

EVOLUÇÃO NO TEMPO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS MELHORADOS COM CAL AÉREA

Evolution with time of the mechanical behaviour of soils stabilized with lime

António Viana da Fonseca*

Eduardo Castro Neves**

RESUMO – Neste trabalho resumem-se os resultados obtidos num de três solos, que fizeram parte de um estudo laboratorial mais alargado realizado sobre manchas de empréstimo distintas em Portugal Continental e que se encontram frequentemente nas obras geotécnicas realizadas no país, designadamente na construção de aterros. Sobre estes solos foi realizada uma caracterização física e química inicial e, posteriormente, os mesmos foram submetidos a uma estabilização com três teores 1,5; 2,5 e 4% de cal viva (óxido de cálcio). Com a finalidade de avaliar as modificações imediatas foram realizados ensaios de caracterização - análises granulométricas, determinação de limites de Atterberg, azul de metileno, equivalente de areia e densidade das partículas -, ensaios de compactação Proctor e CBR. Neste artigo, serão especialmente enfocados os resultados relevantes de ensaios triaxiais com amostras dos solos naturais e de solo estabilizado, com cura a 7 dias e mais de 1 ano, tanto na vertente da resposta mecânica como hidráulica. O efeito do tempo na cimentação pelas benéficas reacções pozolânicas será aqui debatido, sendo enquadrado com a tendência de crescimento de resistência obtida em ensaios de compressão simples, realizados a vários e crescentes tempos de cura.

SYNOPSIS – This paper summarizes the results obtained in tests for characterization of one of a set of three soils investigated in the context of a larger laboratory study conducted on soil materials from the Portuguese territory, frequently employed in geotechnical works for transportation infrastructures, particularly in the construction of embankments. An initial physical and chemical characterization on the natural soil material was conducted, followed by a similar study on the soil stabilized with three lime contents (1.5, 2.5 and 4% of calcium oxide). In order to assess the immediate change of properties of the mixtures, the following characterization tests were performed: particle size analysis, determination of Atterberg limits, methylene blue and sand equivalent values, and particle density, as well as Proctor compaction tests and CBR. This article will focus especially on the relevant results obtained in triaxial tests on samples of the natural soil and the referred mixtures stabilized with curing times of 7 days and 1 year, both in terms of mechanical and hydraulic response. The effect of time in cementation due to beneficial pozzolanic reactions will be discussed here and associated with the gain in resistance obtained in axial compression test, conducted with increasing curing times.

PALAVRAS CHAVE – Solo-cal, reacções pozolânicas, compressão uniaxial e diametral, ensaios triaxiais.

1 – INTRODUÇÃO

A utilização da cal no melhoramento das propriedades dos solos é uma das técnicas mais antigas usadas na construção de obras rodoviárias e ferroviárias.

As obras de infraestruturas de transporte rodó e ferroviário, são particularmente exigentes no que diz respeito às propriedades mecânicas dos solos. Quando estes solos não têm potencial por si

* Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, E – mail: viana@fe.up.pt

** Laboratório de Geotecnia do CICCOPN, Maia, Portugal, E – mail: eduardo.neves@ciccopn.pt

só para as atingir, particularmente em zonas mais nobres, a utilização da cal no melhoramento dessas propriedades, traz grandes benefícios, tanto em trabalhabilidade como no comportamento hidráulico e mecânico a longo prazo. Para além das grandes vantagens técnicas, esta solução apresenta grandes benefícios ambientais e económicos. De facto, sendo a estabilização com cal um método onde se dão reacções predominantemente químicas entre os constituintes mineralógicos do solo e da cal, como sejam a permuta iónica, a floculação, a reacção de cimentação e de carbonatação, elas não se desenvolvem em simultâneo. Iniciando-se pela permuta iónica e floculação que são responsáveis pela alteração de algumas características físicas como o teor em água, granulometria, plasticidade, compactação e resistência imediata, tendo reflexo na trabalhabilidade e, por isso, na boa gestão do estaleiro em obras de aterro, seguem-se as acções de cimentação, fruto da reacção pozolânica que se desenvolvem a longo prazo, sendo responsáveis pela evolução favorável da rigidez, da resistência e da permeabilidade (LCPC-SETRA, 2000).

Este artigo tem por base uma extensa caracterização laboratorial, integrada num programa de investigação mais alargado no âmbito de um protocolo estabelecido entre o Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto (FEUP) e a LUSICAL Companhia Lusitana de Cal, S.A, onde se avaliou a evolução das propriedades físicas e mecânicas de alguns solos portugueses de acordo com o seu teor em cal.

O enfoque principal desta comunicação será o de apresentar o ganho das propriedades mecânicas destas misturas no tempo, sendo para tal apresentados os resultados de um dos materiais estudados em triaxial de grande precisão e com utilização subsidiária de transdutores de ondas sísmicas para esse efeito.

2 – MATERIAIS UTILIZADOS

2.1 – Características dos solos estudados

Três tipos de solos distintos foram recolhidos em Portugal Continental, em regiões distintas do território (Castro Neves, 2009, e Castro Neves *et al.*, 2010), e seleccionados criteriosamente para que representassem uma representativa amostragem de solos portugueses que se encontram frequentemente nas obras geotécnicas realizadas no país, designadamente na construção de aterros. Os solos recolhidos no sul do país, da zona de Alter do Chão (S100), são residuais de granito e gnáisse, de granitos alcalinos porfiróides, de grão grosseiro e de grão fino. Os solos da zona da Barosa, Leiria, no centro do país (S200) são formações detríticas, de arenitos argilo-siltosos, grosseiros, castanhos a avermelhados. Finalmente, o solo recolhido na capital, Lisboa, referenciado por “S300 - Solo do Aeroporto”, evidencia a presença de aterros heterogêneos de espessura variável, constituídos por solos areno-argilosos, podendo atingir valores superiores a 15,0m, que assentam sobre formações miocénicas granulares e por calcários gresosos.

Os ensaios laboratoriais de caracterização física e química destes solos tiveram como objectivo avaliar a potencialidade do solo ao tipo de tratamento. No Quadro 1 apresenta-se um resumo das principais características físicas, químicas e mecânicas obtidas. Os solos estudados enquadram-se dentro dos grupos das areias siltosas a areias argilosas, bem graduadas, com percentagens entre 14 e 45% de passados no peneiro 0,075 mm de abertura, de média a baixa plasticidade. Apresentam percentagens inferiores a 1% de matéria orgânica, sulfatos, cloretos e o valor de pH varia entre 5,4 e 8,5. A sua constituição tem uma elevada percentagem de sílica e alumínio (72,1 a 89,8%) e os tipos de argila encontrados são a illite, a caulinite e a montmorilonite.

Quadro 1 – Resumo das características físicas, químicas e mecânicas dos solos.

