

SOLOS ESTABILIZADOS COM GEOPOLIMEROS PARA ESTRADAS DE BAIXO CUSTO

Nuno Cruz¹, Carin Mateus¹, Sara Rios², António Viana da Fonseca², Catarina Ramos², Carlos Rodrigues³, Javier Camacho-Tauta⁴,

¹ Direção de Coordenação Técnica Rodoviária da Mota-Engil – Engenharia e Construção, S.A. Rua do Rego Lameiro, 38, 4300-454 Porto, Portugal, carin.mateus@mota-engil.pt

² CONSTRUCT-GEO, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, R. Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal

³ Instituto Politécnico da Guarda, Av. Dr. Francisco Sá Carneiro, 50, 6300-559 Guarda, Portugal

⁴ Universidad Militar de Nueva Granada, Carrera 11 # 101-80 Edificio F, Bogotá D.C., Colômbia

Sumário

Com o presente projeto pretendeu-se estudar e desenvolver uma nova solução para tratamento de solos sem recorrer à tradicional utilização de cimento Portland ou cal aérea e incorporando resíduos inertes da queima de carvão em centrais termoelétricas. Para isso, aproveitam-se as reações químicas de ativação alcalina de cinzas volantes das quais resulta um gel cimentício que une as partículas de solo de modo semelhante a um tratamento com cimento Portland convencional mas com menor produção de dióxido de carbono. É uma solução inovadora que tem sido estudada noutras áreas de aplicação como no betão, mas que ainda não foi aplicada no tratamento de solos, onde os volumes envolvidos são muito mais significativos. Nesta comunicação relata-se os resultados de um projeto de investigação enquadrado num programa do QREN onde este tipo de tratamento, foi estudado para utilização em vias de baixo custo (low cost roads). O seu desenvolvimento decorreu em laboratório (Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia da FEUP, Laboratório de Geotecnia do IPG, e Laboratório Central da MOTA-ENGIL) e à escala quase real na câmara de calibração da MOTA-ENGIL e no equipamento de ensaios de fadiga da Universidade Militar Nueva Granada (UMNG, Bogotá). O projeto beneficiou ainda da realização de ensaios com o defletómetro de impacto portátil do LNEC, e de análises de microscopia realizadas na UTAD. Neste contexto serão apresentados os principais trabalhos realizados, interpretados os resultados obtidos com os quais se traça um conjunto de considerações relativamente à aplicação desta técnica.

Palavras-chave: geopolímeros; ensaios de compressão simples; análises químicas; câmara de calibração; ensaios de fadiga

1 INTRODUÇÃO

No presente artigo descreve-se sumariamente os principais resultados do projeto ECOSOLO no âmbito de um programa do QREN cujo objetivo consistia no estudo de uma nova solução para tratamento de solos com cimento geopolimérico destinada a estradas de baixo custo (*low-cost roads*), incorporando resíduos inertes da queima de carvão, nomeadamente cinzas volantes com baixo teor de cálcio. Este tipo de vias de comunicação tem particular incidência em África e na América Latina, regiões onde atualmente laboram bastantes empresas nacionais e onde a empresa promotora (MOTA-ENGIL) tem obras e interesses estratégicos de internacionalização, em especial em obras de estradas e linhas férreas.

A utilização desta técnica para tratamento de solos é completamente inovadora no domínio das obras viárias [1], não havendo por isso atualmente nenhuma empresa no mercado que disponibilize este tipo de tratamento para estradas de baixo custo. O tratamento consiste na ativação alcalina de cinzas volantes previamente misturadas com o solo, de cujas reações químicas resulta um gel cimentício que une as partículas de solo de modo semelhante a um tratamento com cimento Portland convencional, mas com menor produção de dióxido de carbono. A existência de uma solução alternativa mais económica e simultaneamente amiga do ambiente poderá traduzir-se em importantes benefícios dados os volumes envolvidos neste tipo de obras.

Com este enquadramento, a MOTA-ENGIL em conjunto com a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e o Instituto Politécnico da Guarda (IPG), submeteram um projeto para avaliar os principais benefícios mecânico-estruturais deste tipo de tratamento, prever a performance ao longo do tempo de vida útil, enquadrar ambientalmente a solução e despistar os principais problemas na sua aplicação à escala industrial. Para além dos copromotores do projeto participaram ainda, em regime de subcontratação, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), a Unidade de Microscopia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD) e a Universidad Militar Nueva Granada da Colômbia (UMNG), esta última com sistema de realização de ensaios de fadiga em macroescala.

