ENGENHARIA
.....

Reabilitação de infra-estruturas de betão com ligantes de base geopolimérica

A reabilitação de infra-estruturas degradadas constitui não só uma opção de matriz marcadamente eco-eficiente pelas poupanças de recursos e energia associadas como representa além disso a nível mundial um mercado na ordem dos 1012 euros (triliões ou biliões consoante estejamos nos EUA ou na Europa).

Só nos Estados Unidos nos próximos 5 anos este mercado ascende a 1.6 triliões de dólares. Como a maioria destas infra-estruturas foram construídas em betão de cimento Portland, importa perceber quais as especificidades da sua reparação e em particular quais os materiais mais adequados para esse efeito.

O presente artigo dá particular destaque às potencialidades dos ligantes de base geopolimérica no contexto referido.

Por F. Pacheco Torgal

Introdução

A nível mundial o custo da reabilitação de infra-estruturas degradadas atinge valores verdadeiramente astronómicos. Nos EUA 27% de todas as obras de arte (aquedutos) apresentam problemas de corrosão provocados pelo uso de sal como forma de obstar ao congelamento do piso das mesmas durante o Inverno, estando por isso necessitadas de obras

de reparação ou mesmo substituição integral cujo custo ascende a 150 biliões de dólares [1]. Estima-se que neste país sejam necessários investimentos anuais superiores a 25 biliões de dólares só para obras de manutenção de infra-estruturas de abastecimento de água [2]. Nos EUA o mercado da reabilitação de infra-estruturas degradadas representará nos próximos 5 anos

mais de 1 trilião de dólares. Na Europa quase 84000 pontes de betão armado e pós-esforçado precisam de obras de manutenção, reparação ou reforço estrutural cujo custo anual ascende a mais de 250 milhões de euros [3]. A deterioração precoce das estruturas de betão armado à base de cimento Portland, é um fenómeno muito mais vulgar do que seria expectável. São

aliás inúmeros os casos relatados na literatura da especialidade sobre ocorrências relacionadas com a degradação de estruturas de betão. Por um lado muitas delas foram construídas quando a questão da sua durabilidade não estava sequer contemplada na regulamentação técnica em vigor á data [4]. Por outro, os problemas da durabilidade do betão, estão relacionados com possíveis deficiências de betonagem e cura deste material, mas o seu verdadeiro calcanhar de Aquiles fica a dever muito ao próprio material ligante (cimento Portland), que apresenta uma elevada quantidade de cal, facilmente susceptível de ataque químico. Situação agravada pela incapacidade do cimento Portland em conseguir uma boa aderência aos agregados o que induz níveis de permeabilidade relativamente elevados, facilitando o ingresso de água, gases e substâncias agressivas, que provocam fenómenos de carbonatação e de corrosão das armaduras. A ausência de inspecções regulares ao estado de conservação das estruturas

em betão, contribui também para agravar a sua degradação precoce. Torna-se por isso importante analisar até que ponto os materiais de reparação utilizados são eficazes em termos da reparação de estruturas de betão de cimento Portland. Particular destaque será dado à utilização de novos materiais como os ligantes de base geopolimérica no referido contexto. As pesquisas no domínio destes materiais, sofreram um incremento exponencial a partir das descobertas efectuadas pelo investigador francês J. Davidovits [7], que desenvolveu e patenteou ligantes obtidos por activação alcalina de caulino e metacaulino, tendo criado em 1978 o termo "geopolimero". 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 $[SiO_4]^{4-}$ e $[AlO_4]^{5-}$ 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 tétraédrica (após desidroxilação o alumínio passa de coordenação 6 (octaédrica) para 4 (tétraédrica), 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 até 1250 °C e não inflamáveis.

Impermeabilização das estruturas de betão

A durabilidade do betão caracteriza em termos gerais, a capacidade deste material para resistir a ataques de natureza física ou química. Uma determinada estrutura em betão deverá então ser capaz de manter o desempenho previsto, durante a sua vida útil. E quando se fala do betão, fala-se mais especificamente da matriz cimentícia, porque em termos gerais é a pasta de cimento endurecida

