

COMPORTAMENTO NÃO SATURADO DE SOLOS ESTABILIZADOS COM CINZAS VOLANTES RESULTANTES DA QUEIMA DE CARVÃO

Unsaturated behaviour of soils stabilized with fly ash from coal combustion

Nuno Araújo^a, Nuno Cristelo^b, António Topa Gomes^c, Tiago Miranda^a

^a Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal

^b Departamento de Engenharias, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal.

^c Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Portugal

RESUMO – A influência da sucção no comportamento de solos estabilizados quimicamente não foi ainda consistentemente quantificada, situação também motivada pelas dificuldades no procedimento experimental para caracterizar a resposta não saturada. Este artigo apresenta curvas de retenção obtidas para um solo estabilizado com cimento Portland ou com cimento alcalino. Apresentam-se também ensaios triaxiais, para as mesmas condições de cura, até aos 90 dias. Desconhecem-se tentativas anteriores de caracterizar curvas de retenção para solo-cimento alcalino; os resultados obtidos mostram que a estrutura de poros está formada aos 28 dias, antes do desenvolvimento da matriz de gel responsável pelo aumento da resistência. A curva de retenção alterou após estabilização, com formas diferentes para cada ligante – Portland gerou valor de entrada de ar mais elevado e uma faixa de sucção mais estreita. As diferenças entre curvas de cada ligante sugerem uma metodologia para avaliar a qualidade da estabilização por cimento alcalino.

ABSTRACT – The influence of suction on the mechanical behavior of chemically stabilized soils has not yet been consistently quantified, a situation also motivated by difficulties in the experimental procedure to characterize the unsaturated response. This paper presents retention curves obtained for a soil stabilized with Portland cement or an alkaline cement. Triaxial tests are also presented, for the same curing conditions, up to 90 days. Previous attempts to characterize retention curves for soil - (alkaline) cement are unknown; the results obtained showed that the pore structure is formed at 28 days, before the development of the gel matrix responsible for the increase in strength. The retention curve changed after stabilization, with different shapes for each binder – Portland generated a higher air entry value and a narrower suction range. The differences between curves for each binder suggest a methodology to evaluate the quality of stabilization by alkaline cement.

Palavras Chave – Estabilização de solos, solos não saturados, ativação alcalina.

Keywords – Soil stabilisation, unsaturated soils, alkaline activation.

E-mails: nuno@civil.uminho.pt (N. Araújo), ncristel@utad.pt (N. Cristelo), atgomes@fe.up.pt (A. Gomes), tmiranda@civil.uminho.pt (T. Miranda)

ORCID: orcid.org/0000-0002-0586-0873 (N. Araújo), orcid.org/0000-0002-3600-1094 (N. Cristelo), orcid.org/0000-0002-5149-8748 (A. Gomes), orcid.org/0000-0003-4054-6860 (T. Miranda)

1 – INTRODUÇÃO

O melhoramento de solos através da adição de agentes químicos é normalmente aplicado com o objetivo de melhorar o seu desempenho mecânico e físico. Os ligantes mais comuns são a cal e o cimento Portland (CP), que reagem com as partículas do solo, ou simplesmente formam uma estrutura de cimento nos interstícios, respetivamente. Até recentemente, tratava-se de um processo relativamente simples e eficaz, com muitas décadas de experiência acumulada. No entanto, as preocupações crescentes, e cada vez mais intensas, com o ambiente, vieram alterar a passividade relativamente à dependência do cimento Portland, promovendo a procura por ligantes mais ecológicos. A ativação alcalina é um forte exemplo desta nova família de alternativas ao CP, ao permitir a introdução de resíduos industriais na fabricação de ligantes alternativos, representando assim uma dupla vantagem: a mitigação da necessidade de CP e a redução do volume de resíduos que são normalmente depositados em aterro. (Cristelo et al., 2013; Rios et al., 2013; Silva et al., 2013; Rios et al., 2016, 2018; Rodrigues et al., 2016; Corrêa-Silva et al., 2019).