Tendo em atenção estes objetivos, o programa experimental foi primeiramente desenvolvido em ambiente laboratorial e depois alargado a uma macroescala, mais próxima da execução industrial, mediante a utilização da câmara de calibração da MOTA-ENGIL e do equipamento da UMNG referido no parágrafo anterior. Para o efeito foi previamente selecionado um solo utilizado com frequência na construção de aterros na cidade de Bogotá (Colômbia) que apesar de ter características razoáveis, estas são insuficientes para cumprir com os critérios de utilização vigentes na Colômbia. Por outro lado este solo apresenta características físicas muito similares aos dos solos graníticos da cidade do Porto, o que permitiu a sua utilização nos ensaios em câmara de calibração realizados em Portugal. Com o solo colombiano foi efetuada uma caracterização prévia e foram realizados ensaios de compressão simples em várias misturas com diferentes percentagens de cinza e distintas concentrações do ativador alcalino, para seleção das duas formulações mais equilibradas em termos de custo/benefício. As misturas selecionadas foram então submetidas a um rigoroso e variado programa de ensaios, incidindo nos âmbitos microestrutural, mecânico e químico para condições de cura distintos (com recurso a uma câmara fitoclimática existente no IPG).

No entanto, a caracterização laboratorial não é suficiente para abranger as principais questões relacionadas com as condições de execução à escala da obra, que como se sabe tem uma influência preponderante no impacto económico associado e, por consequência, na aplicabilidade da solução. Em particular, no contexto deste estudo procurava-se também avaliar as dificuldades da execução e compactação da mistura em volumes mais significativos do que aqueles associados a pequenos provetes laboratoriais, o grau de homogeneidade passível de ser obtido, a evolução do comportamento ao longo do tempo em condições ambientais variáveis, a resistência à fadiga, e a adequabilidade dos ensaios *in situ* habitualmente utilizados no controlo de qualidade de obras viárias e ferroviárias. Neste contexto, a realização de “macro-provetes” na MOTA-ENGIL e UMNG, permitiu a análise desses fatores de macroescala, com o controlo das condições de execução e de cura idênticos aos implementados em laboratório, o que veio a constituir-se como uma fundamental ponte de ligação entre a escala (laboratorial) do estudo e a da sua aplicação industrial. De modo sumário, o esqueleto fundamental do projeto pode ser descrito do seguinte modo:

- a) Seleção e caracterização do solo colombiano para a experimentação laboratorial e de um solo equivalente para a experiência em câmara de calibração realizada em Portugal (MOTA-ENGIL);
- b) Estudos laboratoriais de formulação para seleção de misturas a estudar com nível de detalhe superior (Laboratórios da FEUP e MOTA-ENGIL);
- c) Caracterização laboratorial da evolução das propriedades mecânicas ao longo do tempo das misturas selecionadas e análise da influência das condições de cura nos comportamentos mecânico e hidráulico (resistência, erodibilidade e permeabilidade) dessas misturas (FEUP e IPG);
- d) Caracterização microestrutural (Microscopia Eletrónica da UTAD), caracterização química e caracterização mecânica em condições de cura controladas em câmara fito-climática (IPG)
- e) Avaliação da mistura tratada com recurso a ensaios *in situ* realizados em “macro-provetes”: câmara de calibração da MOTA-ENGIL e dispositivo *in situ* de ensaio de resistência à fadiga da UMNG

No presente artigo serão apresentados sumariamente os principais trabalhos realizados e a interpretação dos resultados obtidos, com os quais se traça um conjunto de considerações relativamente à aplicação desta técnica.

2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA EM LABORATÓRIO

2.1 Seleção de misturas

O solo colombiano foi recolhido na pedreira “El Cajón de Copérnico” a sul de Bogotá, na Soacha. A sua dimensão máxima é de 37,5 mm, pelo que para facilitar a sua utilização no laboratório o solo foi crivado no peneiro 3/8” (9,5 mm) antes de ser transportado para Portugal, para os laboratórios das instituições de consórcio. As principais características físicas desse solo são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1. Propriedades do solo estudado

Classificação Unificada	SM – areia siltosa
Limite de plasticidade (w_p)	NP
Limite de liquidez (w_L)	NP
Diâmetro efetivo médio (D_{50})	0,20 mm
Densidade das partículas sólidas (G)	2,68
Teor em finos (<0,074 mm)	27,9 %
Coefficiente de uniformidade (C_u)	200
Coefficiente de curvatura (C_c)	8,6
EA (%)	14
VBS (g/100gsolo)	0,37

No que diz respeito ao tratamento, este envolve a reação química de óxidos alumino-silicatados com polisilicatos alcalinos sustentados por ligações Si-O-Al [2], as quais podem ser obtidas através da utilização de materiais naturais (caulinite, micas, andaluzite entre outros) ou por produtos secundários como as cinzas de queima de carvão que foram utilizadas nesta experiência. Os ativadores alcalinos normalmente utilizados são baseados em sódio ou potássio [3]. No caso presente, foram constituídas misturas com varias percentagens de cinzas de baixo teor em cálcio, classificadas como F de acordo com a norma ASTM C 618 [4] fornecidas pela central termoelétrica do Pego. No Quadro 2 apresenta-se em paralelo a constituição química do solo e das cinzas, enquanto no Quadro 3 se apresentam as características de compactação associadas ao solo não tratado e às misturas com 10 e 20% de cinzas.