Características físicas	Norma		S100	S200	S300
Passados, peneiro #200-ASTM	E 196	(%)	14	45	33
Partículas de argila (<2µm)	E196	(%)	5	28	8
Limite de liquidez	NP 143	(%)	34	38	25
Limite de plasticidade	NP 143	(%)	17	11	NP
Índice de plasticidade	NP 143	(%)	17	27	NP
Azul de metileno	NF P 94-068	(g/100g)	1,4	2,4	1,2
Equivalente de areia	E199	(%)	21	6	13
Densidade partículas	NP 83		2,65	2,63	2,67
Classificação para fins rodoviários	E 240		A-2-6(0)	A-6(8)	A-2-4(0)
Classificação USCS	ASTM D2487		SC	SC	SM
Classificação Francesa	NF P11-300		B5	A3	B5
Características mecânicas			S100	S200	S300
Peso volumico seco máximo	E 197	(kN/m³)	20,9	20,4	19,9
Teor em água ótimo	E197	(%)	7,5	7,9	8,5
CBR (5mm)	EN 13286-47	(%)	34	2	43
Expansibilidade	EN13286-47	(%)	0,4	6,3	0,7
Características químicas			S100	S200	S300
Capacidade de troca catiônica, CTC		(cmol/Kg)	11,8	6,0	25,6
pH	E203		8,1	5,4	8,5
Matéria orgânica	E201	(%)	0,12	0,06	0,05
Teor em Sulfatos	E202	(%)	0,01	0,01	0,01
Difração raio X					
• Quartzo		(%)	12	75	39
• Feldspato K		(%)	20	7	15
• Feldspato Na		(%)	23	–	9
• Micas		(%)	29	–	17
• Calcite		(%)	–	–	20
• Ilite		(%)	–	6	–
• Caulinite		(%)	13	12	–
• Montmorilonite		(%)	3	–	Vestígios
Fluorescência raio X					
• SiO ₂		(%)	62,7	81,5	62,8
• Al ₂ O ₃		(%)	18,2	8,29	9,34
• Fe ₂ O ₃		(%)	4,07	3,04	1,86
• MnO		(%)	0,04	0,01	0,02
• CaO		(%)	0,80	0,06	10,1
• MgO		(%)	1,01	0,33	0,5
• Na ₂ O		(%)	2,70	<0,2	0,97
• K ₂ O		(%)	4,32	1,44	2,94
• TiO ₂		(%)	0,61	0,49	0,56
• P ₂ O ₅		(%)	0,31	0,04	0,23
• Perda ao rubro		(%)	5,28	4,51	10,7

2.2 – Características da cal

Na realização deste estudo laboratorial foi utilizada uma cal aérea viva cálcica com a referência “PROVIACAL® Q2”, produzida pela Lusical (www.lusical.pt/). De acordo com a classificação da norma Portuguesa “NP EN 459-1” é classificada como “CL90-Q”.

3 – RESULTADOS E ANÁLISE

3.1 – Caracterização laboratorial das misturas

A adição de cal ao solo modifica por vezes de forma significativa as suas características, criando praticamente um novo solo com características mais adequadas à sua utilização como material de construção.

Após a adição de cal a um solo ocorrem modificações quase de imediato devido às reacções de troca catiónica, floculação e aglomeração que vão contribuir para uma alteração das propriedades físicas do solo. Como consequência das alterações físicas e também devido à acção de cimentação, espera-se uma melhoria das suas características mecânicas.

Com a finalidade de identificar e caracterizar os efeitos da sua modificação, verificada pela adição dos diferentes teores em cal viva, foram avaliadas várias características físicas e mecânicas nos três solos estudados. No Quadro 2 são apresentadas as alterações registadas nos solos após a adição dos diferentes teores em cal, apenas para um dos solos estudados (S200), por esse ser objecto da análise de ganho temporal discutida neste artigo. Os resultados obtidos para os outros dois solos (S100 e S300) são apresentados em Castro Neves (2009) e Castro Neves *et al.* (2010).

Quadro 2 – Resumo das modificações registadas nos solos após adição dos diferentes teores em cal.

Características	Norma	S200			
		0	1,5	2,5	4,0
Teor em cal (CaO)		0	1,5	2,5	4,0
Passados no peneiro ASTM # 200 (%)	E196	45	42	40	36
Partículas de argila (diâmetro < 2µm) (%)	E196	28	20	17	3
Limite liquidez (%)	NP 143	38	44	37	36
Limite plasticidade (%)	NP143	11	18	19	22
Índice plasticidade (%)	NP 143	27	26	18	14
Azul metileno (g/100g solo)	NF P94-068	2,4	2,3	2,0	1,7
Equivalente de areia (%)	E199	6	21	26	30
Densidade das partículas	NP 83	2,63	2,63	2,63	2,63
Classificação para fins rodoviários	E240	A-6 (8)	A-7-6 (6)	A-6 (3)	A-6 (1)
Classificação USCS	ASTM D2487	SC	SC	SC	SC
Classificação Francesa	NF P11-300	A3	A3	A2	A2
Peso vol.seco max.(kN/m³)	E197	20,4	20,0	–	19,5
Teor óptimo água (%)	E197	7,9	10,0	–	11,1
CBR (5mm) (%)	EN 13286-47	2	72	–	77
Expansibilidade (%)	EN 13286-47	6,3	1,1	–	0,2

Através da análise dos valores apresentados no Quadro 1 é possível identificar uma diminuição da fracção fina nas misturas de solo-cal quando comparadas com a amostra inicial (“branca”) e a diminuição do índice de plasticidade após a adição de cal. Tal facto também é confirmado nos valores obtidos no ensaio de azul de metileno. Segundo (TRB 1987) os primeiros incrementos em quantidade de cal, mesmo em baixos teores, são geralmente mais eficientes na redução do índice de plasticidade, as adições subsequentes tornam-se menos benéficas.

Verifica-se também uma diminuição do peso volúmico seco máximo e um aumento do teor em água óptimo com o aumento do teor em cal. O resultado das reacções imediatas (i.e., troca catiónica, floculação, aglomeração e a formação inicial de aluminato de cálcio hidratado que se forma na superfície das partículas de argila) entre a cal e o solo, contribuem para uma mudança substancial na relação entre o peso volúmico e o teor em água (Little, 1995). Os valores obtidos nos ensaios CBR após 4 dias de imersão das misturas de solo-cal evidenciam incrementos substanciais da capacidade de carga e redução no valor da expansibilidade.

3.2 – Evolução das características mecânicas

Em geral, todos os solos tratados com cal exibem uma redução da plasticidade, diminuição da expansibilidade e melhoria das suas características de trabalhabilidade (TRB 1987). Contudo, nem todos os solos tratados evidenciam ganhos de resistência substanciais. A melhoria das propriedades mecânicas do solo depende dos tipos de solo e de cal, do teor em cal e das condições de cura, i.e., tempo, temperatura e humidade.

3.2.1 – Ensaio de compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial é o método mais utilizado para avaliar a resistência mecânica dos solos estabilizados com cal. Estes ensaios têm sido utilizados para avaliar a eficiência da reacção pozolânica, resultante da interacção entre as partículas de argila existentes no solo e a cal adicionada. A diferença entre a resistência à compressão do solo natural e do solo estabilizado com cal pode ser utilizada como um indicador do modo como as reacções pozolânicas se processam entre o solo e a cal. Incrementos substanciais de resistência indicam que o solo reage com a cal e poderá ser estabilizado, garantindo assim um material com muito boas características.