A ativação alcalina (AA) utiliza frequentemente cinzas volantes (FA), resultantes da combustão de carvão em centrais termelétricas, como precursor principal. Isto porque as FA não só possuem elevados teores de silício e alumínio, ambos essenciais á formação de uma estrutura cimentícia, mas também porque foram já submetidas a altas temperaturas, durante a combustão do carvão, o que retirou a maior parte da sua água de constituição e, conseqüentemente, aumentou significativamente o seu grau de amorfização. Esta é uma propriedade essencial do precursor, pois quanto mais cristalino for o material original, menos disponível estará para responder às reações de ativação. (Fernández-Jiménez et al., 2006).

Do ponto de vista do desempenho mecânico, os primeiros estudos sobre o uso de cimentos alcalinos como agente de estabilização de solos demonstraram aumentos claros e significativos na resistência à compressão (Cristelo et al., 2011; Rios et al., 2016; Corrêa-Silva et al., 2019) e resistência à tração (Pourakbar et al., 2017), bem como aumentos na rigidez (Manuel, 2013; Silva, 2016), relativamente aos solos originais. A eficácia da técnica depende também das propriedades intrínsecas do solo, mas especialmente da qualidade do precursor (taxa de inqueimados, composição química original, grau de amorfização), do tipo de ativador (concentração de álcalis, teor de sílica amorfa) e da relação ativador/precursor (incluindo o teor total de água e a relação álcali/precursor) (Cristelo et al., 2012, 2013; Silva, 2016).

Também importante, ao projetar a estabilização de um solo com este tipo de cimentos, é que a sua velocidade de ganho de resistência pode ser inferior à que é normalmente observada com o CP. O cimento Portland atinge aumentos muito significativos de resistência após apenas 28 dias de cura (85 a 95% da sua resistência à compressão final), enquanto os cimentos alcalinos à base de precursores com baixo teor de cálcio, como a FA utilizada no presente estudo, continuam a apresentar ganhos significativos de resistência mesmo após 90 dias (Cristelo et al., 2011, 2013). O solo utilizado neste trabalho foi já submetido a estudos anteriores que focaram principalmente na estabilização com cimento e cal, mas também com cimentos alcalinos à base de FA, visando aumentar sua resistência à compressão uniaxial (UCS) (Silva, 2016; Corrêa-Silva et al., 2019). Em suma, estes trabalhos revelaram que os ligantes convencionais atingiram valores mais elevados de UCS aos 28 dias de cura, enquanto os cimentos alcalinos foram capazes de produzir resistências à compressão mais elevadas após períodos de cura mais longos, até 90 dias. A eficácia do ligante alternativo proposto, principalmente após 90 dias, foi reforçada pela maior rigidez apresentada, relativamente ao solo estabilizado com CP. O presente artigo amplia o trabalho anterior de caracterização mecânica, apresentando ensaios triaxiais no solo estabilizado, com posterior medição da sucção.

A sucção total (ψ) é o parâmetro mais relevante no controle do comportamento de solos não saturados, pois pode alterar significativamente a resposta mecânica, nomeadamente a resistência e rigidez (Fredlund e Rahardjo, 1993; Lu e Likos, 2004; Han e Vanapalli, 2016), mas pode também influenciar decisivamente o fluxo de ar, água e calor, variáveis muito relevantes no que diz respeito