Quadro 2. Composição química dos componentes da mistura

Elemento	Si	Al	Fe	Ca	K	Ti	Mg	Na	S	Outros
Solo Natural	80,33	11,41	3,62	-	2,81	0,89	0,27	-	-	0,67
Cinza	54,84	19,46	10,73	4,68	4,26	1,40	1,79	1,65	0,70	0,50

Quadro 3. Ensaios de compactação do solo natural e após adição de cinzas

% cinza	Proctor Modificado		CBR a 95%	Expansão a 95%
	γ_{dmax}^* (kN/m ³)	w_{opt}^{**} (%)	(%)	(%)
0	8,6	20,13	59	0
10	8	19,92	29	1
20	8,8	19,53	22	1

* γ_{dmax} – peso volúmico seco máximo; ** w_{opt} – teor em humidade ótimo

Em seguida, procedeu-se à realização de ensaios triaxiais drenados de compressão convencional com instrumentação interna sobre provetes moldados para o ponto ótimo da respetiva curva de compactação Proctor (Quadro 2). Para cada uma das misturas (0%, 10% e 20% de cinzas) foram feitos 3 ensaios com tensões efetivas de confinamento de 50, 300 e 600 kPa, num total de 9 ensaios. A partir destes ensaios foram determinados os

parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb para o pico (ϕ' e c') e volume constante (ϕ'_{cv}) como se pode constatar no Quadro 4.

Quadro 4. Parâmetros de resistência obtidos dos ensaios triaxiais

Tipo de mistura	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ'_{cv} (°)
Solo sem cinzas	35,9	39,5	37,5
Solo + 10% cinzas	35,9	12,6	36,8
Solo + 20% cinzas	33,4	19,9	33,7

No sentido de avaliar quais as misturas que geravam melhores resultados, foram realizados ensaios de compressão simples com ciclos de descarga-recarga em misturas com duas percentagens de cinza diferentes (10% e 20%), quatro concentrações de hidróxido de sódio (5; 7,5; 10 e 12,5 molal) e, duas relações entre silicato de sódio e hidróxido de sódio (SS/SH= 0,5 e 1,0). Os resultados da resistência à compressão simples apresentam-se nas barras coloridas da Figura 1, em função do tipo de mistura.