No presente trabalho, a compactação dos provetes foi realizada para um teor em água superior em cerca de 2% ao respectivo teor óptimo e para um grau de compactação de 95%. A escolha por um teor em água no ramo húmido da curva de compactação para a moldagem dos provetes teve em consideração o facto de se desejar garantir que toda a cal adicionada ao solo seria hidratada para poder desenvolver as suas potencialidades reactivas com os minerais argilosos do solo, garantindo desta forma que não restarão núcleos de cal não hidratada, o que poderia levar ao aparecimento de elementos frágeis e instabilizadores da mistura. Os provetes após a compactação apresentavam uma relação altura/diâmetro de 2:1. A metodologia seguida para a realização do ensaio foi a estabelecida na norma Europeia EN13286-41 (CEN, 2004).

No Quadro 3 apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão uniaxial com a mistura do solo S200 para diferentes teores em cal. Os provetes foram curados em câmara húmida com temperatura $20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e com humidade relativa $\geq 95\%$.

Com os dados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial e para melhor visualizar o desenvolvimento da resistência mecânica com o tempo para os diferentes teores em cal, apresentam-se, na Figura 1, os gráficos de tensão deformação para o solo S200.

Com base nos valores obtidos nos ensaios tornam-se evidentes os ganhos de resistência. Os aumentos de resistência à compressão uniaxial ocorrem logo aos 7 dias de cura (“idade”), com aumentos significativos inclusivamente nos provetes moldados com teor em cal de apenas 1,5%. Na

Quadro 3 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão (solo S200).

Teor em cal (%)	Idade (dias)	E (MPa)	σ_r (kPa)	ϵ_r (%)
0,0	–	20	471,3	2,54
1,5	7	271	906,9	0,47
	70	277	1267,0	0,77
	120	374	1913,0	0,71
2,5	7	170	1144,6	0,90
	70	443	2072,5	0,80
	120	380	2076,6	0,97
	180	354	2811,8	1,08
4,0	7	228	1434,3	0,78
	30	533	1624,4	0,49
	90	595	3019,2	0,72
	120	508	2905,3	0,93
	180	665	4047,8	0,96
	360	858	4521,0	0,78

E - Módulo de deformabilidade secante na rotura; σ_r – tensão de rotura; ϵ_r – extensão de rotura

verdade, este aumento de resistência quase imediato já havia sido observado através dos ensaios IPI realizados imediatamente após a compactação dos provetes, sendo em alguns casos os incrementos imediatos superiores a 100%.

Através da análise dos gráficos das curvas tensão-deformação também é possível verificar que o aumento de resistência ao longo do tempo, para os diferentes teores em cal, é acompanhado de um aumento do módulo de deformabilidade. Este facto, expectável, é referido por Thompson (1966), relatando acréscimos significativos da tensão e decréscimos da deformação de rotura em misturas de solo-cal, quando comparadas com o solo natural (“branco”).

Com a finalidade de avaliar o efeito da temperatura na aceleração das reacções químicas entre a cal e as partículas de argila, foram moldados provetes com teor em cal de 4% do solo referenciado por solo da Barosa (S200) e mantidos até à data de ensaio a uma temperatura de 40°C. Nesse sentido, os provetes foram colocados dentro de sacos de plástico selados, de forma a manter o teor em água da moldagem, colocados dentro de uma recipiente com água e mantidos dentro de uma estufa capaz de manter a temperatura de 40°C.

De seguida, foram realizados ensaios de resistência à compressão uniaxial para períodos de cura de 3, 7, 30 e 90 dias de idade. Após os respectivos períodos de cura procedeu-se à realização do ensaio de compressão uniaxial. No Quadro 4 apresenta-se um resumo dos valores da resistência à compressão para diferentes períodos de cura.

Os valores obtidos permitem identificar um rápido crescimento das resistências mecânicas na mistura do solo-cal que, logo aos 3 dias de idade, apresenta um incremento de resistência de 1713 kPa em relação à do solo não tratado, ou seja o solo estabilizado com cal apresenta um aumento de 363% em apenas 3 dias de cura nas condições descritas.

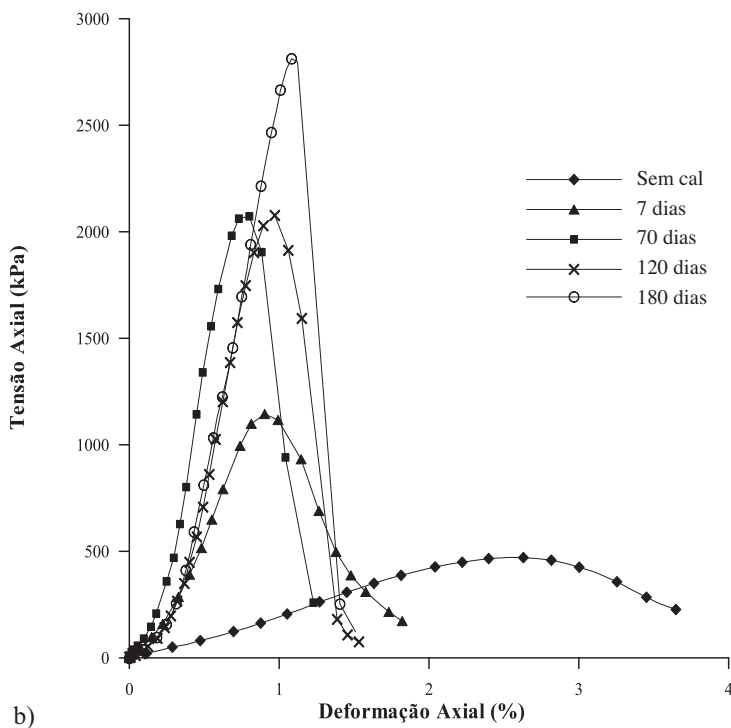
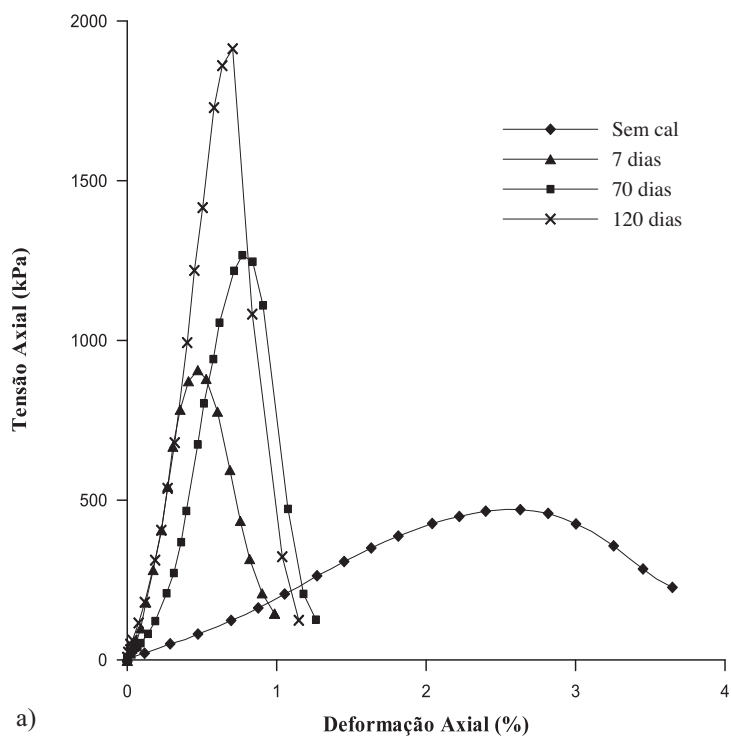