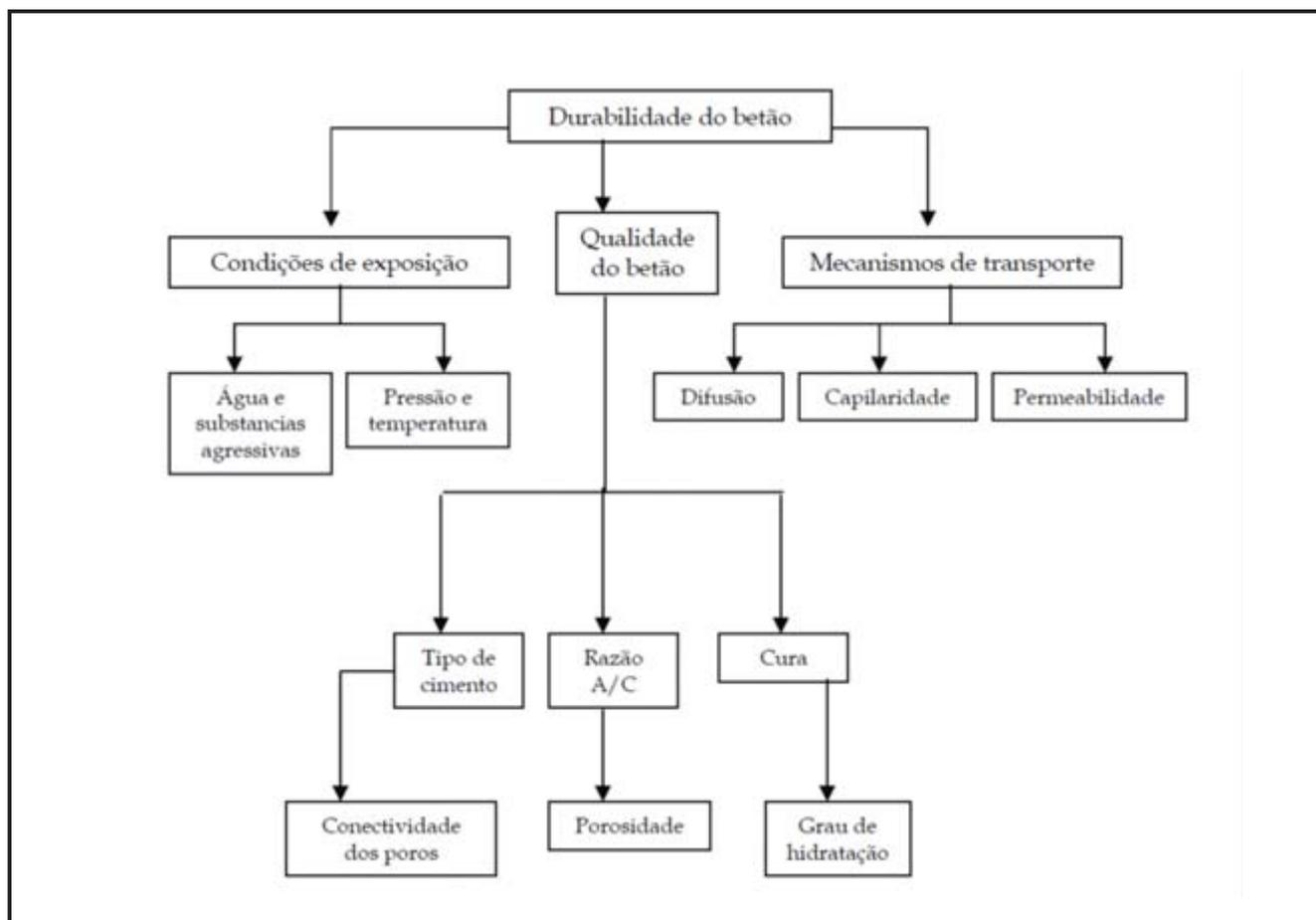


Figura 1:
Factores condicionantes da durabilidade do betão [8]

que mais contribui para a deterioração do betão, pois é o recobrimento poroso que vai permitir a entrada de agentes agressivos do exterior para o interior daquele material. A durabilidade surge assim associada à minimização da possibilidade dos agentes agressivos poderem ingressar no betão, o que poderá acontecer sob determinadas condições ambientais através de qualquer um dos seguintes mecanismos de transporte: permeabilidade, difusão ou capilaridade (Figura 1). A utilização de tratamentos da

superfície do betão com materiais impermeabilizantes, para impedir o acesso ao seu interior de substâncias agressivas, é uma forma de contribuir para a durabilidade destes materiais. Os tratamentos hidrorrepelentes mais comuns utilizam resinas epoxídicas, silicone (siloxanos), acrílicos, poliuretanos, polimetacrilatos. Bijen [9] refere que as resinas epoxi apresentam baixa resistência à radiação ultra-violeta e os poliuretanos são sensíveis a ambientes de elevada alcalinidade. Por outro lado, embora alguns materiais

hidrorrepelentes consigam ser eficazes para um determinado mecanismo de transporte (difusão, capilaridade, permeabilidade) podem não o ser para outro. Medeiros & Helene [10] utilizaram um material hidrorrepelente à base de silano-siloxano tendo constatado que embora o mesmo seja eficaz a reduzir a absorção de água por capilaridade do betão (redução entre 2 a 7 vezes), só conseguiu uma redução da difusão de cloretos entre 11 a 17% e não conseguiu impedir o acesso de água por permeabilidade.

