



ENGENHARIA

Betões Geopoliméricos

Um material com elevadas potencialidades para o reaproveitamento de agregados reciclados

Actualmente os agregados reciclados são utilizados maioritariamente em pavimentos rodoviários: uma opção que constitui na prática um desperdício do seu potencial técnico-económico. A sua utilização em betões estruturais à base de ligantes hidráulicos está limitada em termos regulamentares apenas a volumes pouco significativos (20-25%) e mesmo assim somente para os agregados reciclados com uma percentagem quase nula de substâncias contaminantes indesejáveis, o que se constitui na prática como um obstáculo à meta prevista para 2020, nos termos da Directiva 2008/98/EC, da reciclagem de pelo menos 70% em massa dos resíduos de construção e demolição-RCD.

Introdução

Os agregados constituem o recurso mineral mais consumido no Planeta Terra: a execução de um único apartamento consome aproximadamente 150 toneladas de agregados, 1km de estrada cerca de 10.000 toneladas e 1km de auto-estrada cerca de 30.000 toneladas. A nível mundial o consumo de agregados representa aproximadamente 20.000 milhões de toneladas/ano e a procura deste recurso cresce a uma taxa anual de 4,7% [1].

A utilização de agregados naturais 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. Como além disso a incidência do custo de transporte no custo dos agregados naturais, implica que cada tonelada praticamente duplique de valor a cada 50km, tal consequência leva a uma proliferação de pedreiras com

todos os prejuízos ambientais que daí decorrem. Consequentemente a substituição de agregados naturais por agregados reciclados provenientes dos RCD constitui um contributo indispensável para a eco-eficiência do betão (o material mais utilizado no Planeta Terra) e do sector da construção. De acordo com o Eurostat, são gerados na Europa aproximadamente 970 milhões de toneladas a cada ano, no entanto a taxa de reciclagem média é de apenas 47% (Figura 1).

Países	Taxa de reciclagem (%)
Bélgica (Flandres)	acima de 90
Dinamarca, Estónia, Alemanha, Irlanda, Holanda	acima de 70
Áustria, Bélgica, França, Lituânia, Reino Unido	60-70
Luxemburgo, Letónia, Eslovénia	40-60
EU-27	47
Chipre, República Checa, Finlândia, Grécia, Hungria, Polónia, Portugal, Espanha	Abaixo de 40%
Bulgária, Itália, Malta, Roménia, Eslováquia, Suécia	0

Tabela 1: Taxas de reciclagem de RCD na EU-27 [2]

Em 19 de Novembro de 2008 foi aprovada a Directiva N° 2008/98/CE, que irá produzir alterações no Decreto-Lei N°178/2006 de 5 de Setembro (que regula a gestão de resíduos em Portugal) e cuja transposição para a ordem jurídica interna está a cargo da Agência Portuguesa do Ambiente-APA. Esta Directiva estabelece para os RCD valores de reciclagem que deverão ser no mínimo de 70% em massa até ao ano 2020. Os benefícios associados a uma adequada valorização dos RCD não são no entanto apenas de índole ambiental, pois de acordo com a Agência de Ambiente dos Estados Unidos-EPA, a incineração de 10.000 toneladas de resíduos pode significar a criação de um posto de trabalho, o seu depósito em aterro 6 postos de trabalho, já se a mesma quantidade de resíduos for reciclada isso pode significar 36 postos de trabalho. E o recente relatório "Strategic Analysis of the European Recycled Materials and Chemicals Market in Construction Industry" refere que o mercado dos materiais reciclados gerou 744 milhões de euros em 2010 e apresenta um potencial para atingir 1300

milhões de euros em 2016, valor este que crescerá ainda mais por força da meta atrás referida de 70% em 2020.

