAS) de acordo com a especificação LNEC E 467:2006. Também que os resíduos destinados à produção de agregados reciclados, terão que ser sujeitos a ensaios de lixiviação, podendo somente ser utilizados para esse fim se os mesmos forem classificados como resíduos inertes.

Embora a especificação LNEC E 471 (2006) defina limites ao volume da utilização de agregados reciclados, permite contudo a utilização de quantidades superiores, desde que sejam realizados estudos específicos, que avaliem a influência destes agregados nas propriedades relevantes para a aplicação considerada. Desde a entrada em vigor da referida especificação, que representava o estado-da-arte dos agregados reciclados naquela data bastantes investigações tem sido levadas a cabo nesta área. As mesmas são bastante promissoras e apontam para a possibilidade da substituição total dos agregados por agregados reciclados provenientes de RCD, no fabrico de betões com elevada resistência mecânica e durabilidade [26,27].

Tabela 1. Classes dos agregados reciclados

| Classe | Proporção dos constituintes (EN 12620:2002/prA1) | | | | | |
|--------------------|--|---------------|-----------|-----------|--------------------------|-------------|
| | R_C (%) | R_C+R_U (%) | R_B (%) | R_A (%) | $FL_S+FL_{NS}^{(2)}$ (%) | $X+R_G$ (%) |
| ARB1 | ≥90 | | ≤10 | ≤5 | ≤1 | ≤0,2 |
| ARB2 | ≥70 | | ≤30 | ≤5 | ≤1 | ≤0,5 |
| ARC ⁽¹⁾ | | ≥90 | | ≤10 | ≤1 | ≤1 |

em que:

RC – betão, produtos de betão e argamassas; RU – agregados não ligados, pedra natural e agregados tratados com ligantes hidráulicos; RA – materiais betuminosos; RB – elementos de alvenaria (tijolos, ladrilhos, telhas, etc); RG – vidro; FLS – material pétreo flutuante; FLNS – material pétreo não flutuante; X – matérias indesejáveis

Nota: ⁽¹⁾Material com massa volúmica inferior a 1000kg/m³. No caso das partículas leves serem constituintes minerais não prejudiciais para o betão, nem para o acabamento superficial, aceita-se a categoria FL.

Tabela 2. Classes de resistência e classes de exposição ambiental permitidas

| Classe de agregado reciclado | Classe de resistência | Percentagem de incorporação | Classe de exposição ambiental ⁽¹⁾ |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------------|---|
| ARB1 | C 40/50 | 25% | X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XS1, XA1 ⁽²⁾ |
| ARB2 | C 35/45 | 20% | |

Notas: ⁽¹⁾ Conforme definido na norma NP EN 206-1.

⁽²⁾ Em fundações.

3.1. Sequestro de carbono em agregados reciclados de betão

A utilização de agregados reciclados de betão em substituição de agregados naturais, apresenta uma outra vantagem que não tem sido devidamente contabilizada e que está relacionada com a capacidade destes para absorverem dióxido de carbono. O hidróxido de cálcio do betão reage com o dióxido de carbono formando calcite, este processo que é controlado pela difusão do CO₂ leva à redução do pH do betão e aumenta a probabilidade de corrosão das armaduras. Nas estruturas correntes, com baixa razão A/C, são necessários muitos anos para que a carbonatação consiga atingir uma elevada profundidade, e alguns autores [28] citam estudos segundos os quais são necessários quase 100 anos para que a profundidade de carbonatação atinja 15 mm num betão com uma razão A/C=0.45, pelo que a parcela de CO₂ reabsorvida nas estruturas existentes, embora com alguma expressão, não é muito elevada. Já quando a mesma estrutura de betão é demolida, a superfície dos agregados que pode sofrer carbonatação é muito superior à superfície da estrutura, pelo que a quantidade de CO₂ reabsorvido aumenta significativamente podendo até duplicar [29]. Na avaliação das emissões de carbono associadas à produção de betão, a redução que se obtém por via do efeito da carbonatação raramente é considerada; estudos recentes sobre as emissões de uma ponte feita em betão, referem que a omissão dessa parcela pode significar uma sobreestimação das emissões de CO₂ do betão entre 13 a 48% [30].

