

00-00

→ Filão de 20 cm bem mineralizado em
volframite e salbanda micécea bem visível



↑ Pilha de gravilha
para betuminoso

← Área industrial
da Barroca Grande

AMBIENTE

MATERIAIS LIGANTES

“AMIGOS DO AMBIENTE”

OBTIDOS POR ACTIVAÇÃO ALCALINA DE LAMAS RESIDUAIS DAS MINAS DA PANASQUEIRA

OS LIGANTES OBTIDOS POR ACTIVAÇÃO ALCALINA, EMBORA CONHECIDOS POR PARTE DA COMUNIDADE CIENTÍFICA HÁ JÁ ALGUM TEMPO, NÃO CONSEGUIRAM ATÉ AO MOMENTO AFIRMAR-SE COMO UMA ALTERNATIVA AO CIMENTO *PORTLAND*, NOMEADAMENTE POR QUESTÕES DE CUSTO DE PRODUÇÃO E DE INCIPIENTE DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO. NÃO OBSTANTE, ESTES MATERIAIS TÊM VINDO A MERECEER UMA ATENÇÃO CRESCENTE, QUER DEVIDO ÀS NECESSIDADES DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES RESPONSÁVEIS PELO EFEITO DE ESTUFA, MAS TAMBÉM POR QUESTÕES DE OBTENÇÃO DE LIGANTES QUE TENHAM UMA DURABILIDADE SUPERIOR.

TEXTO F. PACHECO TORRAL, J.P. DE CASTRO GOMES, SAID JALALI

As preocupações da sociedade actual com a necessidade de um racional, saudável e consistente respeito pelo ambiente reflectem uma nova forma de encarar a realidade privilegiando a abordagem dos problemas numa vertente interdisciplinar, em contraponto à tradicional e obsoleta apreciação unidimensional. Nesse contexto, a ameaça da alteração do clima na Terra, responsável nas últimas décadas por inúmeras catástrofes naturais que resultaram em perdas de milhares de vidas e prejuízos económicos de biliões de dólares, é um dos grandes desafios ambientais a que a sociedade actual tem que fazer face. Para essa ameaça muito contribuem as emissões de gases responsáveis pelo aumento do efeito de estufa (GEE), para os quais a indústria cimenteira contribui com um valor significativo. Este artigo aborda alguns dos actuais condicionamentos ao desenvolvimento sustentável de Portugal, apresentando resultados de uma investigação sobre o desenvolvimento de materiais ligantes, responsáveis por baixas emissões de carbono e obtidos pelo reaproveitamento de lamas de minas.

DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

As preocupações ambientais da sociedade actual começaram a ganhar maior relevo após a realização da Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente, em 1972, na cidade de Estocolmo. Contudo, somente em 1987 adquiriram uma perspectiva mais incisiva, a partir da publicação do relatório “Our common future”, mais conhecido como relatório Brundtland, e onde pela primeira vez aparece consignada a expressão do desenvolvimento sustentável como aquele que “permite satisfazer as necessidades do presente sem comprometer as possibilidades das gerações futuras satisfazerem as suas”. Posteriormente, em 1992, na Conferência do Rio, em que estiveram presentes 176 países e 102 Chefes de Estado e de Governo, foram aprovadas por unanimidade a Declaração do Rio sobre o Ambiente e Desenvolvimento, a Declaração de Princípios sobre as Florestas e a Agenda 21, bem como a Convenção sobre as Alterações Climáticas e a Convenção sobre a Diversidade Biológica. Em

1993, a União Europeia desenvolveu o 5º Programa para o Ambiente e Desenvolvimento, no qual se estabelece a necessidade de uma maior abrangência das políticas do ambiente. Na sequência dos compromissos assumidos por Portugal no âmbito da Agenda 21, foi elaborado em 2002 um documento intitulado Estratégia Nacional para o Desenvolvimento Sustentável (ENDS) que, após actualização, abrange período 2005/2015. Este consiste num conjunto coordenado de actuações nas dimensões Económica, Social e Ambiental, permitindo “num horizonte de 12 anos assegurar um crescimento económico célere e vigoroso, uma maior coesão social e um elevado e crescente nível de protecção e valorização do ambiente”. Relativamente à dimensão ambiental, os condicionamentos ao desenvolvimento sustentável em Portugal, podem resumir-se simplificada e da seguinte forma:

- Ineficaz gestão de resíduos;
- Património natural e de biodiversidade em risco;
- Dependência energética excessiva;
- Deficiente gestão de recursos hídricos;
- Elevados níveis de emissões de GEE.

O PROBLEMA DOS RESÍDUOS

Os resíduos produzidos em Portugal podem subdividir-se em dois grandes grupos: os resíduos sólidos urbanos (RSU) e os resíduos industriais (RI). Os RSU representavam em 2000 aproximadamente 4,5 milhões de toneladas (Mt), enquanto que a última estimativa disponível sobre os RI apontava para um valor a rondar os 29,2 Mt. Por sua vez, os RI costumam subdividir-se em resíduos industriais banais (RIB), que constituem 99,1% do total, e os resíduos industriais perigosos (RIP) que representam a percentagem remanescente, 0,9%. Relativamente à tipologia, constata-se que predominam os resíduos de minas e pedreiras, constituindo quase 58% do total de RI (figura 1). Devido ao volume da sua produção, a reutilização de resíduos de minas e pedreiras merece indubitavelmente uma atenção particular da comunidade científica portuguesa.