Fig. 1 – Gráficos tensão/extensão axial obtidos nos ensaios de compressão uniaxial:
a) S200 com 1,5% de cal, b) S200 com 2,5% de cal, c) S200 com 4,0% de cal.

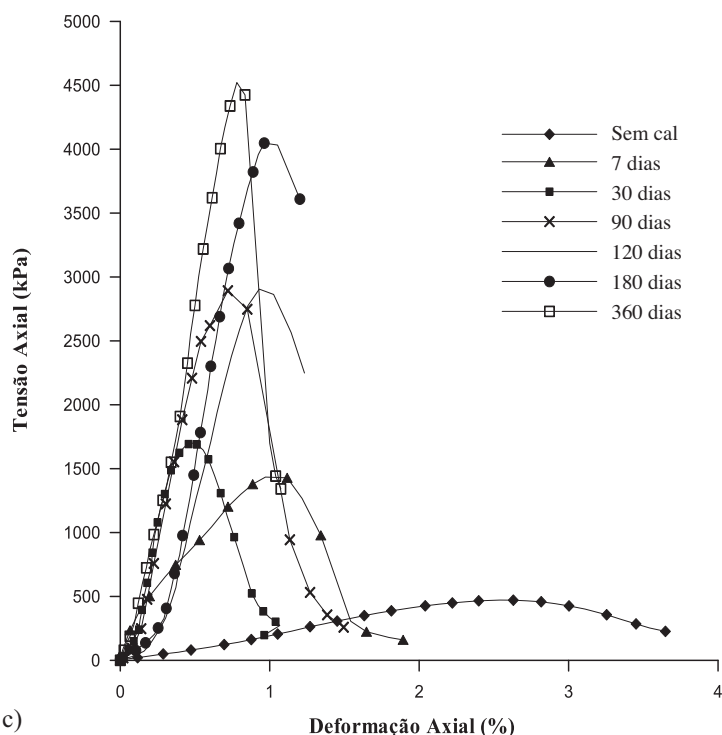


Fig. 1 (Cont.) – Gráficos tensão/extensão axial obtidos nos ensaios de compressão uniaxial:
a) S200 com 1,5% de cal, b) S200 com 2,5% de cal, c) S200 com 4,0% de cal.

Quadro 4 – Valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão uniaxial em provetes curados a 40 °C.

Teor em cal (%)	Idade (dias)	E (MPa)	σ_r (kPa)	ϵ_r (%)
0,0	—	20	471,3	2,54
4,0	3	352	2184,5	0,82
	7	335	2998,7	0,87
	30	575	5114,7	0,73
	90	450	6433,4	1,47

E - Módulo de deformabilidade secante na rotura; σ_r – tensão de rotura; ϵ_r – extensão de rotura

Através do gráfico tensão-deformação é possível verificar ainda um aumento da rigidez dos provetes, que se traduz no valor da extensão axial na rotura, que vem diminuindo à medida que o tempo de cura aumenta.

A Figura 2 pretende evidenciar a forma de crescimento da resistência a compressão uniaxial para um mesmo solo estabilizado com 4% de cal, mas em que a cura foi realizada de duas formas distintas, a 40°C em estufa e a 20 ± 2°C e HR > 95%.

Verifica-se que o aumento da temperatura acelera as reacções químicas traduzindo-se em incrementos significativos na resistência à compressão uniaxial, mesmo para períodos de cura muito curtos - inferiores a 7 dias -, quando comparados com o crescimento da resistência dos

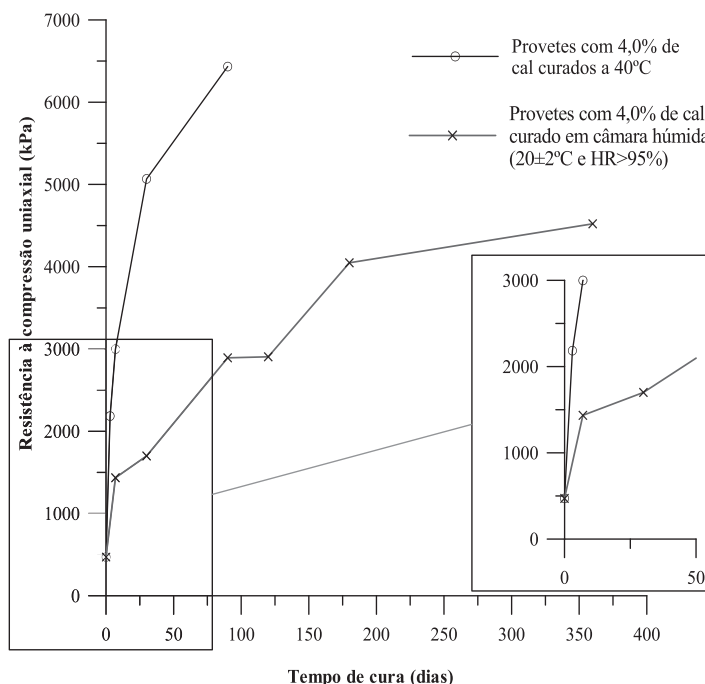


Fig. 2 – Evolução da resistência à compressão uniaxial do solo S200 em função do tempo e condição de cura.

provetes curados a 20°C em câmara húmida. O provete curado a 20°C apresenta aos 30 dias de cura uma resistência de 1624 kPa, enquanto o provete com idêntica idade, mas curado a 40°C regista um valor de 5115 kPa, ou seja, uma diferença superior a 3400kPa.

3.2.2 – Comportamento em triaxiais clássicos

O principal objectivo da realização dos ensaios triaxiais foi o de se fazer a avaliação dos parâmetros de resistência do solo em duas situações distintas: em primeiro lugar, no seu estado natural, e depois com um teor em cal de 4% após 7 dias de cura e 2 anos de cura. Os provetes da mistura de solo com 4% de cal foram moldados em 29-1-2008. Para tal procedeu-se à moldagem dos provetes, de forma estática, para um teor em água idêntico ao óptimo e com um peso volúmico seco de 95% do peso volúmico seco máximo obtido nos respectivos ensaios de compactação pesada Proctor. Os provetes foram consolidados isotropicamente e levados à rotura em carregamento não drenado (CIU, com medição da pressão intersticial) e por aumento contínuo da tensão vertical.