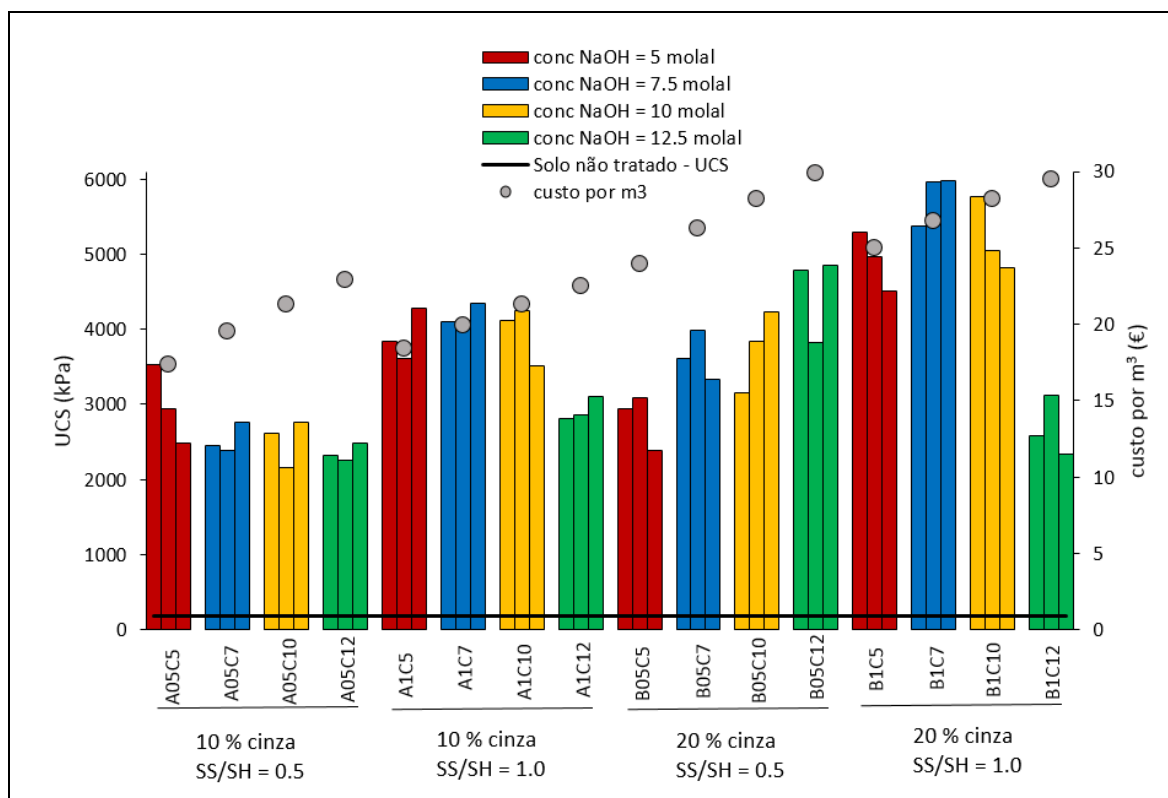


Fig.1. Resistência à compressão simples de cada uma das misturas estudadas

Da análise do custo (também na mesma figura) e da resistência de cada mistura foram selecionadas 2 misturas: A05C7 (10% de cinzas, SS/SH=0,5, e concentração de hidróxido de sódio de 7,5 molal) e A1C7 (10% de cinzas, SS/SH=1,0, e concentração de hidróxido de sódio de 7,5 molal) que apresentaram custo semelhante mas resistência muito diferente (cerca de 2500 kPa no caso do A05C7 e 4000 kPa no caso do A1C7).

2.2 Comportamento mecânico das misturas curadas em condições controladas

Nas misturas selecionadas foram efetuados diversos ensaios, nomeadamente ensaios CBR_e (embebidos a 4 dias) e CBR_i (imediatos), ensaios de compressão diametral, ensaios de compressão simples para diferentes tempos de cura, ensaios para determinação de velocidade de propagação das ondas sísmicas e ensaios de resistência ao desgaste. Em seguida apresentam-se de modo sumário os principais resultados obtidos.

Os resultados obtidos nos ensaios CBR são apresentados no Quadro 5, evidenciando no caso de CBR_e valores das misturas bastante inferiores aos valores do solo, provavelmente devido ao escasso tempo de cura decorrido e ao processo de imersão. No entanto, o ensaio CBR imediato (CBR_i) realizado após 28 dias de cura mostra claramente o aumento dos valores do CBR devido às reações de cimentação ocorridas durante a cura.

Quadro 5. Valores do CBR embebido (CBR_e) e imediato (CBR_i)

	CBR _e		CBR _i 55 pancadas		CBR _i 25 pancadas		CBR _i 12 pancadas	
% cinza	2.5mm	5.0mm	2.5mm	5.0mm	2.5mm	5.0mm	2.5mm	5.0mm
0	59%	61%	-	-	-	-	-	-
10	29%	31%	-	-	-	-	-	-
20	22%	23%	-	-	-	-	-	-
A05C7	31%	28%	112%	116%	64%	65%	37%	38%
A1C7	50%	51%	89%	94%	44%	47%	39%	37%

Por seu lado, os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples (UCS), realizados ao longo de 365 dias de cura evidenciam um incremento de resistência muito significativo, muito para além dos 28 dias de cura, habituais no caso das misturas de solo-cimento (Figura 2). No que se refere à resistência à tração (ITS) obtida nos ensaios de compressão diametral, esta evidencia valores entre 0,20 e 0,35 MPa (cerca de 7,5% da resistência à compressão simples) e enquadram-se dentro das normas e especificações existentes para solos tratados segundo a resistência à tração e módulo de deformabilidade, nomeadamente [5] e [6].

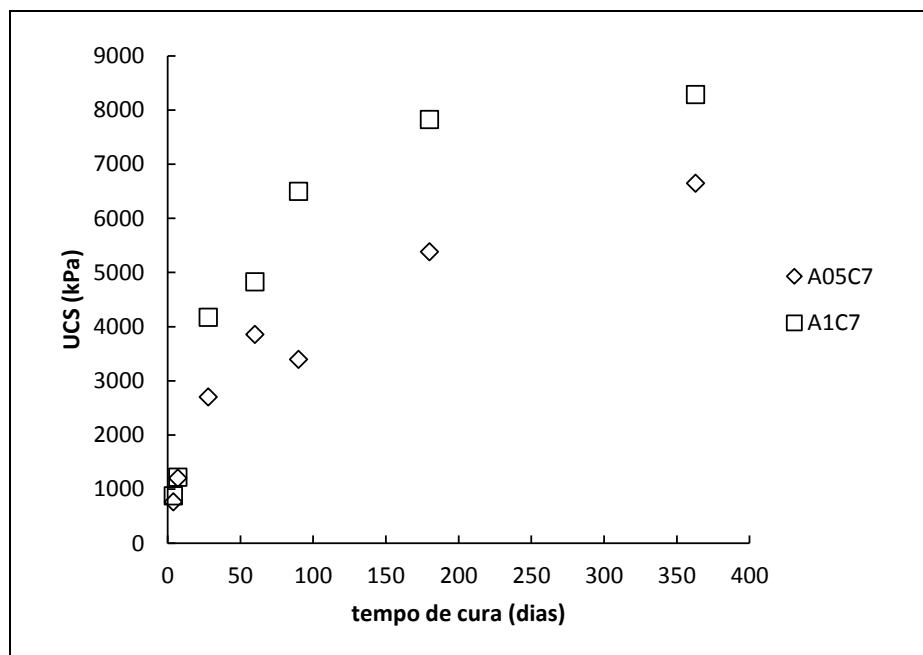


Fig.2. Resistência à compressão simples ao longo do tempo

Todos os provetes ensaiados foram alvo de medição da velocidade de propagação das ondas sísmicas durante o processo de cura para avaliação da rigidez elástica. Os resultados obtidos evidenciaram que a evolução da rigidez elástica com o tempo de cura tem um comportamento semelhante ao da resistência. Esta evolução clara da resistência e rigidez no tempo deve-se às fortes ligações cimentícias criadas pelo cimento geopolimérico observadas ao microscópio eletrónico como se exemplifica na Fig. 3.