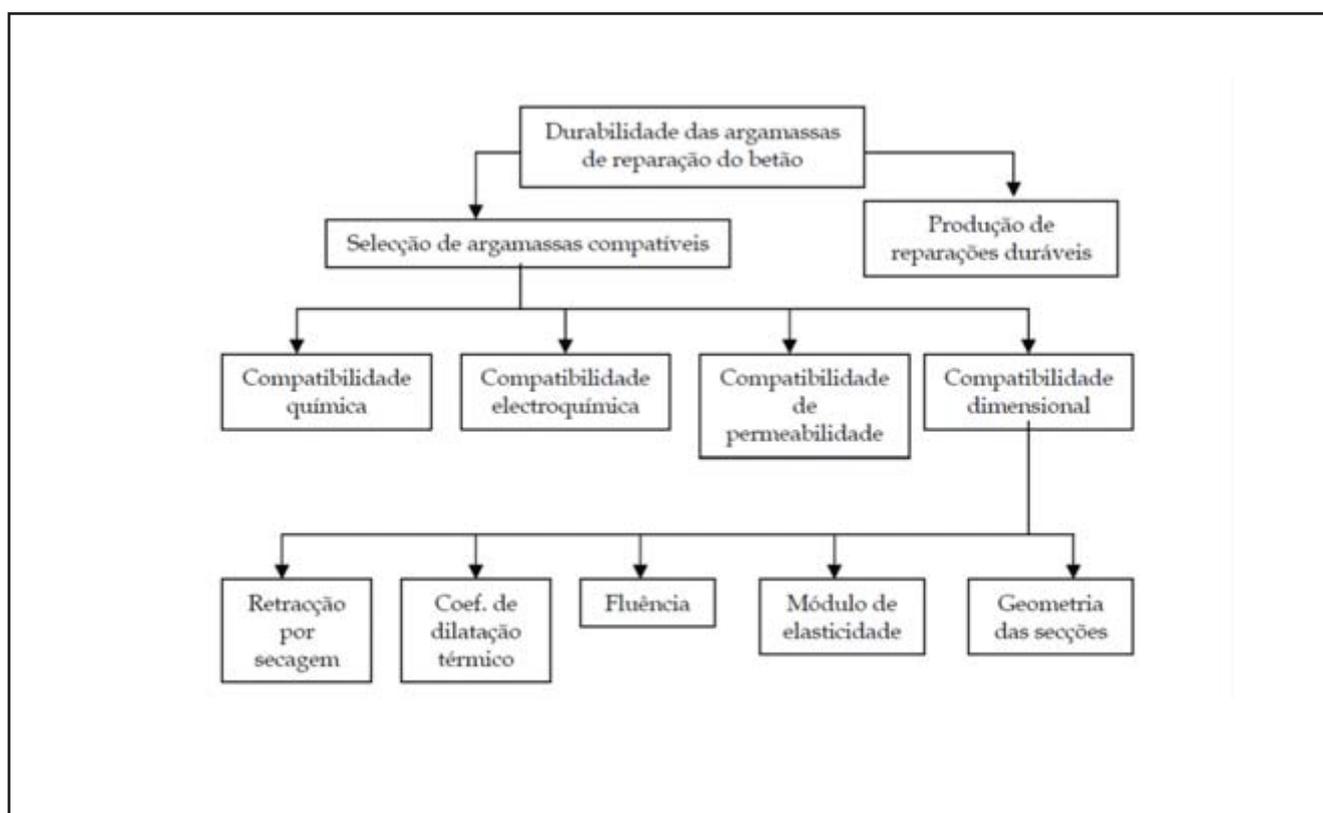


Figura 2:

Factores que influenciam a durabilidade das argamassas de reparação [18]

Balaguru et al. [11] estudou o uso de ligantes de base geopolimérica como material impermeabilizante para estruturas de betão, referindo que após o endurecimento estes materiais ficam com uma textura vítrea que dificulta a aderência de tintas e logo resistentes ao graffiti. Os mesmos autores referem ainda que contrariamente aos impermeabilizantes orgânicos os ligantes geopoliméricos são permeáveis ao vapor pelo que não perdem

aderência ao betão ao contrário dos primeiros [12]. Outras investigações [13] comprovaram que os ligantes de base geopolimérica são duráveis em ensaios realizados em condições reais, apresentando o exemplo de um caso de uma aplicação exposta durante 9 anos a água salgada. Mais recentemente outros autores [14,15] referem que a utilização de geopolímeros para impermeabilização da superfície do betão pode ser mais eficaz do que

os polímeros orgânicos utilizados até aqui.