às questões ambientais (Fredlund e Rahardjo, 1993; Gens, 2010). A sucção total corresponde à soma da sucção osmótica e da sucção matricial. A primeira refere-se ao movimento de sais através da água livre existente nos vazios do solo, movimento esse causado por concentrações de sais diferenciais, que podem produzir movimentos de água. A segunda refere-se à diferença entre a pressão atmosférica e a pressão da água nos vazios do solo (ASTM D5298, 2016), correspondente à energia necessária para remover uma molécula de água da estrutura do solo (Ridley e Burland, 1993). Na engenharia geotécnica, a sucção total corresponde muitas vezes apenas à sucção matricial, ou seja, a sucção osmótica não é considerada (Fredlund e Rahardjo, 1993; Lu e Likos, 2004), uma vez que a água livre é considerada neutra. Para caracterizar completamente o comportamento hidromecânico de solos não saturados, é importante avaliar a sucção matricial, que é influenciada pelas condições ambientais e pode levar a alterações no volume do solo, na resistência ao corte e na permeabilidade (Fredlund e Rahardjo, 1993; Lu e Likos, 2004; Fredlund e Gitirana Jr., 2005; Gens, 2010).

O presente trabalho centrou-se na caracterização geomecânica de uma argila arenosa magra, estabilizada com cimento alcalino à base de cinzas volantes ativadas com hidróxido e silicato de sódio, através da determinação da sua curva de retenção e de ensaios triaxiais não drenados. Esta solução constitui uma alternativa mais sustentável, em princípio, do que o cimento Portland comum, que foi também utilizado neste trabalho, de modo a criar um ponto de comparação.

2 – METODOLOGIA

2.1 – Materiais

O solo utilizado neste trabalho foi recolhido perto da cidade do Porto. Foram já desenvolvidos vários estudos sobre a caracterização deste solo (Corrêa-Silva et al., 2019), tendo sido classificado como CL - argila arenosa magra, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM, 2006), e como pertencente ao grupo A-4, materiais silte-argilosos, de acordo com o sistema de classificação AASHTO (ASTM, 2015). As principais propriedades geotécnicas são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Propriedades geotécnicas do solo (Corrêa-Silva et al., 2019).

Areia (%)	39.3
Finos (%)	60.7
Limite liquidez (%)	28
Limite plasticidade (%)	19
Densidade	2.54

As cinzas volantes foram fornecidas pela empresa PEGOP, responsável pela central termoelétrica portuguesa ‘Central do Pego’. Com base na respetiva composição química, foi classificada como pertencente à classe F (ASTM C618, 2012). Foi também utilizado um cimento Portland do tipo CEM II / B-L 32,5N.

Todas as misturas de solo com AAC ou CP foram ensaiadas aos 28 e 90 dias de cura. A combinação AAC-solo (AAC-S) foi preparada com 80% (em peso) de solo e 20% de FA, com uma relação ativador-FA de 0,96. O ativador utilizado consistiu numa combinação de hidróxido de sódio (SH) e silicato de sódio (SS), com uma relação em peso (SS/SH) de 0,5. O SH foi fornecido em pellets, com densidade específica de 2,13 a 20°C (99% em peso), que foi então dissolvido em água deionizada até a concentração de 10 mol. O SS apresentava um peso unitário de 1,464 g/cm³, uma relação SiO₂/Na₂O em peso de 2,0 (razão molar em óxidos de 2,063) e uma concentração de Na₂O

na solução de 13,0%. A combinação OPC-solo (OPC-S) foi preparada com 95% em peso de solo e 5% em peso de CP.

O Quadro 2 apresenta as propriedades de compactação dos materiais estudados, nomeadamente o peso volúmico seco máximo e o teor ótimo em água, determinados através de ensaios Proctor – BS 1377-4 (1990). O ensaio Proctor na combinação AAC-S foi desenvolvido com água, em vez de ativador, para evitar complicações inevitáveis associadas ao rápido endurecimento da pasta, após mistura, que poderiam influenciar o resultado.

Quadro 2 – Parâmetros de compactação dos materiais estabilizados, de acordo com ensaios de Proctor.