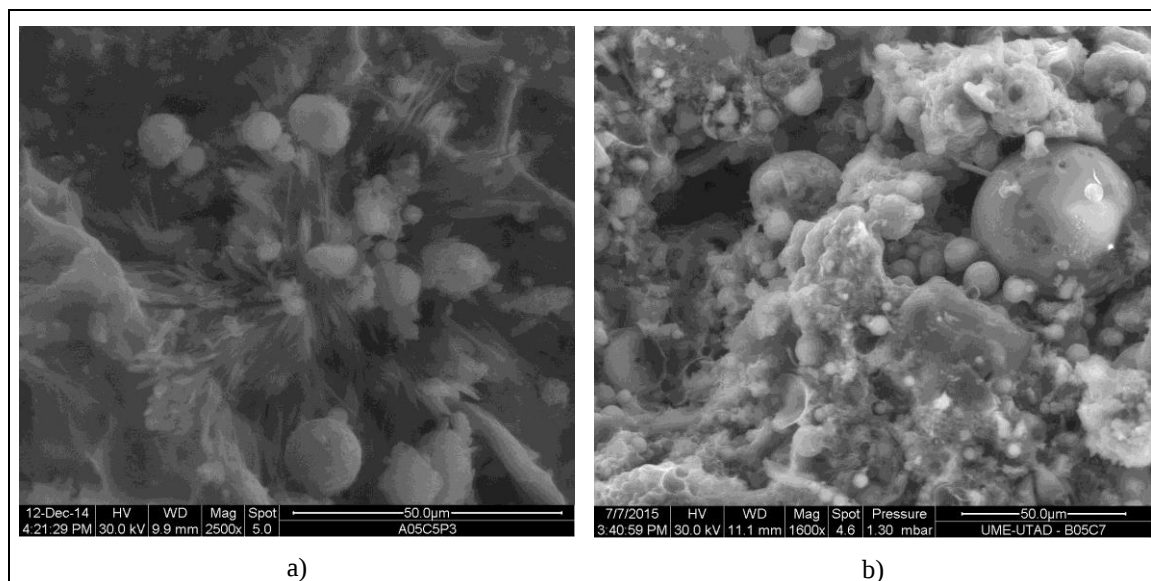


Fig. 3. Imagens SEM do solo tratado: a) mistura A05C5; b) mistura B05C7

Posteriormente, foram também realizados ensaios de resistência ao desgaste em ciclos de molhagem/secagem de acordo com a norma brasileira NBR – 13554 [7] similar à norma ASTM D559-96 [8]. Estes ensaios mostraram que a escovagem com escova de arame normalizada não exerceu uma degradação acelerada do provete dado que a perda de massa não foi significativa. Também se verificou que os ciclos de imersão não conduziram à absorção de água por parte da amostra ao contrário do que se verifica em provetes de solo-cimento para os quais a norma foi estabelecida.

2.3 Comportamento após cura sob condições ambientais da Colômbia

No sentido de avaliar a influência do clima de Bogotá na cura das misturas foram efetuados diversos ensaios sobre amostras curadas numa câmara fitoclimática. Os dados climatológicos foram fornecidos pela Universidade Militar Nueva Granada em Bogotá relativos à estação climatológica da Univ. AGROP-UDCA em Bogotá, cuja responsabilidade do registo é do IDEAM - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES da Colômbia. Os dados existentes referem-se a um período de 23 anos, ocorrido entre 1989 e 2012 e dele constam os valores médios mensais, entre outros, da humidade relativa e da temperatura. Assim, a câmara fitoclimática foi programada para simular em cada 12 horas as condições mensais de temperatura mínima (12,6°C) e humidade máxima (95%) e nas restantes 12h as condições mensais de temperatura máxima (15,2°C) e humidade mínima (71%).

Tanto os resultados da resistência à compressão simples, como a velocidade de propagação das ondas sísmicas (em especial das ondas S mais representativas da rigidez distorcional do material) mostram claramente uma redução significativa da resistência e rigidez dos provetes curados na câmara fitoclimática em comparação com os resultados obtidos na FEUP (Figura 4). As condições de temperatura e de humidade reproduzidas na câmara fitoclimática, quando comparadas com as presentes no processo de cura da FEUP (temperatura de 25,2° C e humidade de 95%), terão influenciado as condições de hidratação dos ligantes, enfraquecendo as ligações químicas que se desenvolveram durante a cura.