4. Contributos da nanotecnologia para a eco-eficiência do betão

O estudo à nanoescala das diversas fases que compõem o betão (silicatos de cálcio hidratados-CSH e hidróxido de cálcio-Ca(OH)₂), como forma de aumentar a sua durabilidade, constitui um passo importante para a eco-eficiência deste material. Enquanto as técnicas de microscopia electrónica permitiam visualizar e conhecer a composição dos produtos de hidratação do cimento, a utilização da nanotecnologia veio permitir que esse conhecimento possa também abarcar o

conhecimento da rigidez/módulo de elasticidade das fases CSH e Ca(OH)_2 , através de técnicas de nanoindentação, abrindo assim novas possibilidades no controlo das propriedades destas fases. Na nanoindentação um material de propriedades conhecidas é utilizado para provocar uma deformação noutra material, de propriedades desconhecidas e através das características dessa deformação se poder estimar as propriedades do material desconhecido. Com recurso a esta técnica foi possível confirmar a existência de diferentes tipos de CSH, de baixa densidade, elevada densidade e densidade ultra-elevada [31,32]. Mais recentemente foram apresentados resultados relativos à modelação molecular dos produtos de hidratação do cimento Portland, fruto aliás de investigações financiadas pela Cimpor [33].

4.1. Utilização de nanopartículas para aumentar a resistência e a durabilidade do betão

As nanopartículas apresentam uma elevada razão da superfície específica por volume e devido à sua elevada reactividade comportam-se como centros de nucleação, contribuindo para o desenvolvimento da hidratação do cimento Portland. A maioria das investigações nesta área recorre ao uso de nanosílica, embora algumas investigações já tenham utilizado nano- Fe_2O_3 . Investigações já realizadas mostram que a utilização de nanosílica aumenta a resistência à compressão de pastas de cimento, devido ao crescimento de compostos de sílica que levam a uma densificação da estrutura [34]. Alguns autores referem que a nanosílica permite obter aumentos de resistências entre 15% a 20% pela adição de nanopartículas de SiO_2 , mencionando valores entre 93 MPa a 115 MPa ao fim de 28 dias de cura [35]. Outros autores referem aumentos no desempenho mecânico entre 20% a 40% [36]. Chaipanich et al. [37] utilizaram nanotubos (0,5% e 1% por massa do ligante) em pastas e argamassas contendo 20% de cinzas volantes revelando que a utilização de 1% de nanotubos, permitiu alcançar uma resistência de 51,8MPa aos 28 dias (equivalente à utilização de 100% de cimento), significando isso que os nanotubos permitiram compensar a diminuição de resistência associada à substituição de cimento por cinzas volantes.

4.2. Betões com características fotocatalíticas

A aplicação mais conhecida de nanomateriais no sector da construção diz respeito ao aproveitamento das propriedades fotocatalíticas de semicondutores. As capacidades fotocatalíticas levam a que durante o processo de absorção dos raios ultravioletas da luz solar (320-400nm), conjuntamente com a presença de moléculas de água, haja formação de substâncias que possuem um forte poder oxidante (radicais hidróxilos (OH) e iões superóxidos (O_2^-); estas por sua vez vão



Figura 2. Igreja "Dives in Misericórdia", Roma.

reagir com a sujidade ou outros compostos orgânicos e inorgânicos, provocando a sua dissociação e assim contribuindo para a sua desintegração. A este efeito oxidante junta-se o facto dos semicondutores quando sujeitos à radiação ultravioleta reduzirem o ângulo de atrito interno da água, tornando a superfície do material hidrofílica, o que contribui para o aumento do efeito autolimpante. A utilização de um betão com capacidades de autolimpeza teve lugar pela primeira vez na Igreja "Dives in Misericórdia" (Figura 2).