Reparação de betão localizada

A reparação de betão localizada é frequentemente utilizada para restaurar troços pontuais das estruturas de betão [16,17]. As argamassas de reparação de estruturas de betão armado devem respeitar certos requisitos de forma a assegurarem uma compatibilidade com o betão do substrato (Figura 2 e Tabela 1).

Propriedades	Relação entre a argamassa de reparação (Ar) e o betão do substrato (Bs)
Resistência à compressão e flexão	$Ar \geq Bs$
Módulo de elasticidade	$Ar \sim Bs$
Coef. de Poisson	Depende do mód. de elast.
Coef. de dilatação térmico	$Ar \sim Bs$
Adesão em tensão e esforço transverso	$Ar \geq Bs$
Cura e retracção de longo prazo	$Ar \geq Bs$
Extensão	$Ar \geq Bs$
Fluência	Depende da fluência
Fadiga	$Ar \geq Bs$

Tabela 1: Compatibilidade estrutural
- requisitos gerais para argamassas de
reparação de betão [18]

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

A aplicação da argamassa de reparação localizada é precedida de uma operação de limpeza da superfície do betão a fim de retirar partículas soltas deste material. Além disso como a rugosidade da superfície do betão a reparar condiciona o desempenho da reparação torna-se na maior parte das vezes necessário aumentar esta Regra geral os meios para levar a cabo esta operação são variados e fundamentalmente do tipo mecânico como sejam por exemplo as seguintes:

- Escovagem com escova metálica
- Picagem com martelo pneumático
- Raspagem com ferramenta pneumática
- Aplainamento com discos múltiplos
- Projecção de granalha
- Projecção de jacto de areia
- Projecção de jacto de água

Uma das propriedades fundamentais das argamassas de reparação é a rápida aderência ao betão do substrato, que permita a colocação da estrutura

novamente em serviço. Actualmente a maioria das argamassas de reparação subdivide-se em dois tipos conforme o ligante utilizado seja orgânico (resinas epoxídicas, poliéster ou látex) [19] ou inorgânico (cimento Portland). Estas últimas têm a vantagem de ser uma opção mais barata e menos tóxica e são disponibilizadas a nível comercial em forma de um pré-preparado ao qual basta juntar água, consistindo na mistura de cimento Portland, agregados seleccionados, sílicas de fumo, fibras e outros aditivos. Investigações recentes no domínio dos ligantes de base geopolimérica apontam para uma terceira família de materiais com elevadas potencialidades no campo da reabilitação de estruturas de betão armado [20]. Sendo a aderência uma propriedade fundamental a satisfazer pelas argamassas de reparação, a qual é bastante influenciada pela rugosidade do betão do substrato apresentam-se alguns resultados em termos do desempenho comparado entre produtos comerciais

de reparação de estruturas de betão armado e argamassas geopoliméricas em função da rugosidade da superfície do betão do substrato. Os provetes reparados com argamassas geopoliméricas aparecem designados por GP, enquanto os provetes reparados com os produtos comerciais aparecem designados por R1 e R2. Os diferentes tipos de superfície do betão do substrato, aparecem referenciados com as seguintes designações:

NTS – Superfície serrada sem tratamento

ES – Superfície serrada sujeita a tratamento químico

MF – Superfície betonada sobre cofragem metálica

WF - Superfície betonada sobre cofragem de madeira de pinho

Os resultados da influência das diversas soluções de reparação na aderência média dos materiais em termos da resistência ao corte é apresentada na Figura 3.