A BIODIVERSIDADE

Para lá dos argumentos éticos ligados à importância do valor intrínseco de todas as espécies, independentemente dos benefícios imediatos que delas a espécie humana possa retirar, a biodiversidade é uma garantia de produção de recursos alimentares e de outros produtos, como vacinas, antibióticos ou outros medicamentos. Não se sabe ao certo quantas espécies existem no mundo, tendo já sido identificados cerca de 1,75 milhões de espécies segundo o relatório "Global Biodiversity Outlook", da Convenção da Biodiversidade. Contudo estima-se que este número seja muito superior, aproximando-se de 15 milhões. O actual ritmo de extinção no planeta é cerca de 100 vezes superior à média paleontológica. A União Mundial para a Conservação, refere cerca de 140 espécies ameaçadas em Portugal, sendo o país europeu com o maior número de espécies nesta situação. Para inverter esta tendência torna-se necessário afectar uma parte significativa do território a zonas de protecção. Em Portugal, as áreas protegidas representam 7,2% do território nacional (figura 2). A proposta para os sítios Natura 2000 (Directiva Aves e Directiva Habitats) aumenta em 14,1% a área afectada à conservação. Na hipótese destas áreas serem incluídas na lista final de sítios da Rede Natura 2000, Portugal terá 21,3% do seu território nacional classificado. Contudo, a Rede Natura 2000 representa não a maximização de áreas fundamentais para a conservação da natureza, mas antes uma tentativa de equilíbrio entre essas necessidades, as da produção agrícola e florestal e as áreas que a sociedade actual destina à expansão urbana. Alguns investigadores estimam que a área necessária para se reduzir de forma significativa o ritmo actual de extinção oscila entre 50/70% dos territórios nacionais. Atendendo a que mais de 75% do território nacional está englobado em apenas 1,4% do planeta, necessário para conservar 44% das plantas vasculares e 35% dos vertebrados a nível mundial, alguns investigadores^[1], estima-se que seja necessário 77% do território para que as espécies consideradas persistam com um grau de probabilidade de 0,9, mesmo descontando uma margem de erro que decorre dos métodos, da escala e da qualidade dos dados. Essa área representaria 10 vezes a área protegida actual e seria quatro vezes superior ao somatório das áreas protegidas com a Rede Natura (2000). Se a este panorama somarmos as necessidades de vastas áreas inutilizadas pela necessidade de deposição de resíduos de minas e pedreiras, compreende-se a premência da resolução deste problema.

OS GASES RESPONSÁVEIS PELO EFEITO DE ESTUFA

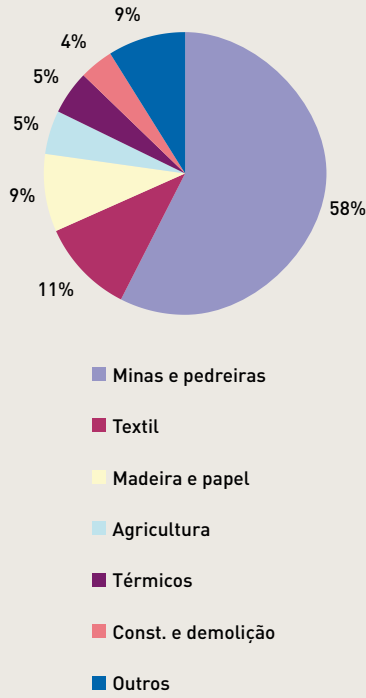
Relativamente às emissões de gases responsáveis pelo efeito de estufa (GEE), existem estudos que apontam para uma elevada similaridade entre a evolução da temperatura média da Terra e o aumento da concentração de CO₂ (figura 3). Note-se que no início do século XVIII, o nível de concentração de CO₂ era de 280 ppm, actualmente é de 430 ppm crescendo a um ritmo superior a 2ppm/ano, pelo que mantendo o nível de emissões actual (o que não é provável, atendendo ao rápido crescimento económico da China e da Índia, com os consequentes aumentos de taxas de emissões) isso implicará um nível de concentração de CO₂ de 550 ppm no ano 2050^[2]. Por esse motivo, em 1997 os países signatários do Protocolo de Quioto, assumiram o compromisso conjunto de reduzirem, até 2012, as suas emissões de gases responsáveis pelo aumento dos GEE em 5,2% relativamente ao nível de emissões no ano base de 1990. Pretendendo com isso estabilizar no ano 2012 os níveis de CO₂ para que a temperatura global média da Terra não excedesse 2°C acima dos níveis