Material	Peso volúmico seco máximo (g/cm ³)	Teor ótimo em água (%)
Solo	17,76	14,4
OPC-S	17,85	14,5
AAC-S	17,66	13,0

A caracterização laboratorial incluiu a medição da sucção do solo e ensaios triaxiais consolidados não drenados, tanto para o solo natural como para ambas as combinações solo-estabilizante, após 28 e 90 dias de cura. A variação nos níveis de sucção matricial do solo, que é função do grau de saturação, tem influência direta na sua resistência ao corte e capacidade de carga, bem como na sua rigidez (Fredlund e Rahardjo, 1993; Lu e Likos, 2004; Han e Vanapalli, 2016). A sucção matricial foi determinada pelo método do papel filtro, seguindo os procedimentos recomendados pela norma ASTM D5298 (2016). Para cada grupo foram fabricados nove provetes cilíndricos, com 52 mm de diâmetro e 20 mm de altura. O procedimento de ensaio consistiu em medir a água absorvida pelo provete utilizando um molde lateralmente impermeável, para evitar quaisquer trocas de humidade com a atmosfera. Após a cura, os provetes foram secos em estufa, a 110°C, por 24 horas, seguindo-se a aplicação de dois papéis de filtro circulares concêntricos (com 30 mm e 50 mm de diâmetro) na base do provete (Figura 1), e um papel de filtro na parte superior, com 40 mm de diâmetro.



Fig. 1 – Aplicação de dois papéis de filtro concêntricos, com diâmetros de 30 mm (a) e 50 mm (b).

O papel de filtro localizado no topo superior foi então humedecido, o que promoveu a distribuição da humidade de forma uniforme por toda a parte superior do provete. Um volume diferente de água foi adicionado a cada um dos 9 provetes, para produzir 9 teores em água também diferentes. Após humedecimento, um disco plástico foi colocado sobre o papel de filtro, de 40 mm

de diâmetro, para garantir o contato permanente entre este e o solo. Por fim, o provete foi armazenado durante 7 dias. As massas húmidas do provete e cada um dos três papéis de filtro foi então determinada, procedimento que foi repetido após secagem por 48 horas a 110°C. São apresentados os resultados obtidos com os papéis de 30, 40 e 50 mm. Para a mistura AAC-S foram produzidos dois conjuntos de provetes, sendo um conjunto medido após 28 dias de cura e outro aos 90 dias de cura. Já para a mistura OPC-S foram fabricados quatro conjuntos de provetes, sendo três conjuntos medidos após 28 dias de cura e o restante aos 90 dias de cura.

Os valores de sucção matricial em cada amostra foram calculados usando a Eq. (1), proposta pela norma ASTM D5298 (2016), enquanto a Eq. 2, proposta por Van Genuchten (1980), foi adotada para ajustar uma curva teórica aos dados experimentais obtidos para a variação do teor volumétrico de água (θ_w) em função do valor da sucção (Ψ):

$$\log \Psi = 5.327 - \omega \cdot 7.79 \quad (1)$$

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + a \cdot \Psi^b)^c} \quad (2)$$

Nestas duas equações, ω representa o teor de água do papel de filtro, θ_s o teor volumétrico em água no estado saturado, θ_r o teor volumétrico de água residual, sendo a , b e c parâmetros de ajuste. Após a obtenção destes parâmetros é possível prever o teor volumétrico de água e, portanto, o teor de água, para qualquer valor de sucção, e vice-versa (Fredlund e Xing, 1994; Topa Gomes et al., 2011).