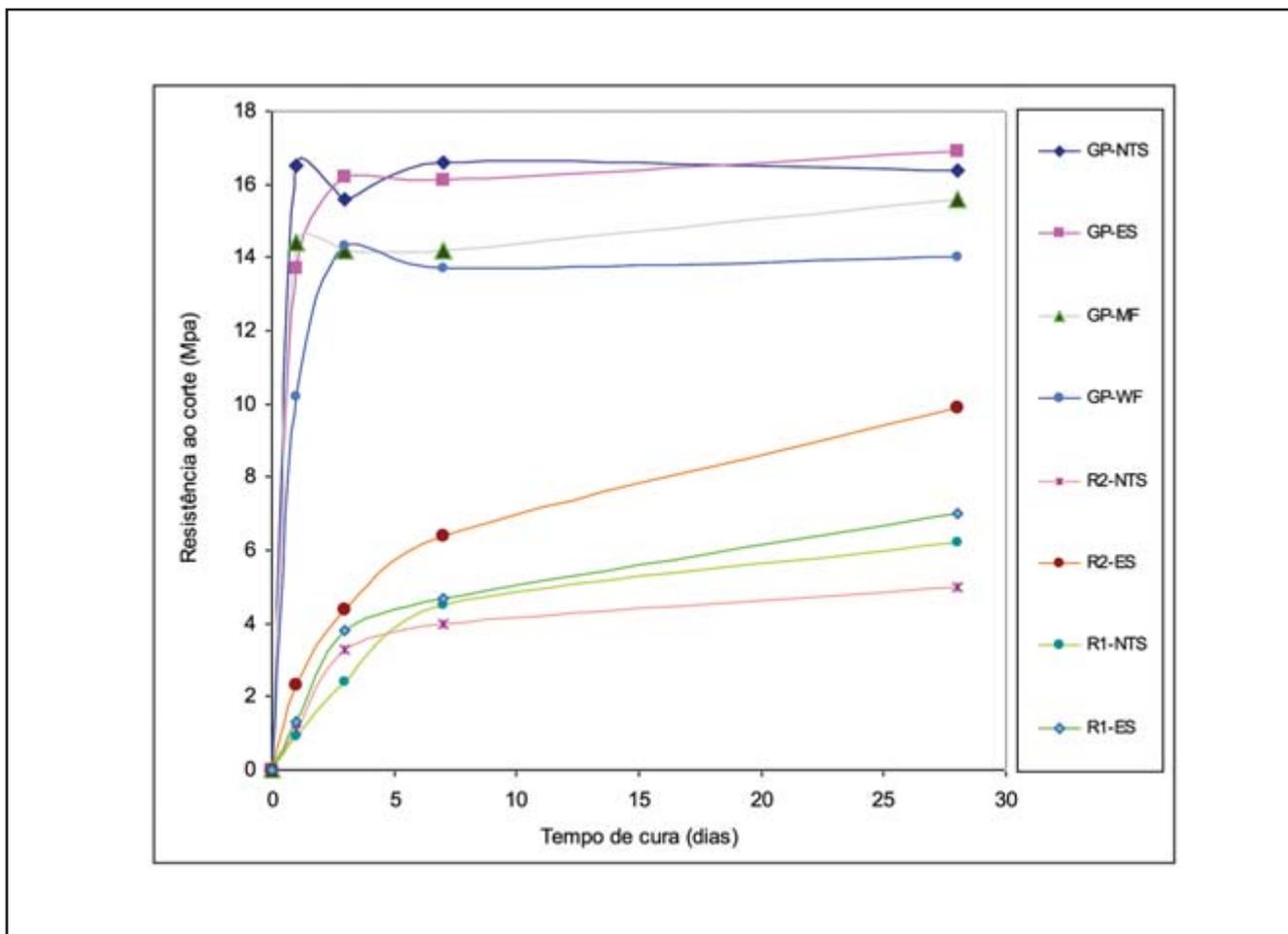


Figura 3:
Resistência ao corte no ensaio “slant-shear [20].