pré-industriais. Outros autores referem no entanto a necessidade de reduções mínimas de 25% relativamente aos níveis actuais para conseguir essa estabilização. Nessa sequência, a Comunidade Europeia, estabeleceu como meta reduzir as suas emissões de GEE em oito%, cabendo a cada país diferentes metas individuais no âmbito do Acordo de Partilha de Responsabilidades (burden sharing agreement). Este compromisso obriga alguns países a reduzir substancialmente os seus níveis de emissões, enquanto outros podem mesmo aumentá-las, como é o caso de Portugal que pode apresentar em 2012 um nível de emissões de GEE 27% superior ao apresentado em 1990, o que representa o maior aumento percentual de todos os países da EU-15 (figura 4). Sendo o nível de emissões de CO₂ e (CO₂equivalente, que já inclui todos os GEE) em 1990 de 60 milhões de toneladas (Mt) anuais, a meta individual para Portugal, de emissões para o ano 2010, significa um tecto máximo de 76 Mt, contudo em 2001 o nível de emissões de CO₂e, já tinha atingido as 82 Mt, ou seja 36% acima do máximo permitido pelos compromissos assumidos (figura 5). De acordo com o Plano Nacional para as Alterações Climáticas, as previsões de evolução das emissões num cenário *Business As Usual* (BAU), isto é, sem medidas de redução resultaria num aumento entre 54 a 63% face ao ano de referência de 1990, ou seja, na necessidade de redução entre 16 a 21 Mt CO₂e para assegurar o cumprimento dos compromissos assumidos no âmbito da aplicação do Protocolo de Quioto. Para esse efeito Portugal conta poder recorrer a um conjunto de políticas de redução que incorporam um cenário designado de referência, bem como outras medidas adicionais e também ao Comércio Europeu de Licenças de emissões (CELE), aprovado pela Directiva nº 2003/87/CE, relativa à criação de um regime de comércio de licenças de emissão de GEE, que se insere nos mecanismos de flexibilidade previstos no Protocolo de Quioto e pretende ligar o mercado europeu de emissões às políticas de combate às alterações climáticas dos países em desenvolvimento. Trata-se do primeiro regime internacional de comércio de emissões de CO₂ do mundo, cobrindo cerca de 12 mil empresas que representam cerca de metade das emissões europeias de CO₂. Nessa sequência coube a cada país a responsabilidade da apresentação de um plano de atribuição de licenças de emissão de CO₂ para o período 2005-2007 (PNALE). Este programa, abrange 220 empresas responsáveis por 44% do total de emissões de CO₂ e previa uma distribuição de licenças gratuitas para o período 2005-2007 de 116,7 Mt, (38,9 Mt/ano). Em 9 de Março de 2005, as licenças de emissão de CO₂ estavam a transaccionar nos 10,7 euros por tonelada métrica, contudo é previsível que esse valor tenha tendência para subir no futuro, havendo inclusive alguns cenários que apontam para valores entre 23 a 38 euros por tonelada de CO₂. Cenários esses que não podem ser considerados irrealistas, já que os países desenvolvidos representando somente 20% da população mundial foram responsáveis em 1999 por 51% das emissões globais de CO₂. Em termos de emissões *per capita* os países da OCDE têm um valor de emissão de GEE de 11 ton/hab. que é seis vezes o valor médio das emissões dos países em desenvolvimento (figura 6). A forma de compatibilizar os objetivos ambientais a nível mundial com os direitos dos países em desenvolvimento passará sempre por reduções substanciais nos países desenvolvidos ou pela penalização financeira dessas emissões. Note-se que no PNALE o sector dos cimentos e cal representou 19% das emissões dos sectores considerados em 1999 o que compara desfavoravelmente com as emissões a nível mundial do sector cimenteiro, que gera anualmente 1600 Mt de CO₂, representando 7% das emissões globais^[3]. Com uma produção anual de

1. Tipologia dos resíduos industriais
2. Rede Nacional de Áreas Protegidas

3. Evolução do aumento de temperatura global média com o nível de concentração de CO₂ atmosférico
4. Metas de emissão de GEE para o ano 2012

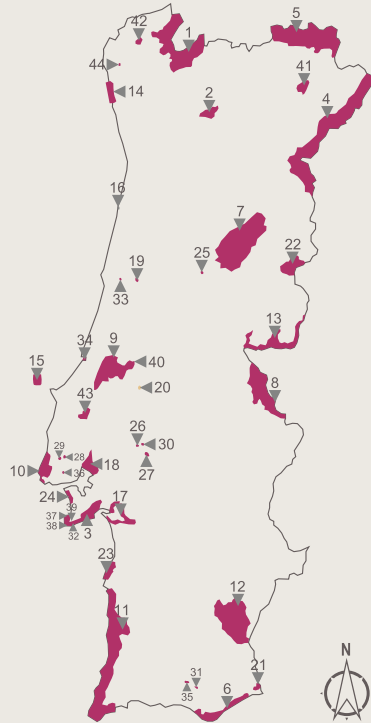
1.



2.