Este edifício foi projectado pelo Arq.º Richard Meyer e inaugurado em Roma no ano de 2003, sendo composto por várias "velas", constituídas por sua vez, por 346 blocos em betão à vista, feito com cimento branco contendo nanopartículas de TiO_2 (ligante 380 kg/m^3 e $A/L=0,38$) pré-fabricados e pós-tensionados [38]. Observações levadas a cabo 6 anos após a sua construção revelam apenas ligeiras diferenças entre a cor branca dos betões a nível interior e exterior [39] o que comprova a capacidade de autolimpeza destes betões.

5. Conclusões

O futuro da indústria do betão pronto aliará uma preocupação crescente com as questões ambientais, que passa pela minimização do consumo de cimento e de agregados naturais, sem que essa opção ponha em risco a resistência ou durabilidade daquele material. Antes pelo contrário, é expectável que esta indústria alargue a sua oferta a betões possuidores de uma maior tecnologia como é o caso dos betões com nanopartículas.

REFERÊNCIAS

- [1] Flower, D.; Sanjayan, J. (2007) Green house gas emissions due to concrete manufacture. *International Journal of Life Cycle Assessment* 12, 282-288.
- [2] Gartner, E. (2004) Industrially interesting approaches to low-CO₂ cements. *Cement and Concrete Research* 34: 1489-1498.
- [3] Damtoft, J.; Lukasik, J.; Herfort, D.; Sorrentino, D.; Gartner, E. (2008) Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research* 38: 115-127.
- [4] A. Josa, A. Aguado, A. Cardim and E. Byars, (2007) Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU, *Cement and Concrete Research* 37 (2007), pp. 781-788.
- [5] Chen, C.; Habert, G.; Bouzidi, Y.; Julien, A. (2010) Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. *Journal of Cleaner Production* 18, 478-485.
- [6] Damineli, B.; Kemeid, F.; Aguiar, P.; John, V. (2010) Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement & Concrete Composites* 32, 555-562.
- [7] Sandrolini, F.; Franzoni, E. (2001) Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants. *Cement and Concrete Research* 31, 485-489.
- [8] Mccarthy, M.; Dhir, R. (2004) Development of a high volume fly ash cements for use in concrete construction. *Fuel*, Vol.84, p.1423-1432, 2004.
- [9] Müller, I. (2004) Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinfor cement bars, *Cem Concr Comp* Vol.26, p. 31-39, 2004.
- [10] Khatib, J. (2009) Sustainability of construction materials. WoodHead Publishing in Materials, ISBN 978-1-84569-349-7, 2009.
- [11] Yu, Q.; Sawayama, K.; Sugita, S.; Shoya, M.; Isojima, Y. (1999) Reaction between rice husk ash and Ca(OH)₂ solution and the nature of its product. *Cement and Concrete Research* Vol.29, p. 37-43.
- [12] Zerbinio, R.; Giaccio, G.; Isaia, G. (2011) Concrete incorporating rice-husk ash without processing. *Construction and Building Materials* Vol.25, p.371-378, 2011.
- [13] Pan, S.-C.; Tseng, D.-H.; Lee, C. (2002) Use of sewage sludge ash as fine aggregate and pozzolan in portland cement mortar. *Journal of Solid Waste Technology and Management* Vol.28, p. 121-130, 2002.
- [14] Foladori, P.; Gianni, A.; Ziglio, G. (2010) Sludge Reduction Technologies in Wastewater Treatment Plants. IWA Publishing, ISBN: 9781843392781.
- [15] Naceri, A.; Hamina, M. (2009) Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. *Waste Management* 29, p.2378-2384.
- [16] Lavat, A.; Trezza, M.; Poggi, M. (2009) Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. *Waste Management* 29, p.1666-1674.
- [17] Torgal, F. Pacheco; Jalali, Said (2010) Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials* Vol.24, p.832-838.
- [18] Produção de aditivos pozolânicos a partir de lamas de minas de tungstênio para substituição de cimento Portland em argamassas e betões (Pedido de patente n° 104979J, 2010).