**“ 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



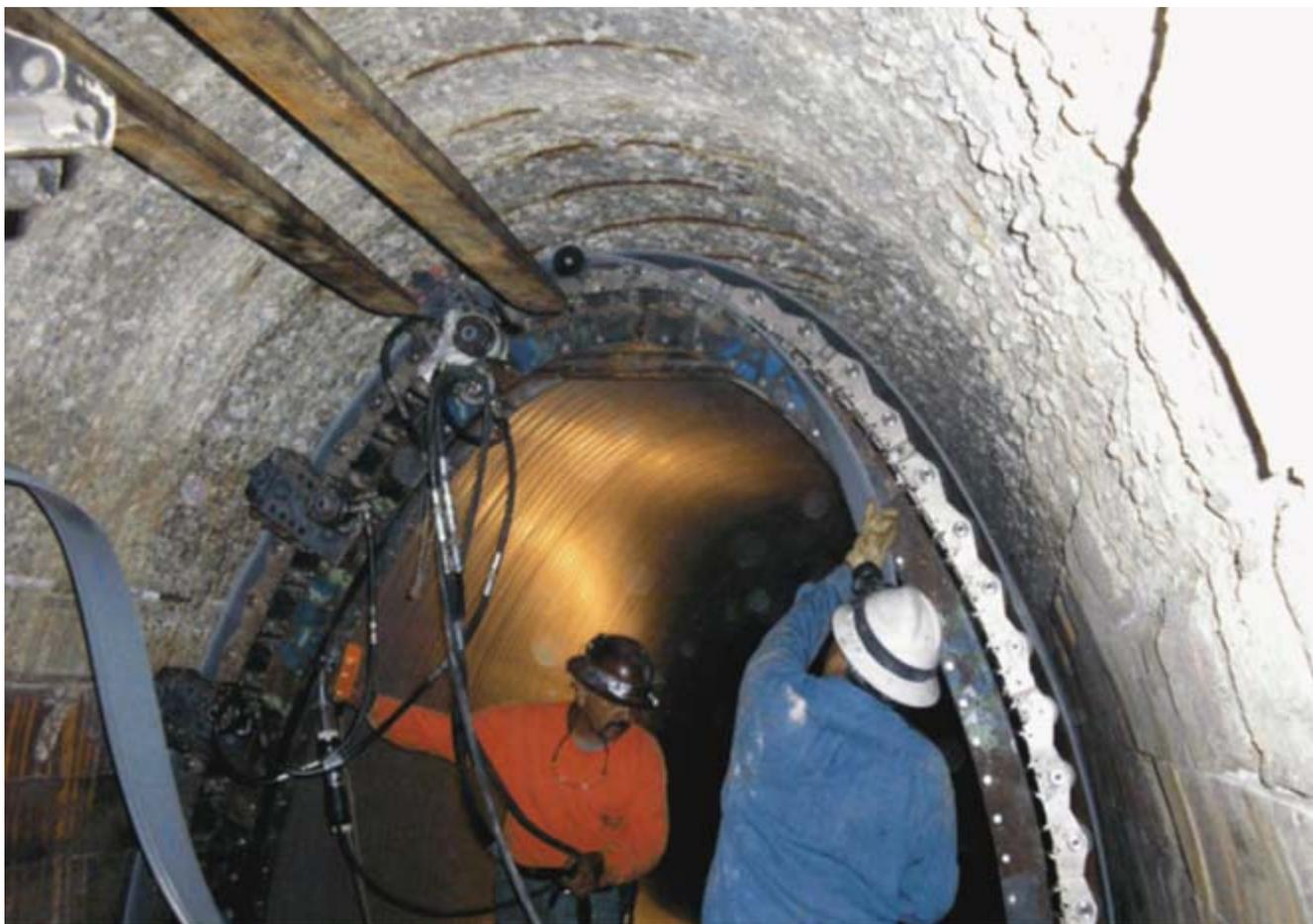


Figura 4:

Reabilitação de rede de águas residuais com revestimento em PVC [26]

Os valores da resistência ao corte por aderência nos provetes reparados com argamassas geopoliméricas apresentam altas resistências logo a partir do primeiro dia, evidenciando nessa idade uma resistência superior aos provetes reparados

com produtos comerciais aos 28 dias. Sendo até bastante superiores ao valor mínimo recomendado para a resistência à adesão pela Concrete Society. A resistência ao corte nos provetes reparados com argamassas geopoliméricas

não é influenciada pelo tratamento químico da superfície serrada do betão do substrato. O desempenho em termos de aderência dos provetes reparados com produtos comerciais é muito dependente do tempo de cura, pelo que isso constitui um obstáculo quando se pretendem altas aderências iniciais. Os resultados mostram que a utilização do produto R2 é claramente influenciada pelo tipo de tratamento da superfície do betão do substrato, evidenciando um ganho de resistência muito substancial (quase o dobro) relativamente à aderência da superfície serrada. Por seu lado o produto R1, apresenta em superfícies sem tratamento um valor de aderência superior ao produto R2, contudo o nível de aderência pouco cresce com o aumento da rugosidade da superfície. Em termos económicos, os produtos comerciais de reparação são bastante mais caros que a solução de base geopolimérica. Mesmo que os produtos comerciais apresentassem o mesmo desempenho em termos de aderência as soluções de reparação com ligantes geopoliméricos eram 6,9 vezes mais económicas que a solução envolvendo o produto comercial com o menor preço. Já quando a comparação é feita em termos de rácio custo/resistência

“slant shear test” as diferenças tornam-se bastante maiores. Neste caso a solução envolvendo o produto comercial mais barato é 13,8 vezes mais cara que a solução com ligantes de base geopolimérica. O que é indicativo da capacidade concorrencial evidenciada por este tipo de ligantes.