Rede Nacional de Áreas Protegidas

- A. Âmbito Nacional** - Parques Naturais, Reservas Naturais, Paisagens Protegidas, Sítios Classificados, Monumentos Naturais
B. Âmbito Regional - Paisagens Protegidas



A. ÂMBITO NACIONAL

PARQUE NACIONAL
1 Peneda - Gerês

PARQUES NATURAIS

- 2 Alvão
- 3 Arrábida
- 4 Douro Internacional
- 5 Montesinho
- 6 Ria Formosa
- 7 Serra da Estrela
- 8 Serra de S. Mamede
- 9 Serras de Aire e Candeeiros
- 10 Sintra - Cascais
- 11 SW Alentejano e C. Vicentina
- 12 Vale do Guadiana
- 13 Tejo Internacional
- 14 Litoral Norte

RESERVAS NATURAIS

- 15 Berlenga
- 16 Dunas de S. Jacinto
- 17 Estuário do Sado
- 18 Estuário do Tejo
- 19 Paul de Arzila
- 20 Paul do Boquilobo
- 21 S.C.Marim-V.R.S.António
- 22 Serra da Malcata
- 23 Lagoas de St. André e da Sancha

PAISAGENS PROTEGIDAS

- 24 Arriba Fóssil da C. da Caparica
- 25 Serra do Açor

SÍTIOS CLASSIFICADOS

- 26 Açude da Agolada
- 27 Açude do Monte da Barca
- 28 C. Lapiáz da Granja dos Serrões
- 29 C. de Lâpiáz de Negrals
- 30 Centro Hist. de Coruche
- 31 Fonte Benémola
- 32 Gruta do Zambujal
- 33 Montes de Santa Olaia e Ferrest
- 34 Monte de S. Bartolomeu
- 35 Rocha da Pena

MONUMENTOS NATURAIS

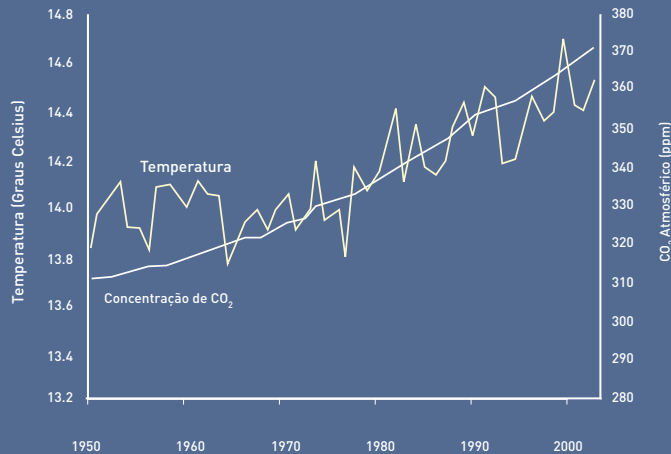
- 36 Carenque
- 37 Lagosteiros
- 38 Pedra da Mua
- 39 Pedreira do Avelino
- 40 Pégadas de Dinossaúrios de Ourém/Torres Novas

B. ÂMBITO REGIONAL

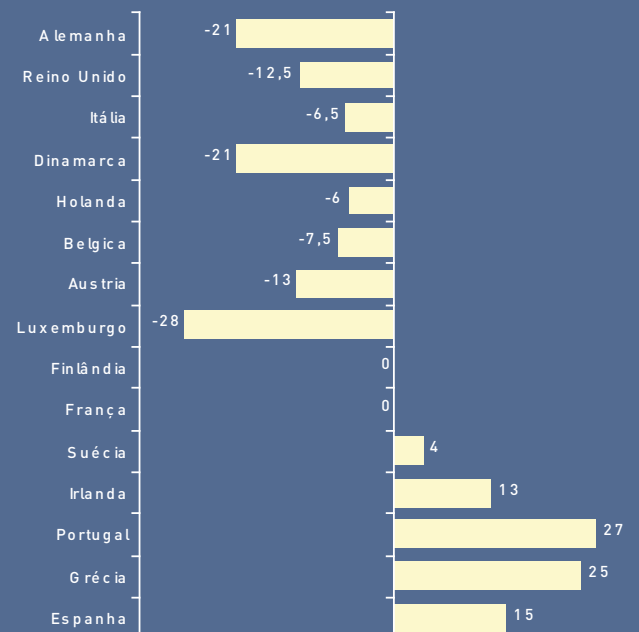
PAISAGENS PROTEGIDAS

- 41 Albufeira do Azibo
- 42 Corno do Bico
- 43 Serra de Montejunto
- 44 Lagoa de Bertândos e S.Pedro de Arcos

3.



4.