Betão de ligantes hidráulicos com agregados reciclados

Muito embora a utilização de agregados reciclados na execução de betões de ligantes hidráulicos seja uma técnica conhecida há quase 50 anos, hoje em dia muitas estruturas ainda continuam a ser executadas com betões à base de agregados naturais. As razões para esse estado de coisas têm a ver por um lado com o baixo custo (económico) destes, por outro com o facto de não existir ainda por parte do sector da construção a necessária consciencialização quanto ao custo ambiental dessa opção, mas também com o facto dos betões feitos com agregados reciclados apresentarem algumas "limitações" de desempenho. Esta afirmação pode ser entendida como controversa por parte de alguns investigadores que obtiveram resultados promissores (betões com resistências à compressão de aproximadamente 80MPa [3]) que parecem poder significar o contrário, contudo

importa ter presente que, essa e outras investigações similares, não só utilizam agregados cujas características são bastante diferentes das daqueles que se encontram nas centrais de reciclagem, como além disso fazem uso de cimentos muito pouco económicos, pelo que a sua reprodutibilidade e utilidade é em termos reais muito escassa. É por essa razão, que as normas existentes na área dos betões com agregados reciclados, se pautam por um elevado conservadorismo, que muito embora possa suscitar algumas interrogações, constitui na prática uma garantia de segurança contra optimismos excessivos fundados em premissas pouco realistas. As normas referidas exigem não só que o conteúdo de agregados reciclados não exceda uma determinada percentagem, que é bastante reduzida no caso dos betões para aplicações estruturais, como também que a percentagem de substâncias contaminantes indesejáveis seja quase nula. E mesmo assim não é tecnicamente possível produzir betões de elevada resistência e elevada durabilidade, usualmente designados de elevado desempenho, do



anfer
METALÚRGICA ANTÓNIO FERNANDES, LDA.
Rua Prof. Dr. Joaquim Fontes, 16 - ARUIL
2715-406 ÁLMARGEM DO BISPO
Tel.: 21 962 81 90 - Fax: 21 962 81 97
e-mail: metlanfer@anfer.pt - www.anfer.pt

EFICIÊNCIA POR SOLUÇÕES INTELIGENTES

Instalações de Britagem Completas (Fixas e Móveis)

Britadores - Crivos - Moinhos de Martelos
Impactores - Tapetes Transportadores
Alimentadores - Soldaduras - Sobressalentes
Projectos e Capacidade de Resposta Imediata
Estruturas Metálicas de todos os tipos - Contenção de Fachadas
Licenciamento e Projecto de Pedreiras

inglês, "High Performance Concrete-HPC". Este facto constitui não só um óbice ambiental, pois ao aumentarmos a durabilidade de um betão de 50 para 500 anos estamos na prática a reduzir o seu impacto ambiental 10 vezes [4], mas também económico, pois o aumento em três

vezes da resistência à compressão de um betão permite uma redução de 50% no consumo do aço [5]. Aliás a norma actualmente em vigor em Portugal (E LNEC 471:2009) é até mais "generosa" que outras pois permite uma classe de resistência máxima C40/C50, enquanto

por exemplo a que vigora na Alemanha não vai além da classe de resistência C30/37. De acordo com a especificação LNEC E 471:2009, os agregados reciclados grossos provenientes dos RCD são agrupados em 3 classes (ARB1, ARB2 e ARC) de acordo com a Tabela 1.

Classe	Proporção dos constituintes (EN 12620:2002/A1:2008)					
	R _c (%)	R _c + R _u (%)	R _b (%)	R _a (%)	X + R _g (%)	FL (%)
ARB1	≥ 90	≤ 10	≤ 5	≤ 0,5	≤ 2	≤ 2
ARB2	≥ 70	≤ 30	≤ 5	≤ 1	≤ 2	≤ 2
ARC	≥ 90	≤ 10	≤ 5	≤ 2	≤ 2	≤ 2

em que:

- R_c – betão, produtos de betão e argamassas;
- R_u – agregados não ligados, pedra natural e agregados tratados com ligantes hidráulicos;
- R_a – materiais betuminosos;
- R_b – elementos de alvenaria (tijolos, ladrilhos, telhas, etc);
- R_g – vidro;
- FL – material flutuante em volume;
- X – outros: solos, plásticos, borrachas, metais, madeira não flutuante e estuque

Tabela 1: Classes de agregados reciclados

Relativamente aos agregados reciclados ARC estes só podem ser utilizados 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, para esta última utilização a percentagem máxima de incorporação é

respectivamente de 25 e 20% de agregados reciclados grossos, para cada uma das referidas classes (Tabela 2).