Reabilitação de manilhas em redes de águas residuais

As manilhas de betão utilizadas na execução de redes de águas residuais são sujeitas a um ataque muito agressivo por ácido sulfúrico de origem química e bacteriológica (bactéria desulfovibri) [21-23], necessitando por isso de obras de manutenção ou reabilitação. Os materiais correntemente utilizados para o efeito são baseados em cimento Portland, resina epóxídica, poliuretano, poliurea e híbridos de poliurea/poliuretano [24]. O poliuretano é obtido a partir de isocianatos, químicos bem conhecidos do desastre de Bopal ocorrido na Índia em 1984, quando uma nuvem de isocianato de metilo que provocou aprox. 15.000 mortos e problemas de saúde em quase 200.000

pessoas. Esta substância é altamente tóxica e há múltiplos registos de graves problemas de saúde em trabalhadores que utilizam o poliuretano. O fabrico de poliuretano envolve ainda a produção de substâncias tóxicas como fenol e clorofluorcarbonetos, entre outras [25]. Burtner et al. [26] descrevem a reabilitação de uma rede de águas residuais com uma extensão de revestimento 4632m na qual foi utilizado um revestimento de policloreto de vinilo (PVC) (Fig.4). O PVC é um polímero termoplástico, obtido a partir da polimerização do monómero de cloreto de vinilo, sendo o maior produtor (em volume), de organoclorados. Vários grupos de cientistas sugeriram já a proibição absoluta da utilização de cloro como matéria-prima industrial [27]. Além disso a produção de PVC implica o uso de estabilizadores à base de estanho (orgâno-estânicos), para impedir que este material se degrade sob a acção da temperatura (entre 150 a 200 °C). Composto de elevada eco-toxicidade podendo ter um efeito nocivo em termos ambientais. Além disso recentemente o Parlamento e o

Conselho Europeu aprovaram o novo Regulamento de Produtos da Construção (305/2011) que a partir de 1 de Julho de 2013 irá substituir de forma integral a Directiva dos Produtos da Construção 89/106/CEE, já anteriormente alterada pela Directiva 1993/68/EEC. Uma questão fundamental no novo Regulamento prende-se com a informação acerca das substâncias perigosas. Enquanto a Directiva dos Produtos da Construção apenas levava em conta uma quantidade bastante restrita das mesmas como por exemplo o formaldeído ou o pentaclorofenol, o RPC remete esta questão para o Regulamento sobre o Registo, Avaliação, Autorização e Restrição de Produtos Químicos – REACH [28]. Como a resistência dos ligantes geopoliméricos ao ataque de ácidos [29,30], é bastante superior à resistência do cimento Portland isto significa que estes materiais podem constituir uma alternativa eficaz, económica e de baixa toxicidade na reabilitação de manilhas de esgotos [31-33].



AÇOS ESPECIAIS PARA MÚLTIPLAS APLICAÇÕES



AUTOR



F. Pacheco Torgal

✉ torgal@civil.uminho.pt

Engenheiro Civil Sênior, 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 (email: torgal@civil.uminho.pt)