5. Evolução das emissões de CO₂e em Portugal relativamente à meta do protocolo de Quioto
6. Emissões de CO₂ per capita

7. Minas da Panasqueira.
8. Provetes cúbicos de argamassa AALRM após ensaio de resistência à compressão

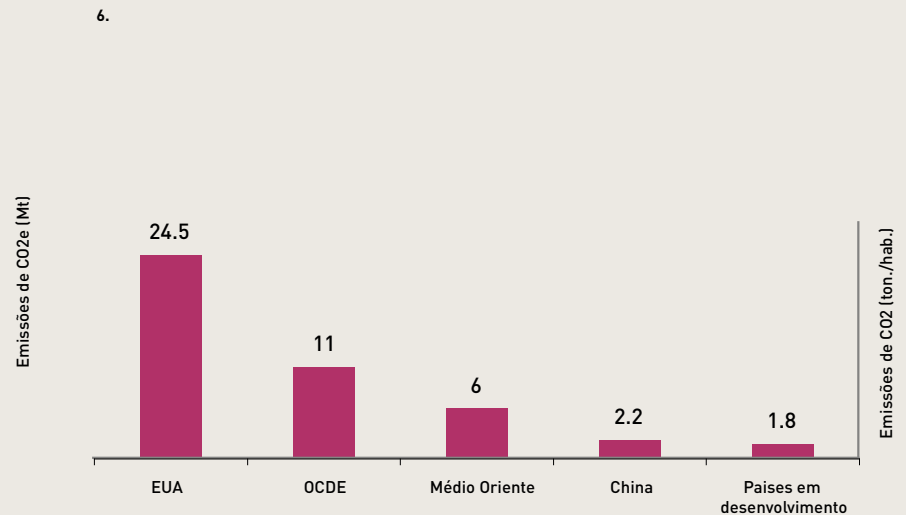
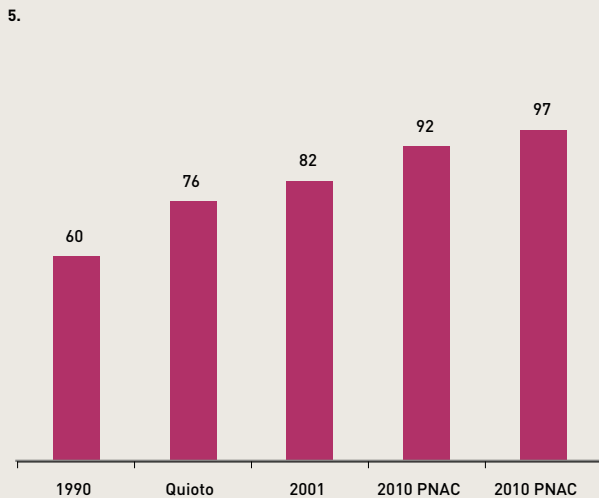


TABELA 1 – Resenha histórica sobre alguns acontecimentos importantes acerca de cimentos obtidos por activação alcalina e cimentos alcalinos [5]

AUTOR	ANO	DESCRIÇÃO
Feret	1939	Cimentos com escórias
Purdon	1940	Combinações alcalis-escórias
Glukhovsky	1959	Bases teóricas e desenvolvimento de cimentos alcalinos
Glukhovsky	1965	Primeiros cimentos alcalinos
Davidovits	1979	Termo "Geopolimero"
Malinowski	1979	Caracterização de aquedutos milenares
Forss	1983	Cimento tipo F (Escórias – alcalis – superplastificante)
Langton e Roy	1984	Caracterização de materiais em edifícios milenares
Davidovits e Sawyer	1985	Patente do cimento "Pyrament"
Krivenko	1986	Tese de Doutoramento, sistemas R20 - R0 - SiO ₂ - H ₂ O
Malolepsy e Petri	1986	Activação de escórias sintéticas
Malek. et al.	1986	Cimentos de escórias com resíduos radioactivos
Davidovits	1987	Comparação entre betões correntes e betões milenares
Deja and Malolepsy	1989	Resistência ao ataque de cloretos
Kaushal et al.	1989	Cura adiabática de ligantes alcalinos com resíduos nucleares
Roy and Langton	1989	Analogias dos betões milenares
Majundar et al.	1989	C12A7 – slag activation
Talling and Brandstetr	1989	Activação de escórias – C12A7
Wu et al.	1990	Activação alcalina de escórias
Roy et al.	1991	Presa rápida de cimentos activados alcalinamente
Roy and Silsbee	1992	Revisão sobre cimentos activados alcalinamente
Palomo and Glasser	1992	Metacaulino com CBC
Roy and Malek	1993	Cimento de escórias
Glukhovsky	1994	Betões milenares, modernos e futuros
Krivenko	1994	Cimentos alcalinos
Wang and Scrivener	1995	Microestrutura de escórias activadas alcalinamente

© BERALT TITIN & WOLFRAM (PORTUGAL), S.A.

7.



8.



aproximadamente 10 Mt, o que representa quase a mesma quantidade de emissões de CO₂ atendendo a que a produção de uma tonelada de *clinker* de cimento gera 0,55 toneladas de CO₂ de origem química a que se somam 0,39 toneladas de CO₂ em emissões devidas às necessidades energéticas do processo, num total de 0,94 toneladas de CO₂ o cimento *portland* constitui assim uma substancial fonte de emissões de GEE. Embora no fabrico de alguns cimentos se adicione uma percentagem de pedra calcária moída, para reduzir a quantidade de clínquer. Além disso, e como em Portugal só se produzem anualmente 0,25 Mt de cinzas volantes e 0,15 Mt de escórias de alto forno, não é sequer possível esperar conseguir substanciais reduções de emissões por via do fabrico de cimento com incorporação deste tipo de sub-produtos, como já acontece noutros países onde se utilizam níveis de substituição entre 25 e 65%. Desta forma é imperativo conseguirem-se definir estratégias que levem à redução das emissões de GEE, como por exemplo através do desenvolvimento de novos ligantes, com uma maior durabilidade e com um desempenho ambiental superior [4].