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 %	

(1) Conforme definida na norma NP EN 206-1

(2) Em fundações

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

A referida especificação salienta ainda que os resíduos destinados à produção de agregados reciclados podem estar contaminados com poluentes como o amianto, metais pesados, solventes, tintas e hidrocarbonetos, pelo que terão que ser sujeitos a ensaios de lexiviação. Também que os agregados reciclados grossos devem ser avaliados quanto à sua reactividade relativamente à reacção álcalis-silica (RAS) de acordo com a especificação LNEC E 467:2006, isto para impedir que a presença de agregados reciclados reactivos possa vir a originar reacções expansivas no betão.

A questão dos contaminantes é por isso provavelmente o "calcanhar de Aquiles" dos agregados reciclados. Um estudo realizado em 11 centrais de reciclagem em Espanha revelou que um quarto dos agregados reciclados apresentavam uma percentagem de 2% de gesso, o qual constitui um factor de risco para a durabilidade do betão [6]. A deterioração é neste caso originada pela reacção química dos iões sulfatos com a alumina do agregado ou com o aluminato tricálcico (C3A), da pasta de cimento endurecido, na presença de água, etringite secundária, assim referida para a distinguir da

gerada durante a hidratação do cimento e não expansiva e gesso, ambos produtos que originam expansão e fissuração do betão. Razão porque as normas sobre RCD limitam a menos de 1% a presença de SO₃. Outros estudos mostram que betões contendo agregados reciclados contaminados com cloretos e sulfatos apresentam menor resistência à corrosão [7]. Também que a presença de partículas de alumínio mesmo numa percentagem de apenas 0.1% pode provocar uma redução das propriedades mecânicas e também da durabilidade dos betões [8].

**“ THAILAND INTERNATIONAL CONSTRUCTION MACHINERY,
EQUIPMENT AND TECHNOLOGY EXHIBITION 2012 ”**



Your gateway into Southeast Asia's lucrative construction machinery & equipment markets

Featuring

- Construction Machinery
- Mining Machines
- Construction Equipment
- Building Material Machines
- Construction Vehicles
- Construction Technology & Services

**BOOK your stand today to reach out
to key decision makers and trade buyers at CONSTECH 2012!**

Reply Form

Please Complete this Fax Reply Form and fax to +66 (0) 2833 5127-9

BO-01

We are interested in :

- Sponsorship
 Exhibiting
 Visiting
 Receiving more information

Name (Mr/ Mrs/ Ms) _____

Company _____ Position _____

Address _____

City _____ Country _____ Postal Code _____

Phone _____ Fax _____

Email _____ Website _____

Tel: +66(0) 2833 5208 Fax: +66(0) 2833 5127-9

Email: sirapatk@impact.co.th

Organizer

Show Manager

Sponsors



Betões geopoliméricos

Foi o investigador Francês Joseph Davidovits [9] quem primeiro patenteou materiais ligantes obtidos através da activação química do caulino e do metacaulino, tendo criado em 1978 o termo "geopolímero". Davidovits sugeriu para a designação química de geopolímeros o termo poli(sialatos), em que Sialato é uma abreviação para óxido aluminossilicato. A rede de sialatos é composta por aniões tetraédricos $[\text{SiO}_4]^{4-}$ e $[\text{AlO}_4]^{5-}$ compartilhando os oxigénios dos vértices. Havendo necessidade de iões positivos (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{++} , Ba^{++} , NH_4^+ , H_3O^+), estarem presentes na estrutura para compensarem o deficit de carga eléctrica do Al^{3+} em coordenação tetraédrica (após desidroxilação o alumínio passa de coordenação 6 (octaédrica) para 4 (tetraédrica), a