Todos os provetes foram previamente saturados através da aplicação de acréscimos simultâneos de tensão confinante e de contra-pressão, mantendo-se sempre uma tensão efectiva constante de 10 kPa. Assim, o solo foi considerado saturado quando o parâmetro de pressão neutra B atingia pelo menos 95%, o que normalmente foi atingido para contra-pressão da ordem dos 300 kPa. Após a saturação, os provetes foram consolidados para tensões efectivas de 20, 50 e 150 kPa através do aumento da pressão na câmara, mantendo-se os valores da contra-pressão atingidos no final da saturação. A consolidação deu-se por terminada, assim que se dissiparam os excessos de pressões neutras, com a estabilização de volume dos provetes.

Na Figura 3 apresentam-se os resultados de ensaios triaxiais sobre o solo natural e o mesmo com 4% de cal, com 7 dias e 2 anos de idade. Durante a fase de corte registou-se uma diminuição

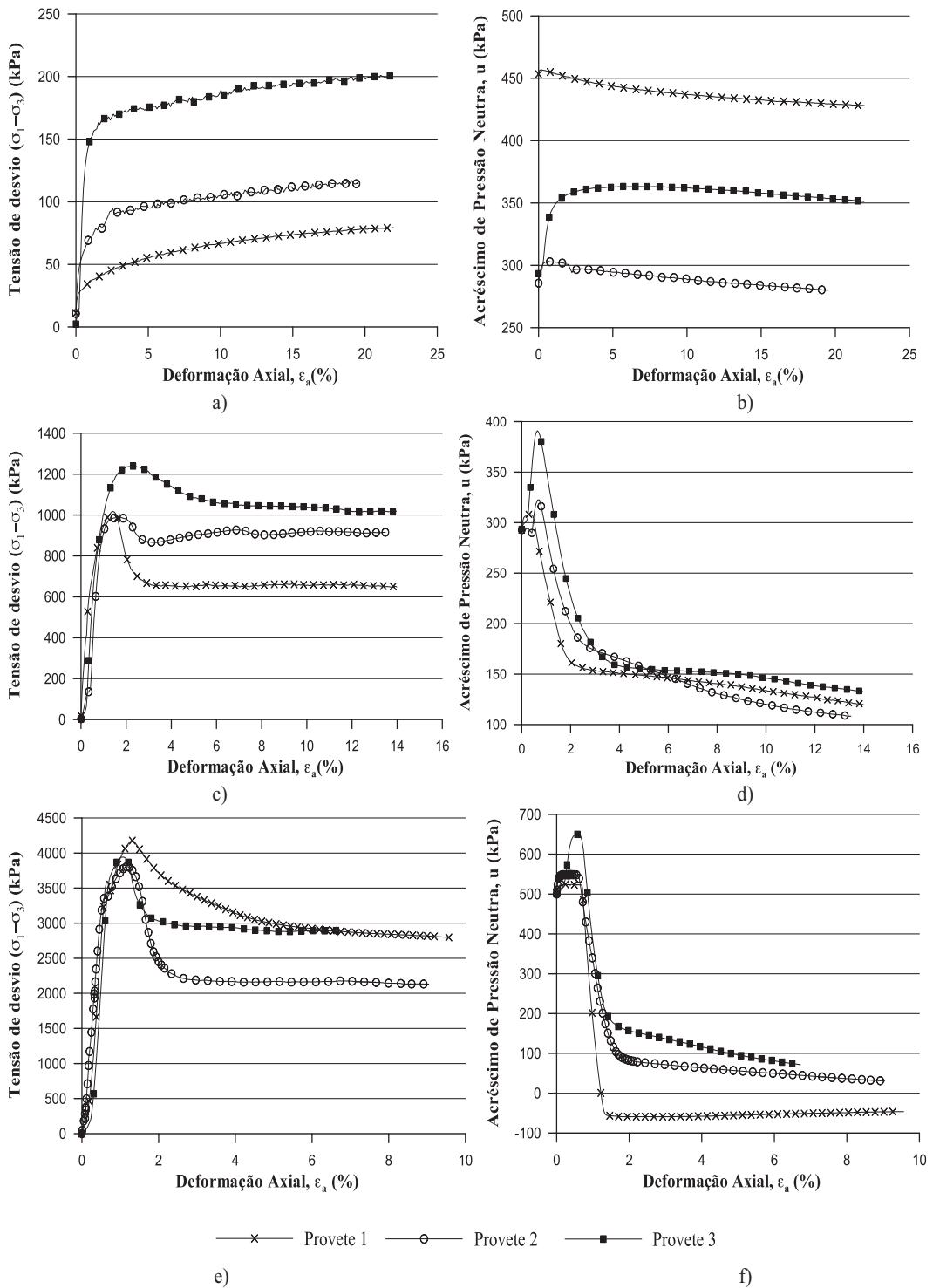


Fig. 3 – Curvas tensão de desvio e pressão neutra vs. deformação axial. a) e b) solo natural, c) e d) solo com 4% de cal e 7 dias de idade e e) e f) solo com 4% de cal e 2 anos de idade (ensaiados de 30-1 a 4-2-2010).

da pressão neutra nos provetes 1 e 2 e no caso do provete 3 um acréscimo do valor de pressão. A tendência deve-se ao facto do provete compactado ser fortemente compactado (95% da massa volúmica seca máxima do Proctor pesado), a que corresponderá um limiar de cedência, do tipo tensão “pré-consolidação”. Os valores mais baixos de consolidação no ensaio, 20 e 50 kPa para os provetes 1 e 2, ficam aquém daquela tensão induzida no processo de compactação. No caso do provete 3 em que o valor da consolidação é de 150 kPa está-se em níveis de tensão superiores à de “pré-consolidação”.

A análise de comportamento dos três conjuntos de curvas, correspondentes ao solo natural - a) e b) - à mistura com 4% de cal e 7 dias de cura - c) e d) - e à mesma com 2 anos de cura, revela bem a evolução que se dá com a acção pozolânica ao fim de 7 dias de cura e a que ainda decorre até os 2 anos de cura, onde a cimentação se manifesta com assaz clareza e relevantes ganhos. Assim, para além do aumento substancial das tensões de desvio necessárias para induzir deformação em corte, há um ganho de dilatância, logo de energia de mobilização de pico, nas três classes. Essas marcas de ganho de cimentação são notórias e são acompanhados por uma alteração do processo de geração de variações de pressões neutras, começando por uma relativa estabilidade destas e evoluindo para elevados a muito elevados decréscimos dessas pressões. Tal é revelador de uma acentuação de resposta dilatante com a cimentação.

Nas ilustrações que se incluem na Figura 4, mostram-se as diferenças de desenvolvimento do mecanismo de rotura nos ensaios triaxiais.