LIGANTES OBTIDOS POR ACTIVAÇÃO ALCALINA

Os ligantes obtidos por activação alcalina, embora conhecidos por parte da comunidade científica há já algum tempo (Tabela 1), não conseguiram até ao momento afirmar-se como uma alternativa ao cimento *portland*, por várias razões das quais merecem destaque: custos de produção superiores e um estágio incipiente de desenvolvimento tecnológico. Embora em algumas áreas já exista um nível de conhecimentos bastante relevante, noutras áreas ainda se encontra numa fase pouco desenvolvida, havendo aspectos tecnológicos cuja resolução torna evidente a necessidade de mais investigação. Estes materiais têm vindo a merecer uma atenção crescente, quer devido às necessidades de redução das emissões de GEE, quer também devido à necessidade de ligantes que tenham uma durabilidade superior à do cimento *portland*, cuja vida útil prevista era de 100 anos na década de 50, 75 anos na década de 70 e, actualmente, de 50 anos [6]. Sintetizados a partir de materiais aluminosilicatados com soluções altamente alcalinas, os ligantes obtidos por activação alcalina também por vezes designados por geopoliméricos, são conhecidos por serem responsáveis por um nível de emissões inferior ao do cimento *portland*, a que se deve somar ainda uma elevada capacidade de imobilização de metais pesados, o que confere a este tipo de ligante uma mais valia ambiental.

Apesar do que já se conhece sobre os ligantes obtidos por activação alcalina de materiais aluminosilicatados, este tipo de materiais constitui um domínio de investigação onde as questões por explicar são a regra e não a excepção. Por um lado, sabe-se que os materiais aluminosilicatados são mais reactivos após tratamento térmico, contudo este tipo de tratamento é específico para cada material, desconhecendo-se se materiais embora geologicamente semelhantes tenham o mesmo comportamento térmico se tiverem composições químicas diferentes ou se tiverem algum grau de contaminação. Por outro lado, diferentes materiais apresentam diferentes comportamentos de dissolução e endurecimento quando sujeitos a ataque por soluções alcalinas, pelo que este é um aspecto crucial em termos de investigação. Mesmo no que às soluções alcalinas diz respeito, diferentes tipos de soluções induzem diferentes reacções para um mesmo tipo de material. Assim, a activação alcalina de um tipo específico de material aluminosilicatado, merece pois ser alvo de um estudo específico quer sobre as condições da sua reactividade térmica, quer sobre qual a composição e concentração da solução de activação

que optimiza o desempenho do material endurecido [7]. Pode constatar-se já a existência de investigações em curso visando o reaproveitamento de resíduos industriais em ligantes activados alcalinamente, mas a investigação realizada até ao momento incide somente na activação alcalina de metacaulino. Contudo este material caracteriza-se por ter capacidades pozolânicas, apresentando por isso grandes potencialidades em termos do aumento da durabilidade dos betões correntes à base de cimento *portland* [8], por outro lado existem grandes quantidades de resíduos minerais aluminosilicatados que não tem qualquer capacidades pozolânica e que simultaneamente possuem elevados teores de metais alcalinos e ou sulfuretos, o que regulamentarmente os impede de ser utilizados sequer como adições nos betões correntes, pelo que somente a sua utilização como materiais de partida em termos de ligantes activados alcalinamente pode constituir uma alternativa para o seu reaproveitamento. Incluem-se neste grupo as lamas residuais das Minas da Panasqueira. Situadas próximo do parque natural da Serra da Estrela e junto à Paisagem protegida da Serra do Açor, ainda em actividade, este complexo mineiro gerou ao longo do século XX largas centenas de milhares de toneladas de lamas residuais, que se encontram depositadas em vários lagos de superfície considerável e com um impacto ambiental significativo (figura 7).