qual é mais instável. De acordo com Davidovits, os geopolímeros são polímeros pelo facto de se transformarem, policondensarem, ganharem forma e endurecerem rapidamente a baixa temperatura. Adicionalmente também são GEO-polímeros, isto é inorgânicos, duros, estáveis até temperaturas de $1250\text{ }^\circ\text{C}$ e não inflamáveis. Os ligantes geopoliméricos podem utilizar como matéria-prima qualquer material inorgânico constituído por sílica e alumina [10], mas preferencialmente que tenha sido sujeito a um tratamento térmico, que o torne material amorfo (mais reactivo). O metacaulino tem a vantagem de ter um elevado grau de dissolução em soluções alcalinas e também de apresentar cor branca, contudo a necessidade de tratamento térmico durante várias horas torna-o economicamente menos

competitivo que as cinzas volantes e que as escórias de alto forno. Alguns investigadores [11], desenvolveram uma tecnologia de calcinação instantânea que permite reduzir o tempo de calcinação da caulinite de algumas horas para alguns minutos o que obsta a este inconveniente. Na Figura 1, apresenta-se uma instalação para produção de pozolanas por calcinação instantânea, com uma capacidade de produção de 10 toneladas/hora. Os betões à base de ligantes geopoliméricos apresentam características que permitem perspectivar elevadas potencialidades para o reaproveitamento de agregados reciclados. Para a mesma razão água/ligante os betões geopoliméricos apresentam uma resistência à compressão muito superior aos betões de ligantes hidráulicos. Wang [13] desenvolveu um betão geopolimérico com uma resistência à compressão de 125 MPa e outros autores [14] referem ter obtido 20 MPa ao fim de apenas 4 horas, no que são acompanhados por outros [15], que obtiveram uma resistência à compressão de 30MPa ao fim de apenas 1 dia. Este comportamento apresenta claras vantagens relativamente aos betões de ligantes hidráulicos, por permitir a colocação em serviço de estruturas em prazos extremamente curtos. Relativamente à resistência ao ataque por imersão em meio ácido, vários investigadores referem que esta é uma das maiores vantagens dos betões geopoliméricos relativamente aos betões correntes. Davidovits et al. [16] mencionam perdas de massa de 6 e 7% em ligantes geopoliméricos imersos durante 4 semanas em soluções de 5% de ácido clorídrico e sulfúrico, sendo a perda para betões à base de cimento Portland respectivamente de 78 e 95%. Outros autores [17] compararam a resistência de manilhas de águas residuais (Fig. 2) feitas com os dois tipos de betão, ao ataque por imersão em ácido sulfúrico.



Figura 1:
Instalação industrial de produção de pozolanas por calcinação instantânea



Figura 2:
Manilhas de 1500 mm
de diâmetro para redes
de águas residuais

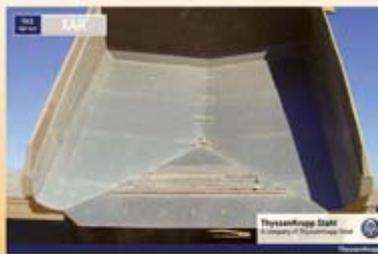
Tendo observado que enquanto o betão corrente à base de ligantes hidráulicos e com uma vida útil de 50 anos perdeu 25% da sua massa ao fim de 80 ciclos, o betão geopolimérico necessitou de 1400 ciclos para perder a mesma

massa, o que significa que terá em princípio uma vida útil de 900 anos. Uma outra vantagem dos betões geopoliméricos relativamente aos betões correntes prende-se com o seu elevado potencial no sentido da imobilização de resíduos

tóxicos e radioactivos, vantagem que é particularmente interessante no caso do reaproveitamento de agregados reciclados contendo substâncias poluentes. Jaarsveld et al. [18] referem que a utilização de ligantes geopoliméricos fornece bons resultados na imobilização de metais pesados de lamas de minas, com reduções da concentração do lixiviado relativamente à concentração inicial de respectivamente Fe (99%), Cu (99%), As (95%). Outros autores [19] mostram que é possível, com recurso a ligantes geopoliméricos, obter um elevado grau de imobilização de resíduos contendo metais tóxicos, hidrocarbonetos e elementos radioactivos. Vinsova et al. [20] confirmam o bom desempenho destes materiais na imobilização de chumbo, cádmio e crómio.