- [19] Shao, Y.; Lefort, T.; Moras, S.; Rodriguez, D. (2000) Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research* Vol.30, p. 91-100.
- [20] Sahayan, A.; Xu, A. (2004) Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research* Vol.34, p. 81-89.
- [21] Pacewska, B.; Bukowska, M.; Wilińska, I.; Swat, M. (2002) Modification of the properties of concrete by a new pozzolan - A waste catalyst from the catalytic process in a fluidized bed. *Cement and Concrete Research* Vol.32, p. 145-152, 2002.
- [22] Payá, J.; Borrachero, M.; Monzó, J.; Soriano, L. (2009) Studies on the behaviour of different spent fluidized-bed catalytic cracking catalysts on Portland cement. *Materiales de Construcción* Vol.59, p. 37-52, 2009.
- [23] Malhotra, V. (1978) Recycled concrete - a new aggregate. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.5, pp. 42-52.
- [24] Gonçalves, P.; Brito, J. (2008) Utilização de agregados reciclados em betão. Análise comentada da regulamentação existente. *Revista Engenharia Civil, Universidade do Minho*, N° 32, pp.73-86.
- [25] Torgal, F. Pacheco; Jalali, Said (2010) A sustentabilidade dos materiais de construção. ISBN 978-972-8600-22-8, Edição TecMinho, 400 pág., Guimarães, Portugal.
- [26] Corinaldesi, V.; Moriconi, G. (2009) Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, Vol.23, pp.2869-2876.
- [27] Grdic, Z.; Toplicic-Curcic, G.; Despotovic, I.; Ristic, N. (2010) Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate, Vol.24, 1129-1133.
- [28] Torgal, F. Pacheco (2002) Influência das propriedades físicas de agregados graníticos e cálcarios na durabilidade do betão. *Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra*, 171pp.
- [29] Pade, C.; Guimaraes, M. (2007) The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective. *Cement and Concrete Research* 37, 1348-1356.
- [30] Collins, F. (2010) Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: Influence on their carbon footprint. *International Journal of Life Cycle Assessment* 15, pp. 549-556.
- [31] Mondal, P. (2008) Nanomechanical properties of cementitious materials. PhD Thesis in Civil and Environment Engineering. Northwestern University, Illinois, USA.
- [32] Constantinides, G.; Ulm, F. (2007) The nanogranular nature of C-S-H. *Journal of Mech Phys Solid*, Vol.55, pp.64-90.
- [33] Pellenq, R.; Kushima, A.; Shahsavari, R.; Vliet, K.; Buehler, M.; Yip, S.; Ulm, F. (2009) A realistic molecular model of cement hydrates. Ed. Bazant, Z.; Northwestern University, PNAS.
- [34] Porro, A.; Dolado, J.; Campillo, I.; Erkizia, E.; De Miguel, Y.; De Ybarra, Y.; Ayuela, A. (2005) Effects of nanosilica additions on cement pastes. *Proceedings of the International Conference on Applications of Nanotechnology in Concrete Design* p.87-96.
- [35] Sobolev, K.; Flores, I.; Hermosillo, R.; Torres-Martinez, L. (2008) Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites. *American Concrete Institute, ACI Special Publication* Vol.254: 93-120.
- [36] Vera-Agullo, J.; Chozas-Ligero, V.; Portillo-Rico, D.; Garcia-Casas, M.; Gutierrez-Martinez, A.; Mieres-Royo, J.; Gravalos-Moreno, J. (2009) Mortar and concrete reinforced with nanomaterials. *Nanotechnology in Construction* 3, ISBN 978-3-642-00979-2, Springer Berlin Heidelberg, Germany.
- [37] Chaipanich, A.; Nochaya, T.; Wongkeo, W.; Torkittikul, P. (2010) Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes-fly ash cement composites. *Materials Science and Engineering A527: 1063-1076*.
- [38] Cassar, L.; Pepe, C.; Tognon, G.; Guerrini, G.; Amadelli, R. (2003) White cement for architectural concrete, possessing photocatalytic properties. 11 th International Congress on the Chemistry of Cement, Durban.
- [39] Chen, J.; Poon, C. (2009) Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications. *Building and Environment* Vol.44, pp.1899-1906.