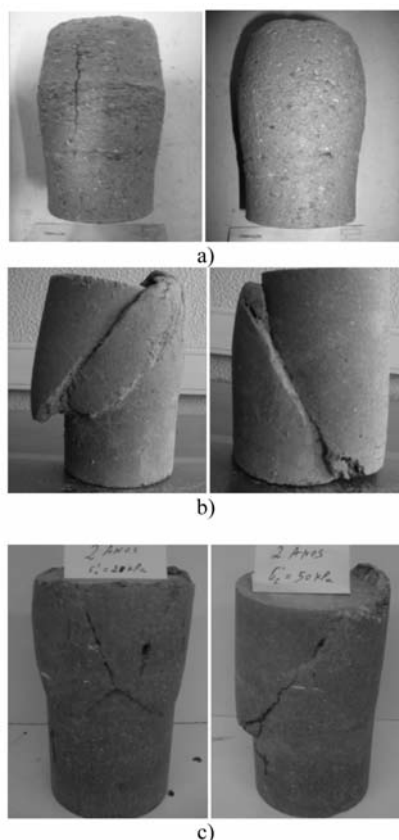


Fig. 4 – Provetes após condução à rotura por compressão triaxial (ensaio CIU): a) solo natural; b) solo com 4% de cal com 7 dias de idade e c) solo com 4% de cal e 730 dias de idade.

Como se pode ver nestas ilustrações, só os provetes de solo natural denotam um embarrilamento após condução à rotura, típico de solos não cimentados (naturalmente não muito compactados).

Os provetes de misturas de solo com 4% de cal apresentam um comportamento bem distinto, com mobilização de um plano localizado de corte, que é característico de solos cimentados e dilatantes. Esta localização é tanto maior quanto maior é o grau de cimentação e revela-se maior nas amostras com cura de longo período (2 anos).

Na Figura 5 representam-se as envolventes de rotura nos termos do critério de Mohr-Coulomb, em representação indicial tipo MIT [com $s' =$ tensão média efectiva $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$; $t =$ tensão de corte: $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$], para as três condições estudadas para o solo de Barosa (S200): solo natural, solo com 4% de cal com 7 dias e 2 anos de idade. No Quadro 5 apresenta-se um resumo dos parâmetros de resistência do critério de Mohr-Coulomb, ângulo de atrito (ϕ') e intercepto coesivo em termos de tensão efectiva, obtidos nos ensaios triaxiais realizados sobre o solo natural, ou seja sem adição de cal, e sobre o solo com um teor em cal de 4% ensaiado com 7 dias e 2 anos de idade, após a preparação da mistura e moldagem dos provetes. Inclui-se também a gama de valores obtidos do parâmetro de pressões intersticiais, A_v , de Skempton, que reflecte bem a resposta mecânica dos materiais em condições não drenadas. Para efeitos de primeira abordagem da envolvente de rotura, admitiu-se um valor para o ângulo de atrito, ou resistência ao corte, definido para o solo natural e para o solo estabilizado e curado aos 7 dias (ver acima).

Para melhor se comprovar o reflexo em intercepto coesivo deste ganho de cimentação no tempo, e porque qualquer triaxial em condições clássicas não forneceria pontos da envolvente de rotura para baixos valores de tensão efectiva média (s'), o que é determinante para a boa definição

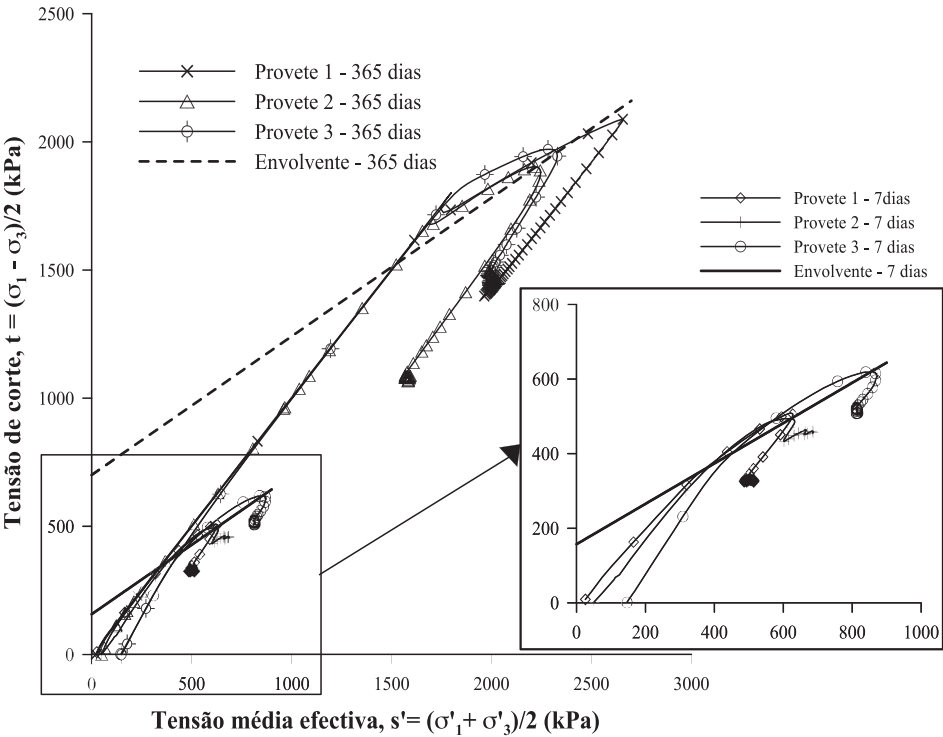


Fig. 5 – Trajectória de tensões efectivas e envolvente, para critério de rotura $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ do solo natural e do solo com 4% de cal, com 7 dias de idade e 2 anos de idade.

Quadro 5 – Parâmetros de resistência obtidos nos ensaios triaxiais CIU, para o critério de rotura para $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$

Teor em cal (%)	Idade (dias)	ϕ' (°)	c' (kPa)	A_r
0,0	—	32,2	0	0,29
4,0	7	32,7	187	-0,08
	730	32,7	833	-0,13

da ordenada na origem, fez-se um ensaio de compressão diametral que, segundo Viana da Fonseca (1996), é um ensaio muito útil para o efeito.

Os resultados são tão surpreendentes pela sua expressão, quanto claros. Os ganhos de resistência são enormes, reflectindo bem a importância do processo de carbonatação.

3.2.3 – Ensaio de compressão diametral para dedução do intercepto coesivo

De facto, os solos cimentados possuem uma resistência estrutural não confinada, a que está associada uma resistência à tracção fenomenologicamente importante, pois trata-se de uma componente verdadeiramente coesiva da matriz cimentada. Segundo Viana da Fonseca (1996) a sua determinação pode ser efectuada de forma expedita a partir de um método indirecto conhecido coloquialmente por “ensaio brasileiro”, ou seja, pelo ensaio de compressão diametral. Teoricamente, nestas condições de compressão diametral de provetes cilíndricos, ao longo do eixo vertical de simetria (que passa pelos pontos de aplicação da carga) e na direcção normal a esse eixo, a tensão é de tracção e é constante, sendo dada por:

$$\sigma_T = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot H \cdot D} \quad (1)$$

sendo P a carga diametral, uniformizada ao longo da geratriz do provete, H e D , respectivamente, a altura e o diâmetro iniciais do provete rectificado.