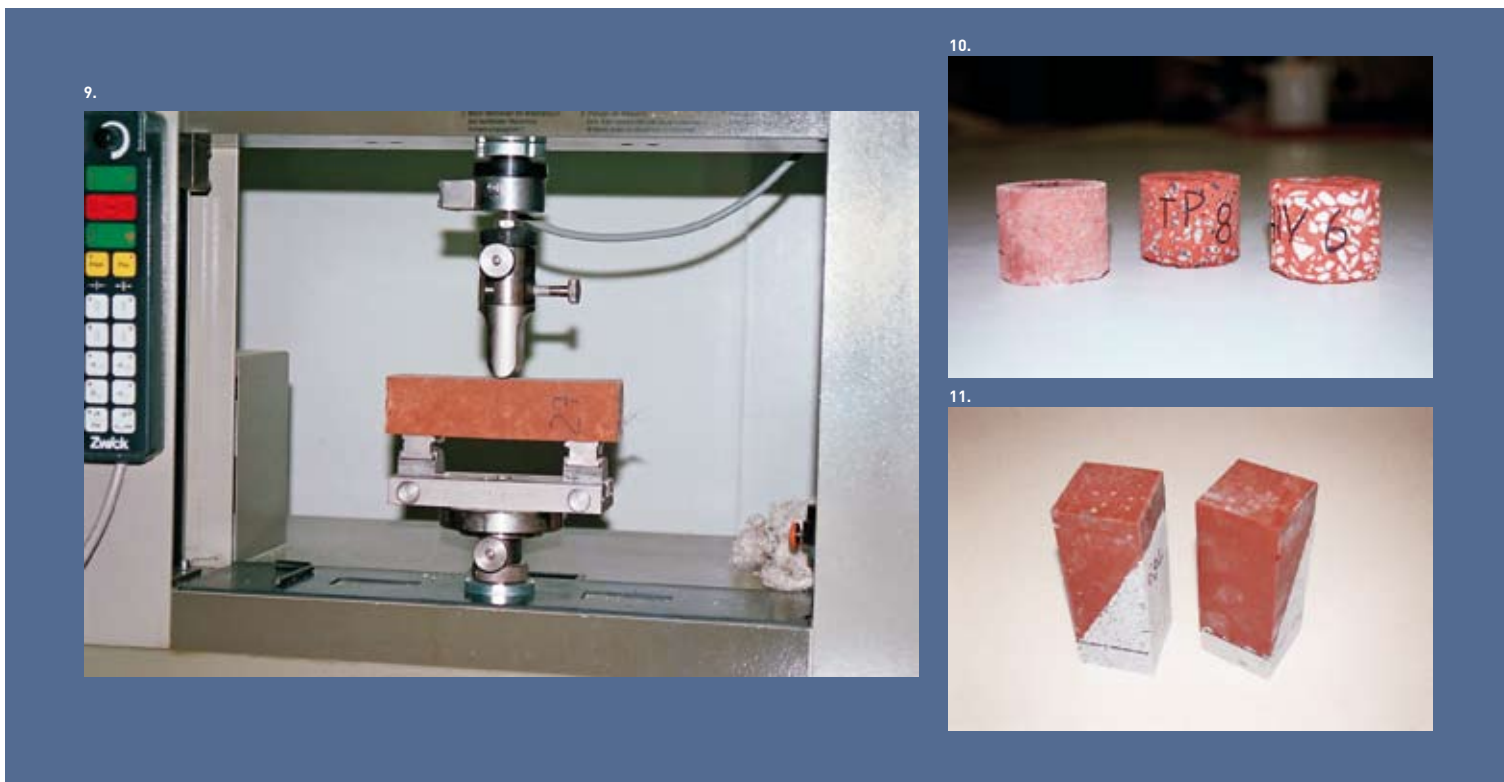
LIGANTES OBTIDOS A PARTIR DE LAMAS DAS MINAS DA PANASQUEIRA

É precisamente sobre esta temática que, entre Janeiro de 2003 e Janeiro de 2006, o primeiro autor desenvolveu trabalhos de Doutoramento na Universidade da Beira Interior, sob a orientação e co-orientação, respectivamente do segundo e do terceiro autor. A composição mineralógica das lamas deduzida a partir do estudo dos espectros de difracção de raio-X (XRD) consiste em muscovite e quartzo, identificados pelos seus espectros característicos. A composição química das lamas residuais obtida pelo recurso a um espectómetro de absorção atómica mostra que as lamas residuais consistem essencialmente em sílica e alumina, contaminadas por sulfuretos e arsénio, com elevados teores de ferro e de potássio. As lamas residuais foram alvo de tratamento térmico, com vista a obter um aumento da sua reactividade por via da sua desidroxilação estrutural. Os espectros de XRD indicam que não teve lugar uma destruição total da estrutura da muscovite. Medidas sobre a área dos picos indicam que cerca de 12% da estrutura da muscovite conseguiu resistir à temperatura de 950° C. As transformações moleculares durante o processo de desidroxilação foram analisadas através de espectroscopia de infravermelhos que confirmaram a ocorrência do processo de desidroxilação. Contudo, notou-se que não existia um alongamento total do pico referente aos hidroxilos, o que é indicativo de uma transformação parcial da estrutura da muscovite em concordância com os resultados obtidos no espectro de XRD e no ensaio DSC-TGA. O aumento da reactividade das lamas, após o tratamento térmico foi também avaliado com recurso a ensaios de compressão em argamassas activadas alcalinamente (AALRM), concluindo-se que o tratamento térmico das lamas permite um aumento da sua reactividade em termos de resistência à compressão de mais de 400%, comparativamente a argamassas com lamas não calcinadas para temperatura /tempo de 950° C /2 horas [9]. Os estudos sobre a influência da composição na resistência do novo ligante mostram que o activador alcalino mais indicado é constituído por uma mistura de hidróxido de sódio e silicato de sódio, numa razão mássica de 1:2,5 [10]. Sendo que a substituição de 10% de lamas por hidróxido de cálcio conduz a um rápido endurecimento do ligante, com maximização