AÇOS ESPECIAIS PARA MÚLTIPLAS APLICAÇÕES



AUTOR



F. Pacheco Torgal

✉torgal@civil.uminho.pt

Engenheiro Civil Sénior, investigador do Grupo de Construção Sustentável da Unidade C-TAC da Universidade do Minho. Autor e co-autor de aprox. 200 publicações em revistas e conferências, onde se incluem 40 artigos em revistas internacionais, sendo 29 daquelas listadas no ISI-SCI com 207 citações, o que corresponde a um índice-h=9.

REFERÊNCIAS

- [1] Pacheco Torgal, F.; Jalali, S. (2011) A sustentabilidade dos materiais de construção. ISBN 978-972-8600-22-8, 2ª Edição TecMinho, 460 pg., Guimarães, Portugal.
- [2] Sonigo P, Hestin M, Mimid S (2010) Management of construction and demolition waste in Europe. Stakeholders Workshop, Brussels
- [3] Ajdukiewicz, A.; Kliszczewicz, A. (2002) Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*, 24, 269-279.
- [4] Mora, E. (2007) Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials. *Building and Environment* 42, 1329-1334.
- [5] Hegger, J.; Nitsch, A Burkhardt, J. (1997) Hchleistungsbeton im Fertigteilbau. *Betonwerk Fertigteil - Technik* 2, 81-90.
- [6] Agrela, E., Sánchez de Juan, M., Ayuso, J., Geraldes, V. L., Jiménez, J. R. (2011) Limiting properties in the characterization of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pg. 3950-3955.
- [7] Debieb, F.; Courard, L.; Degeimbre, R. (2012) Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. *Construction and Building Materials* (in press)
- [8] Park, W.; Noguchi, T. (2012) Influence of metal impurity on recycled aggregate concrete and inspection method for aluminum impurity. *Construction and Building Materials* (in press)
- [9] Davidovits, J. (1979) - Synthesis of new high temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites. SPE PACTEC 79 Society of Plastic Engineers, Brookfield Center, pp.151-154
- [10] Xu, H.; Van Deventer, J. S. J. (2000) - The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing* Vol.59, pp.247-266.
- [12] Salvador, S. (2000) A semi-mobile flash dryer/calciner unit manufacture pozzolana from raw clay soils - application to soil stabilization. *Construction and Building Materials* 14, pp. 109-117.
- [13] Wang, S. (1991) Review of recent research on alkali-activated concrete in china. *Magazine of Concrete Research* 5154 (1991) 29-35.
- [14] Davidovits J (1994) Properties of geopoly-mers cements. In Proc of the 1st International Conference on alkaline cements and concretes, 131-149. Scientific Research Institute on Binders and Materials Kiev, Ukraine
- [15] Pacheco-Torgal F, Gomes J P, Jalali S (2007) Investigations about the effect of aggregates on strength and microstructure of geopolymeric mine waste mud binders. *Cem Concr Res* 37: 933-941.
- [16] Davidovits, J.; Comrie, D. C.; Paterson, J.H.; Ritcey, D.J. (1990) Geopolymeric concretes for environmental protection. *ACI Concrete International* 12, 30-40.
- [17] Gourley, J.T.; Johnson, G.B. (2005) Developments in geopolymer precast concrete. In *Proceedings of Geopolymer 2005 World Congress, Geopolymer Green Chemistry and Sustainable Development Solutions*, pp.139-143. S. Quentin, France
- [18] Jaarsveld, J. G. S.; Deventer, J. S. J.; Lorenzen, L. (1997) The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications. *Minerals Engineering* Vol.10, p.659-669.
- [19] Hermann, E.; Kunze, C.; Gatzweiler, R.; Kiebig, G.; Davidovits, J. (1999) Solidification of various radioactive residues by geopolymer with special emphasis on long term stability. In *Proceedings of 1999 Geopolymere Conference*, p.211-228.
- [20] Vinsova, H.; Jedinakova-Krizova; Gric, L.; Susmilch, J. (2007) Immobilization of toxic contaminants into aluminosilicate matrixes. In *Proceedings of the 2007- Alkali Activated Mate-rials - Research, Production and Utilization 3rd Conference*, p.735-736, ISBN 978-80-867-42-19-9. Edited by Agentura Action, Praga, República Checa.