Por seu lado, os ensaios de permeabilidade realizados nos provetes curados na câmara fitoclimática revelaram valores de coeficiente de permeabilidade (k) relativamente baixos da ordem de 10^{-8} a 10^{-7} m/s, que tendem a aumentar com o tempo de cura, o que se explica pela formação de aglomerados de partículas cimentadas criando vazios de maiores dimensões por onde a passagem da água é favorecida.

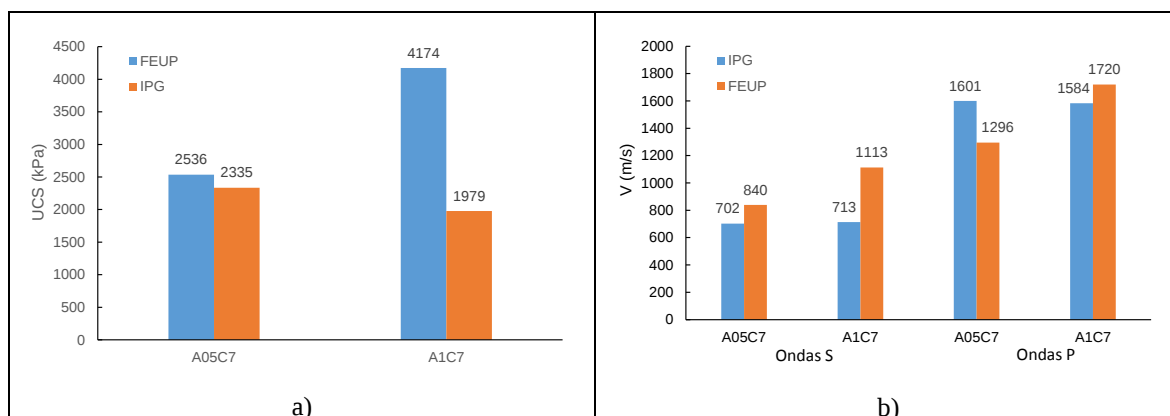


Fig.4. Comparação entre os resultados obtidos no IPG e na FEUP com condições de cura diferentes: a) resistência à compressão simples, b) velocidade de propagação das ondas P e S

2.4 Análises químicas

Todos os elementos constituintes das misturas (solo, cinza, silicato de sódio e hidróxido de sódio), as misturas de solo tratado, bem como a água recolhida nos ensaios de permeabilidade foram submetidos a análises químicas para avaliação da concentração de cátions em solução constituída por digestão das várias amostras e análise através de técnicas espectroscópicas, designadamente: espectrofotometria de absorção atômica de chama (FAAS) e espectrofotometria de absorção atômica em forno de grafite (GFAAS). No Quadro 6 apresenta-se uma sumula dos resultados. Por questões de otimização de espaço, nesse quadro inscrevem-se apenas os resultados, que se situam acima dos valores de referência do decreto-lei mencionado.

Quadro 6. Resultados das análises químicas às águas recolhidas nos ensaios de permeabilidade (mg/l)

	DL 236/98 VMR	Água circulação	A05C12- 28d	A05C12- 90d	A05C7- 28d	A05C7- 60d	A1C7-28d	A1C7- 60d
	mg/l							
K	12	0,4	134	53	50	39,1	25	22
Na	150	6,5	42308	8891	11604	20468	15925	11161
Cu	0,0001	0,0000001	4,7	0,4	1,2	0,6	1,6	0,3
Fe	0,0002	0,000017	1	0,000041	2	0,7	0,00014	0,00054
Zn	0,000005	0,2	12	0,2	1,2	0,3	0,3	0,2
Mn	0,00005	0,000002	0,00009	0,00002	0,00007	0,1	0,00003	0,00003
Cr	0,05	0,000004	5	2,6	1,7	0,18	1,7	1,9
Ni	0,00005	0,2	0,4	0,2	0,3	0,4	0,2	0,1
Pb	0,00005	0,000001	0,7	0,3	0,4	0,6	0,4	0,2
Al	0,2	0	310	16	293	1,3	1416	1,3
Si	30	0	6974	48	2132	39,7	8,1	730
pH (H ₂ O)	9,5	7,5	12,9	11,4	12,8	11,9	11,9	11,8
Cond. (μS/cm)	0,0004	0,0017	3740	695	1047	51	705	666

As análises químicas efetuadas aos solos revelam a ocorrência de valores elevados de alguns elementos, sobretudo Na, Cr, Al e Si, tanto nas amostras dos solos após período de cura como das águas percoladas

recolhidas nos ensaios de permeabilidade. Contudo a maior preocupação relaciona-se com a forte percolação de lixiviados observada nos ensaios de permeabilidade. De facto a comparação entre os valores máximos admissíveis em águas para consumo humano, constantes do DL nº 236/98 [9], e os valores medidos nas águas de percolação nas várias amostras permitem verificar a existência de valores relativos aos parâmetros físico-químicos não permitidos.