Na Figura 6 ilustra-se o provete de ensaio com dispositivos de medição do módulo de deformabilidade em tracção. De salientar que, apesar deste módulo ser um parâmetro muito valorizado em fundações e plataformas de infraestruturas de transportes, não é avaliado neste trabalho, sendo objecto de outros trabalhos que se encontram já em curso.

Para identificar a componente do intercepto coesivo, Viana da Fonseca (1996) apresenta a seguinte metodologia. No eixo de simetria que une os pontos de aplicação da carga, a tensão na direcção desse eixo é de compressão e vale:

$$\sigma_c = \lambda \cdot \sigma_T \quad (2)$$

em que λ tem um valor mínimo igual a 3 no centro e, naturalmente, cresce para os pontos de aplicação da carga. Tem-se, assim, que, ao longo do eixo em causa, as tensões de tracção são uniformes mas as de compressão não o são, o que complica a avaliação da coesão. Note-se que é nos pontos desse eixo que a tensão de desvio é máxima, localizando-se a rotura sobre esse eixo e desenvolvendo-se de forma progressiva (Figura 6).

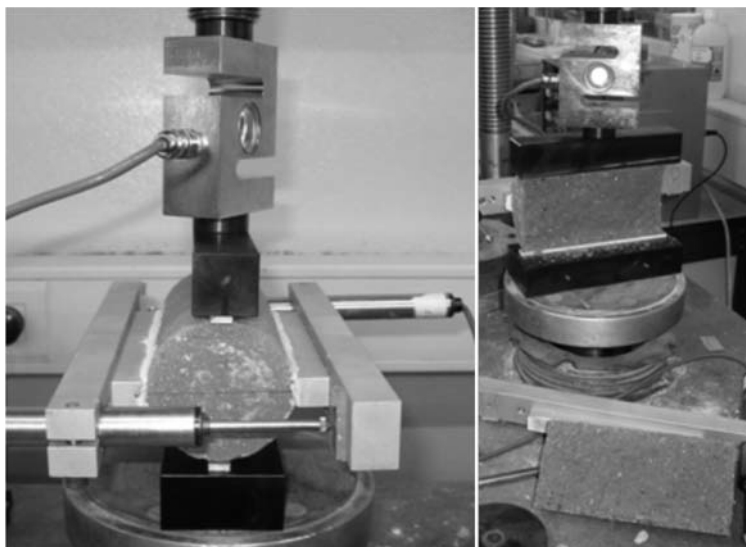


Fig. 6 – Determinação da resistência à tracção de provetes cilíndricos (ensaios de compressão diametral).

Supondo que na rotura o círculo de Mohr é tangente à envolvente, para um ponto qualquer do eixo referido, supostamente em rotura, obtém-se:

$$c' = \left[1 + \operatorname{tg} \phi' + \lambda \cdot (1 - \operatorname{tg} \phi') \right] \cdot \sigma_T / 2 \quad (3)$$

Ora o valor máximo obtido da tensão de compressão foi de 3787 N, a que corresponde, pela expressão (1), e para uma altura de provete de 140mm e diâmetro de 70mm, uma tensão de tracção máxima de $\sigma_T = 246$ kPa.

Na aplicação da expressão (3) admitiu-se que $\lambda = 3$ (o menor valor da tensão de compressão vertical ao longo da geratriz) e considerou-se inicialmente o valor de referência anteriormente definido para o ângulo de resistência ao corte de $\phi' = 32,7^\circ$, o que resultaria num valor para a coesão efectiva de $c' = 333,5$ kPa.

Ainda assim, e para que se faça o correcto ajuste deste ponto de rotura com confinamento nulo, com os restantes pontos da envolvente, ter-se-ia de aumentar substancialmente o valor do ângulo de atrito, até cerca de $57,5^\circ$ (ver Figura 7). Considerando que o valor da coesão efectiva, deferido do ensaio de compressão diametral, é muito conservativo (muito provavelmente devido às condições desfavoráveis de punçoamento imposta por este carregamento), o valor real desse intercepto coesivo, deverá situar-se entre estes dois extremos. Este valor só se identificará correctamente com um número maior destes últimos ensaios de compressão diametral, complementados de ensaios triaxiais com alívio de tensão lateral.

O valor do intercepto coesivo desta mistura de solo-cal ao fim de cerca de 2 anos de cura, denota, à luz dos valores extremos da gama atrás definida (oscilando entre 333,5kPa, deferido da resistência à tracção no “ensaio brasileiro”, e 833kPa, valor obtido a partir de uma simples linearização da envolvente a partir dos três pontos de rotura dos ensaios triaxiais mantendo o ângulo de atrito antes identificado - Figura 7), um relevante e surpreendente incremento da componente coesiva do critério de Mohr-Coulomb. Este elevado valor está, naturalmente, associado a uma forte estrutura cimentada, numa matriz de compacidade média a elevada, resultante das acções pozolânicas que se desenvolveram com a cal e as partículas de argilas do solo.

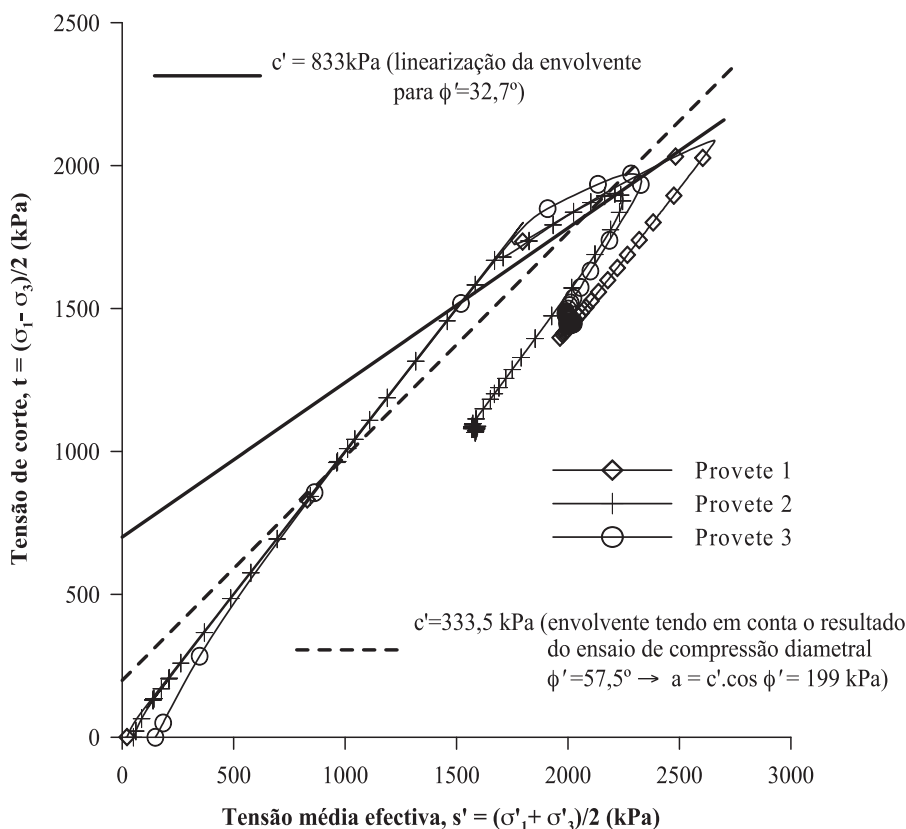


Fig. 7 – Trajectória de tensões efectivas e envolvente de rotura do solo com 4% de cal e 2 anos de idade.