Os ensaios triaxiais consolidados não drenados foram realizados em provetes com dimensões nominais de 70 mm de diâmetro e 140 mm de altura, seguindo genericamente o conteúdo da norma BS 1377-8 (1990). O procedimento de ensaio incluiu uma fase de saturação, por aumento monotônico (ao longo de 24 horas) da tensão de confinamento (e da respetiva contrapressão), até aos 1000 kPa (com uma diferença constante de 10 kPa entre as duas pressões), resultando em valores do parâmetro B de Skempton sempre superiores a 0,97. Posteriormente, foi aplicada uma tensão de consolidação, nos valores de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, para o solo original, de 10 kPa, 450 kPa e 700 kPa para os provetes OPC-S curadas durante 28 dias, de 10 kPa, 150 kPa e 700 kPa para os mesmos provetes curados durante 90 dias e, finalmente, de 10 kPa, 150 kPa e 700 kPa para os provetes AAC-S com 28 dias e 150 kPa, 450 kPa e 700 kPa para os mesmos provetes com 90 dias. A etapa final de corte foi realizada sob uma taxa de deformação constante de 0,2% por hora.

3 – RESULTADOS

3.1 – Curvas de retenção

A evolução da sucção matricial (ψ) em função do teor volumétrico de água (ou seja, a curva de retenção) é apresentada na Figura 2, para o solo original (a) e para o solo estabilizado com AAC (b) ou OPC (c). Os resultados mostram um aumento de sucção com a diminuição do teor de água para todos os materiais, o que é consequência da pressão líquida negativa entre as áreas saturadas e as zonas de humidade residual (não saturadas) do solo. É na zona de transição que se desenvolvem estas forças de sucção, responsáveis por alterar o comportamento mecânico do material. A faixa de valores de sucção no solo original é claramente menor que aquela obtida para os materiais estabilizados, principalmente quando comparado com o material AAC-S. Além disso, o valor de entrada de ar apresentado pelo solo não-estabilizado (aproximadamente 700 kPa, obtido a partir do primeiro ponto de medição representado na curva da Figura 2a), é anormalmente elevado, demonstrando que o mesmo é quase insensível a sucções até este valor.

A cimentação artificial provocou um aumento na capacidade de retenção de água do solo, evitando uma rápida diminuição entre o estado saturado e o estado residual insaturado. O teor

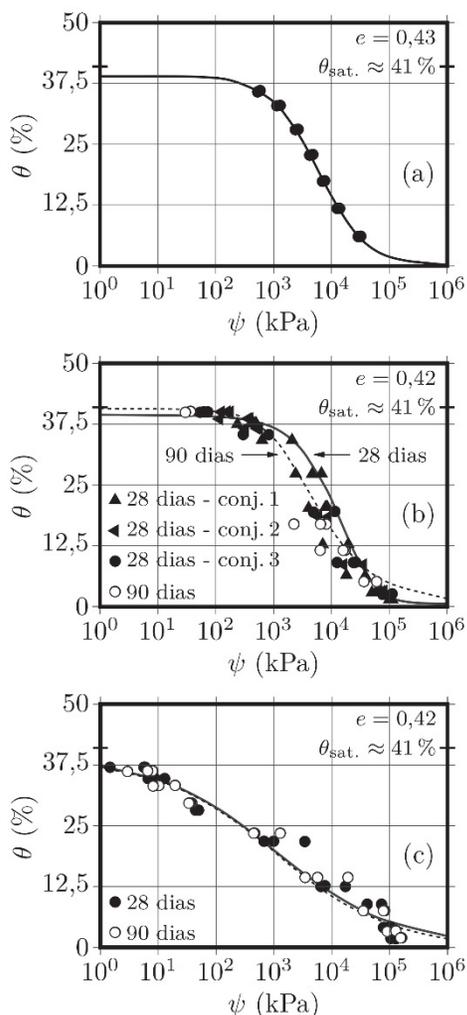


Fig. 2 – Resultados experimentais e curvas de retenção solo-água teóricas (propostas por van Genuchten) para o solo original (a), e para os materiais estabilizados OPC-S (b) e AAC-S (c) (Nota 1: os valores obtidos com cada um dos 3 papéis de filtro utilizados são apresentados; Nota 2: foram obtidos 3 conjuntos de resultados para os 28 dias de cura do material OPC-S; Nota 3: o valor teórico do teor em água para o solo original, estimado em 41%, foi utilizado para ajustar as curvas apresentadas)

volumétrico de água de saturação (θ_s) obtido para o solo original foi de 39,4%, ligeiramente inferior ao valor teórico (41%), enquanto o teor volumétrico de água residual (θ_r), correspondente ao ponto a partir do qual nenhuma água é extraída do solo, foi 0%.