3 ENSAIOS EM “MACRO-PROVETES”

No decurso do trabalho foram implementadas duas experiências em câmaras de calibração de grandes dimensões, uma desenvolvida pela Geotecnia da MOTA-ENGIL num projeto anterior e outra desenvolvida na Universidad Militar Nueva Granada para a execução de ensaios de fadiga. A grande vantagem de trabalhar com câmaras de calibração como aquelas utilizadas nesta experiência, é ser possível ensaiar um “fragmento” de terreno, com escala para ser representativo das condições *in situ*, permitir a utilização dos ensaios de controlo habitualmente utilizados e garantir um controlo de condições de execução semelhantes às aplicadas em laboratório.

A câmara de calibração da MOTA-ENGIL é constituída por um contentor adaptado que dispõe de duas células (2,0 x 2,0 x 2,0 m³) divididas por um separador central amovível de modo a poder trabalhar em separado ou em conjunto. Com este equipamento procurou reproduzir-se a experiência laboratorial a uma macro-escala, sobre o qual se realizaram os ensaios de referência habitualmente utilizados no acompanhamento geotécnico de obras de terra. O modelo realizado pode descrever-se como um bloco de 4 x 2 x 1.1 m³, constituído por 3 camadas de solo não tratado de 0,30 m, compactadas com o teor em água natural, subjacentes a uma camada de 0,20m de espessura, constituída por uma mistura solo+20% cinzas ativadas pela solução alcalina. Após a regularização e compactação de cada uma das camadas foram realizados ensaios de caracterização e controlo de compactação. Idêntico conjunto de ensaios foi também realizado na camada tratada imediatamente após compactação, aos 28 dias e depois aos 29 dias após a rega abundante. Em cada situação, foram realizados 8 ensaios com gamadensímetro [10], 4 ensaios com defletómetro de impacto portátil [11] e 1 ensaio de carga com placa [12]. A experiência revelou-se de enorme utilidade tanto na calibração dos resultados obtidos em laboratório como na aferição das condições para uma aplicação eficiente do tratamento. Pormenores mais detalhados desta experiência são tratados numa outra comunicação submetida a esta conferência.

Em termos de resultados a experiência realizada permitiu extrair um conjunto de conclusões de importância determinante na aplicação da solução, conforme em seguida se descreve. Ao nível da execução, o fator de maior dificuldade será a necessidade de estabelecer regras apertadas no manuseamento dos produtos químicos, obrigando a equipamento especial de proteção de pele e respiratório dos trabalhadores envolvidos, bem como do isolamento da zona de obra, sobretudo em meios urbanos. No que se refere à preparação, espalhamento e compactação da mistura, estas actividades evidenciam complexidade e tempos de execução semelhantes aos processos de tratamento de solos com cal e/ou cimento. Por seu turno, sob o ponto de vista da eficiência da solução, os aspectos mais importantes revelados no decurso da atividade experimental estão relacionados com a evolução da resistência a taxa mais modesta do que o programa laboratorial permitia antever e com a existência de uma quebra acentuada dos módulos de deformabilidade após um período de rega abundante aos 28 dias de cura. Essa quebra é assinalada nos ensaios com defletómetro de impacto ligeiro e de carga com placa, e o módulo varia globalmente entre 50 a 80% do valor aos 28 dias, com a maior variação a corresponder aos ensaios de carga em placa.

No que se refere aos ensaios na UNMG, foi montada uma faixa de solo tratado e uma faixa de solo não tratado sujeitos a solicitações do mesmo tipo promovidas pelo equipamento ilustrado na Figura 5. No entanto, os resultados obtidos em ambas as faixas foram idênticos o que fica a dever-se tanto às temperaturas baixas ocorridas durante toda a experiência como à chuva constante que acompanhou o período de preparação, o que converge para as conclusões retiradas das experiências laboratoriais e com a câmara de calibração da MOTA-ENGIL.



Fig.5. Realização dos ensaios de fadiga na UMNG

4 CONCLUSÕES

Com o presente projeto pretendeu-se estudar e desenvolver uma nova solução para tratamento de solos sem recorrer à tradicional utilização de cimento Portland ou cal aérea e incorporando resíduos inertes da queima de carvão em centrais termoelétricas para aplicar em estradas de baixo custo, nomeadamente em África e América Latina, onde este tipo de estradas representam uma parte significativa das redes viárias nacionais. A utilização desta técnica para tratamento de solos é completamente inovadora no domínio das obras viárias, pelo que não um bibliografia de referência relativamente ao assunto.

Com a experiência realizada pretendeu-se avaliar os ganhos de resistência e rigidez dos solos tratados por comparação com o seu comportamento mecânico sem qualquer tipo de tratamento, prever a performance ao longo do tempo de vida útil, enquadrar ambientalmente a solução e despistar os principais problemas na sua aplicação à escala industrial. Sob este ponto de vista, os resultados do projeto mostram que o tratamento do solo com os geopolímeros aumenta a resistência e a rigidez do solo, e que o crescimento se prolonga durante bastante tempo, ao contrário do que se verifica no solos cimentados com cimento Portland que tendem a estabilizar aos 28 dias de cura. Este facto não é de todo prejudicial uma vez que se demonstrou que a resistência a curto prazo é significativa, com certas misturas a atingirem 1 MPa de resistência aos 5 dias de cura.