3.2.4 – Permeabilidade

Tendo como principal objectivo a realização dos ensaios triaxiais, aproveitou-se o condicionamento dos provetes nas câmaras após fase de saturação e consolidação e determinou-se a condutividade hidráulica em condições confinadas como a seguir se expressa: após a consolidação isotrópica, induziu-se uma percolação de água sob pressão com sucessivos diferenciais de 5, 10 e 15 kPa (a que correspondem gradientes hidráulicos entre 2 e 10); em todos os escalões se aguardou a estabilização do fluxo, sendo sequenciados intervalos de tempo que o garantissem; salienta-se que não se detectaram diferenças de caudal para os níveis distintos de gradiente constante impostos; mediu-se o coeficiente de permeabilidade, tendo em conta correcções de temperatura.

Os ensaios foram feitos no solo natural com tensão de confinamento efectiva de 50 kPa, na mistura com 4% de cal ao fim de sete dias de cura e sob a mesma tensão de confinamento efectiva e, finalmente, nos provetes desta mistura com cerca de 2 anos de cura, nas três tensões de confinamento efectivas, usadas em triaxial: 20, 50 e 150 kPa. Os resultados estão expressos no Quadro 6.

Da análise dos resultados expressos no quadro vê-se bem como evoluiu a condutividade hidráulica desta mistura no tempo, sendo clara a diminuição significativa da permeabilidade, associada à perda de caminhos de percolação. Esta evolução poderá dever-se a duas razões: uma, de sensibilidade imediata associaria esta evolução a uma diminuição de dimensão dos grãos ou ganho de finos, que não é lógica, sendo detectável em análise granulométricas (que se perspectiva e que de

Quadro 6 – Resumo dos coeficientes de permeabilidade obtidos com carga constante em célula triaxial.

Teor em cal (%)	Idade (dias)	σ'_c (kPa)	k (m/s)	
0,0	—	50	9×10^{-5}	
4,0	7	50	5×10^{-6}	
	730	20	3×10^{-8}	
		50	5×10^{-8}	3×10^{-8}
		150	2×10^{-8}	

vem ser feitas com granulômetros laser); outra, mais aceitável e lógica, associa esta evolução à aglomeração de partículas em estrutura cimentada alveolar eventualmente floculada, mas mais fechada, fruto de uma estrutura reticulada fechada (esta organização interparticular só deverá ser bem identificada por microscopia electrónica).

4 – CONCLUSÕES

A análise agora apresentada sobre resultados obtidos no estudo laboratorial é parte de um estudo mais vasto de avaliação das implicações que as misturas de cal viva em solos Portugueses têm sobre as suas características (algumas destas questões foram detalhadas em Castro Neves *et al.*, 2010):

- a) Há alterações imediatas das características físicas das misturas, tanto de granulometria, plasticidade, como trabalhabilidade;
- b) Há ganhos de rigidez e resistência e decréscimos de permeabilidade, logo desde os primeiros dias de cura;
- c) Há influência das condições de cura no desenvolvimento das resistências mecânicas, nomeadamente o aumento da temperatura na aceleração das reacções químicas;
- d) Os ensaios triaxiais, complementados por ensaios de compressão diametral para bem fundamentar o intercepto coesivo, e com determinação de permeabilidade em condições de confinamento triaxial, com amostras do solo natural e o mesmo com 4% de cal, com 7 dias e 2 anos de idade, revelaram mudanças surpreendentes de propriedades mecânicas e hidráulicas no tempo; nestas mudanças:
 - i. verifica-se uma acentuada resistência de pico e dilatância e posteriormente uma resistência residual, comportamento típico dos solos muito sobreconsolidados ou com forte ligação entre partículas;
 - ii. há aumento claro da parcela de intercepto coesivo, grande logo aos sete dias de cura, mas substancial aos dois anos de idade;
 - iii. a permeabilidade desce em mais de uma ordem de grandeza a curto prazo, mas é a longo prazo que desce marcadamente (cerca de 3,5 ordens de grandeza).

Estes resultados surpreendem pela grandeza e provam o grande benefício no tempo da característica pozolânica deste ligante natural.

5 – AGRADECIMENTOS

Este trabalho integra-se na investigação do CEC da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e foi possível ao abrigo do protocolo estabelecido entre o Instituto da Construção (IC-FEUP) e a LUSICAL Companhia Lusitana de Cal, SA - Sociedade Balthazard & Cotte, membro do Grupo Lhoist, para a realização de “Estudos de solos portugueses tratados com cal com vista à sua aplicação nas infra-estruturas de transporte”. Agradece-se aos responsáveis, Dr.s Paulo Correia e Mário Marques, o empenho para a sua concretização. Agradece-se também aos colegas Eduardo Fortunato e Nuno Cruz pela colaboração no projecto.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CASTRO NEVES, E. (2009). *Estudo laboratorial de solos tratados com cal. Modelos de Comportamento*. Tese de Mestrado em Mec. Solos e Eng^a Geotécnica, 182 p. FEUP, Porto.
- CASTRO NEVES, E., VIANA DA FONSECA, A., CRUZ, N. B. F., MARQUES, M. e JOLY, C. (2010). *Estudo laboratorial de solos tratados com cal. Caracterização física, química e mecânica*. 12º Congresso Nacional de Geotecnia, Guimarães, 26-29 Abril 2010, pp. 1757-1766 (CD-ROM).
- CEN (2004). *Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 41: Test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures*. EN13286-41 - Eur. Comm. Normal., Brussels.
- LCPC-SETRA (2000). *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme - Guide technique*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et Service d' Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements.
- LITTLE, D. N. (1995). *Stabilization of Pavement Subgrades & Base Courses with Lime*. ISBN:0-8403-9632-5. Texas, USA.
- THOMPSON, M.R. (1966) *The Split-Tensile Strength of Lime-Stabilized Soils*. In Highway Research Record, HRB, National Research Council, Washington, D.C.
- TRB (1987). *State of the Art Report 5 – Lime Stabilization – Reactions, Properties, Design, and Construction by Transportation Research Board Committee on Lime and Lime-Fly Ash Stabilization*, Washington, D.C.
- VIANA DA FONSECA, A. (1996). *Geomecânica dos Solos Residuais do Granito do Porto. Critérios para Dimensionamento de Fundações Directas*. Tese de doutoramento Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.