9. Ensaio de resistência à flexão

10. Carotes cilíndricos para ensaio de absorção de água

11. Provetes de betão reparados com argamassa AALRM para ensaio de resistência ao corte



da resistência à compressão (figura 8). Foram observadas resistências à compressão superiores a 30 MPa ao fim de apenas um dia, atingindo valores de quase 70 MPa ao fim de 28 dias de cura e de 90 MPa aos 90 dias, bem como valores de resistência à flexão superiores a 10 MPa (figura 9). Constatou-se também que a natureza dos agregados condiciona a evolução da resistência [11]. Em termos de absorção de água (à pressão atmosférica) o ligante activado alcalinamente apresenta valores entre 2 a 3,4%, que são bastante inferiores aos valores de absorção dos betões tradicionais (Figura 10). Já quanto ao módulo de elasticidade, os valores observados variaram entre 29 e 34 GPa [12], não diferindo substancialmente dos valores usualmente obtidos em ligantes à base de cimento portland. Os ligantes AALRM caracterizam-se por apresentar uma boa resistência ao desgaste por abrasão (perda de massa máxima inferior a 25%) sendo que no mesmo ensaio os betões correntes à base de cimento portland apresentaram perdas de massa entre 40 a 60%. Os novos ligantes apresentam também uma resistência química relativamente elevada, sendo que a composição com o melhor desempenho apresenta perdas de massa após exposição aos ácidos (clorídrico, nítrico e sulfúrico) de 2,6%, enquanto que para os betões correntes essa média é mais do que o dobro desse valor. Os ligantes AALRM apresentam ainda uma excepcional aderência aos betões correntes, que é independente da rugosidade da superfície da ligação (figura 11), comparando muito favoravelmente com os produtos correntes de reparação de betão, com a vantagem adicional de apresentar um custo muito menor [13]. Quanto ao comportamento ambiental do novo ligante, a classificação da sua toxicidade revela que o material poderá em princípio ser considerado como inerte. Como desvantagens este tipo de ligantes costumam apresentar algumas eflorescências, além do que são pouco trabalháveis, mesmo após a

adição de superplastificantes, constituindo aspectos que devem ser objecto de investigação. O reaproveitamento pela indústria da construção civil das lamas residuais das Minas da Panasqueira, em ligantes obtidos por activação alcalina, permitirá assim num futuro próximo reduzir o impacto ambiental da sua deposição, reduzir o consumo de recursos não renováveis e reduzir simultaneamente o nível de emissões de GEE, associados aos ligantes correntes à base de cimento *portland*.

F. Pacheco Torgal é Engenheiro Civil, Mestre em Ciências da Construção pela FCTUC, Assistente no Instituto Politécnico de Castelo Branco

J.P. de Castro Gomes é Engenheiro Civil, Professor Associado na Universidade da Beira Interior

Saíd Jalali é Engenheiro Civil, Professor Associado com Agregação na Universidade do Minho

REFERÊNCIAS

- [1] MYERS, N. - Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403: 853-858 (2000).
- [2] STERN, N. - *Stars review on economics of climate change*. Cambridge University Press (2006)
- [3] MEHTA, P.K. - *Greening of the concrete industry for sustainable development*. *Concrete International* 21 (2002) 23-28.
- [4] SWAMY, R.N. - Sustainable concrete for infrastructure regeneration and reconstruction. *Sustainable construction into the Next Millennium environmentally friendly and innovative cement based materials*. In *Proceedings of the International Conference on Sustainable Construction into the next Millennium, Friendly and Innovative Cement Based Materials*. N.P. Barbosa and R.N. Swamy Editors Brazil (2000)
- [5] ROY, DELLA M. - Alkali-activated cements. *Opportunities and challenges*. *Cement and Concrete Research* 29 (1999) 249-254.
- [6] FLAGA, K. - *Advances in materials applied in civil engineering*. *Journal of Materials Processing Technology* 106 (2000) 173-183
- [7] TORRAL, F. M. ALVES S. P.; CASTRO GOMES, J. P.; JALALI, SAID - Alkali-activated binders: A review. *Part 2. About materials and binders manufacture*. *Construction and Building Materials* (in press, online em ScienceDirect.com)
- [8] OLIVEIRA, S.; JALALI, S.; FERNANDES, J.; TORRES, E. - L'Emploi de métagraissin dans la production de béton écologiquement efficace. *Materials and Structures*. RILEM. Vol.38: no. 277, pp. 403-410, 2005.
- [9] TORRAL, F. M. ALVES S. P.; CASTRO GOMES, J. P.; JALALI, SAID - Geopolymer Binder Using Tungsten Mine Waste In *Proceedings of Geopolymer 2005 World Congress*, pp.93-98. S. Quentin, France
- [10] TORRAL, F. M. ALVES S. P.; CASTRO GOMES, J. P.; JALALI, SAID - Effect of mixture composition on the early age strength of alkali-activated mine waste mud mortars. *Construction and Building Materials*. (acetate para publicação)
- [11] TORRAL, F. M. ALVES S. P.; CASTRO GOMES, J. P.; JALALI, SAID - Effect of aggregates on strength and microstructure of geopolymeric mine waste mud binders. *Cement and Concrete Research*. Elsevier Science Ltd (in press)
- [12] TORRAL, F. M. ALVES S. P.; CASTRO GOMES, J. P.; JALALI, SAID - Properties of tungsten mine waste geopolymeric binder. *Construction and Building Materials* (in press, online em ScienceDirect.com)
- [13] TORRAL, F. M. ALVES S. P.; CASTRO GOMES, J. P.; JALALI, SAID - Adhesion characterization of tungsten mine waste geopolymeric binder. *Influence of OPC concrete substrate surface treatment*. *Construction and Building Materials* (in press, online em ScienceDirect.com)