Apesar destes bons resultados em laboratório para condições de temperatura e humidade amenas (25°C, 95%), o estudo revelou que a aplicação desta técnica se encontra claramente limitada por dois fatores de grande impacto, cuja mitigação implicará a realização de programas de investigação complementares. O primeiro relaciona-se com o efeito de embebição do solo tratado, resultante da pluviosidade durante e após a cura, o segundo refere-se à pegada (poluente) ambiental deixada pelos elementos químicos que constituem as cinzas e o ativador alcalino e se transferem para os solos e águas freáticas. Com efeito, as misturas seleccionadas no início deste trabalho revelaram perda de resistência e rigidez quando curadas na câmara climática a temperatura mais baixa do que a temperatura ambiente do laboratório da FEUP, mostrando que o processo de cura influenciou claramente as reações de geopolimerização. Estes aspetos foram reforçados pelas duas experiências à escala real realizadas nas instalações da MOTA-ENGIL e na Universidade Militar Nueva Granada, com maior incidência neste último. Na verdade, a temperatura manteve-se baixa durante toda a experiência e choveu durante quase todo o período de preparação e ensaio pelo que a camada de solo tratado não conseguiu curar apresentando resultados similares às da camada de solo não tratado. Por outro lado, os ensaios químicos realizados acabaram por revelar uma pegada ambiental que no imediato coloca em causa a sua aplicação a uma escala industrial, nomeadamente no que se refere ao controlo de percolação de lixiviados agressivos para os solos e, sobretudo para as águas. Finalmente, para além do rigoroso controlo de segurança, aquando da execução devido ao manuseamento de produtos químicos agressivos, os trabalhos de preparação, homogeneização e compactação serão semelhantes àqueles observados nos tratamentos com cal e/ou cimento.

Em termos de desenvolvimentos a jusante desta experiência, podem sugerir-se alguns estudos complementares que visam ultrapassar os problemas encontrados no presente trabalho experimental, designadamente a aplicação do tratamento em argilas cuja permeabilidade reduzida pode minimizar o problema dos lixiviados, a avaliação da evolução da concentração do lixiviado no tempo, a utilização de outras concentrações de cinza que permitam acelerar os processos de cura mesmo em ambientes de temperaturas mais reduzidas e a utilização de outros ativadores (p.ex. aluminato de sódio), e de outras fontes de aluminossilicatos para além das cinzas utilizadas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito do projecto ECOSOLO (FCOMP-01-0202-FEDER-038899), financiado pelo Fundo Europeu para o Desenvolvimento Regional (FEDER), através do programa operacional para Factores de Competitividade (POFC) do Quadro de Referência Estratégico Nacional (QREN), no contexto do sistema de incentivos para investigação e desenvolvimento tecnológico. Os autores querem ainda agradecer à companhia Pegop – Energia Eléctrica SA, que explora a Central termo-electrica do Pego, pelo fornecimento e transporte das cinzas utilizadas na experiência, e ao MCTES/FCT (Fundação Portuguesa de Ciência e Tecnologia do ministério da Ciência e Tecnologia da Republica Portuguesa) pelo seu apoio financeiro através da bolsa SFRH/BPD/85863/2012, co-financiada pelo Fundo Social Europeu (POCH). Finalmente, os autores agradecem ainda à Divisão de Investigação da Universidade Militar Nueva Granada através do projeto IMP-ING-2131.

REFERÊNCIAS

1. Rios, S., Cristelo, C., Viana da Fonseca, A., Ferreira, C. (2015). Structural Performance of Alkali Activated Soil-Ash versus Soil-Cement. *Journal of Materials in Civil Engineering* DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001398.
2. van Jaarsveld, J. G. S., J. S. J. van Deventer and G. C. Lukey (2002). "The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers." *Chemical Engineering Journal* 89(1–3): 63-73.
3. Wallah, S.E. and Rangan, B.V. (2006). Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties. Research report GC2. Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia
4. ASTM C 618 (2015). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. Vol. 04.02. United States
5. CEN (2006). EN 14227-10 - *Mélanges Traités Aux Liants Hydrauliques - Spécifications - Partie10: Sol Traité Au Ciment*. Comité Européen de Normalisation, Brussels
6. LCPC (2000). *Guide technique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC/SETRA).
7. NBR 13554:2012. *Solo-cimento – ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – Método de ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas
8. ASTM D 559 (1996). Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures. Vol. 04.08, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org
9. Decreto – Lei n.º 236/98. DR 176/98 SÉRIE I-A de 1 de Agosto de 1998. MINISTÉRIO DO AMBIENTE
10. ASTM D 6938 (2015). *Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depths)*. Vol. 04.09. United States
11. ASTM E 2583 (2011). *Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD)*. Vol. 04.03. United States
12. AFNOR NF P 94-117-1 (2000). Part 1, *Plate test static deformation module (EV2)*. Association Française de Normalisation, Paris La Défense