REFERÊNCIAS

- [1] Davalos, J.F. (2012) Advanced materials for civil infrastructure rehabilitation and protection. Seminar at The City College of New York, New York
- [2] O'Connell, M.; McNally, C.; Richardson, M. (2010) Biochemical attack on concrete in wastewater applications: a state of the art review. *Cem Concr Compos*, 32 (7) (2010), pp. 479-485
- [3] Yan, L.; Chouw, N. (2012) Behavior and analytical modeling of natural flax fibre reinforced polymer tube confined plain concrete and coir fibre reinforced concrete. *Journal of Composite Materials* (in press).
- [4] Hollaway LC. (2011) Key issues in the use of fibre reinforced polymer (FRP) composites in the rehabilitation and retrofitting of concrete structure. In Karbhari VM & Lee LS (Eds.), *Service life estimation and extension of civil engineering structures*. Woodhead Publishing Limited Abington Hall, Cambridge.
- [5] Mora, E. (2007) Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials. *Building and Environment* 42, 1329-1334.
- [6] Delatte, N. (2009) Introduction. In *Failure, Distress and Repair of Concrete Structure*, Delatte, N. (ed), Woodhead Publishing Limited Abington Hall, Cambridge.
- [7] 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
- [8] Bai J (2009) Durability of sustainable concrete materials. In *Sustainability of Construction Materials* Khatib J (ed), Woodhead Publishing Limited Abington Hall, 239-253, Cambridge.
- [9] Bijen J (2000) Durability of engineering structures. Design, repair and maintenance. Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Cambridge
- [10] Medeiros M, Helene P (2008) Efficacy of surface hydrophobic agents in reducing water and chloride ion penetration in concrete. *Mater Struct* 41:59-71.
- [11] Balaguru, P. (2002) Geopolymer for protecting coating of transportation infrastructures. Center for Advanced Infrastructure and Transportation (CAIT). Civil & Environmental Engineering, Rutgers State University, Piscataway
- [12] Papakonstantinou, C.G.; Balaguru, P.N. (2007) Geopolymer protective coatings for concrete. *International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings)* 52.
- [13] Balaguru, P.; Nazier, M.; Arafa, M. (2008) Field Implementation of Geopolymer Coatings. Center for Advanced Infrastructure and Transportation (CAIT). Civil & Environmental Engineering, Rutgers State University, Piscataway
- [14] Zhang Z, Yao X, Zhu H (2010) Potential applications of geopolymers as protection coatings for marine concrete I. Basic properties. *Appl Clay Sci* 49:1-6.
- [15] Zhang Z, Yao X, Zhu H (2010) Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete II. microstructure and anticorrosion mechanism. *Appl Clay Sci* 49:7-12.
- [16] Emmons, P.; Vaysburd, A. (1994) Factors affecting the durability of concrete repair: the contractor's viewpoint. *Construction and Building Materials* 8, 5-16.
- [17] Emmons, P.; Vaysburd, A. (1996) Total system concept - necessary for improving the performance of repaired structures. *Construction and Building Materials* 10, 69-75
- [18] Morgan D (1996) Compatibility of concrete repair materials and systems. *Constr Build Mater* 10:57-67.
- [19] Murray, M. (2009) Patching of deteriorated concrete structures. In *Failure, Distress and Repair of Concrete Structure*, Delatte, N. (ed), Woodhead Publishing Limited Abington Hall, 282-295, Cambridge.
- [20] Pacheco-Torgal F, Gomes J, Jalali S (2008) Adhesion characterization of tungsten mine waste geopolymeric binder. Influence of OPC concrete substrate surface treatment. *Constr Build Mater* 22: 154-161.
- [21] Monteny, J., Vincke, E., Beeldens, A., De Belie, N., Taerwe, L., Van Gemert, D., Verstraete, W. (2000) Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cement and Concrete Research* 30, pp. 623-634.
- [22] Okabe, S.; Odagiri, M.; Ito, T.; Satoh, H. (2007) Succession of sulfur-oxidizing bacteria in the microbial community on corroding concrete in sewer systems. *Appl Environ Microbiol*, 73, pp. 971-980
- [23] Gutierrez-Padilla, M.; Bielefeldt, A.; Ovtchinnikov, S.; Hernandez, M.; Silverstein, J. (2010) Biogenic sulfuric acid attack on different types of commercially produced concrete sewer pipes. *Cement and Concrete Research* 40, 293-301.
- [24] Najafi, M. (2011) Pipeline rehabilitation for service life extension. In Karbhari VM & Lee LS (Eds.), *Service life estimation and extension of civil engineering structures*. Woodhead Publishing Limited Abington Hall, Cambridge, 262-289.
- [25] Pacheco-Torgal, F.; Jalali, S. (2011) A sustentabilidade dos materiais de construção. 2ª Edição TecMinho, 460 pág., Guimarães, Portugal.
- [26] Burtner, R.; Howard, A.; Sung, T.; Stahl, J. (2006) Rehabilitation of a large semi-elliptical sewer. *Water Environment Foundation. WEFTEC*.
- [27] Pacheco-Torgal, F.; Jalali, S. (2011) Toxicity of building materials. A key issue in sustainable construction. *International Journal of Sustainable Engineering*, Taylor & Francis Vol.4, 281-287.
- [28] Pacheco-Torgal, F.; Jalali, S.; Fucic, A. (2012) Toxicity of Building Materials. Woodhead Publishing Limited, 480p., Cambridge
- [29] Gourley JT, Johnson GB (2005) Developments in geopolymer precast concrete. In *Proc of Geopolymer 2005 World Congress*, 139-143, Geopolymer Green Chemistry and Sustainable Development Solutions, S. Quentin, France.
- [30] Pacheco-Torgal, F.; Gomes, J.; Jalali, S. (2010) Durability and environmental performance of alkali-activated tungsten mine waste mud mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering* Vol.22, 897-904.
- [31] Allouche, E.; Montes, C.; Diaz, E. (2007) A new generation of cementitious materials for mortar lining of buried pipes. *Pipelines 2007: Advances and Experiences with Trenchless Pipeline Projects - Proceedings of the ASCE International Conference on Pipeline Engineering and Construction*
- [32] Rüscher, C.; Lohaus, L.; Anders, A. (2007) Microbiologically influenced corrosion of geopolymers. <http://www.nm.zfm-hannover.de/projects/RuescherAndersLohaus/>
- [33] Montes, C.; Allouche, E. (2012) Evaluation of the potential of geopolymer mortar in the rehabilitation of buried infrastructure. *Structure and Infrastructure Engineering* 8, 89-98.