Já o material OPC-S apresentou valores de saturação volumétrica de água semelhantes aos do solo original, quer após 28 dias ($\theta_s = 39,4\%$) ou 90 dias de cura ($\theta_s = 40,1\%$). Os valores de teor volumétrico de água residual, após 28 e 90 dias de cura, foram também de aproximadamente 0%. Resultados muito semelhantes foram obtidos com o material AAC-S, com valores de teor de água de saturação iguais a $\theta_s = 39,4\%$, após 28 dias ou 90 dias de cura; e valores de teor de água residual também iguais a $\theta_r = 0\%$, após ambos os períodos de cura.

O fato do valor de θ_r de 0% obtido para o solo original ter sido mantido constante após a estabilização (independentemente do ligante utilizado), indica que a estrutura porosa do material manteve a sua capacidade de remover toda a água sob o efeito de altas sucções. Um θ_r tão baixo no material estabilizado poderia indicar que alguma sucção osmótica se teria desenvolvido durante o processo de cura, mas o solo original seguiu a mesma tendência.

Outro aspeto relevante é o valor de entrada de ar obtido para cada material. Enquanto o solo natural registou aproximadamente 700 kPa, o solo estabilizado registou valores substancialmente mais reduzidos, de aproximadamente 80 kPa (OPC-S) e 5 kPa (AAC-S). As razões para esta diferença significativa requerem estudos adicionais. Contudo, considerando que o valor da entrada de ar depende principalmente da distribuição do tamanho dos poros (Fredlund e Rahardjo, 1993) ficou claro que a cimentação artificial das partículas do solo teve consequências significativas na referida distribuição de volumes de poros. No entanto, os diferentes valores de entrada de ar apresentados por cada ligante (o valor obtido no material AAC-S é inferior a 10% do valor obtido no OPC-S) e a forma significativamente diferente da curva respetiva de cada material estabilizado, sugere que cada ligante influenciou a distribuição do tamanho das partículas e, sobretudo, a distribuição de tamanhos, de uma forma muito específica e distinta.

É sabido que uma gama mais ampla de volumes de poro produz uma variação mais suave da sucção com o teor em água, enquanto uma distribuição uniforme de tamanhos é normalmente responsável por variações mais abruptas na sucção. Com base na superior variação da sucção no material AAC-S, pode supor-se que este ligante produziu uma maior variação no tamanho dos poros, seja devido à sua própria composição (nem todas as partículas de cinza volante são 'atacadas' durante a reação química que produz o gel de ligação e, portanto, permanecem como parte do esqueleto sólido), seja devido à interação entre o ligante e as partículas do solo.

O material OPC-S apresentou uma transição, entre a fases saturada e não saturada, cujo desenvolvimento está algures entre aquele apresentado pelo solo original e o apresentado pelo material AAC-S. Ou seja, os resultados para este material não indicam uma variação muito acentuada entre os 28 e 90 dias de cura, quer em termos do teor volumétrico de água de saturação ($\theta_s = 39,4\%$ e $40,1\%$, após 28 e 90 dias de cura, respetivamente) quer em termos do teor de água volumétrica residual ($\theta_r = 0,4\%$ e $0,5\%$, após 28 e 90 dias de cura, respetivamente). Constata-se portanto que a estabilização com cimento Portland produziu uma fábrica diferente, relativamente à do solo original e, inclusive, relativamente à do solo estabilizado com AAC. Independentemente da distribuição mais homogênea do gel C-H-S, o processo químico resultante da hidratação do cimento Portland aparenta ser menos interativo com a superfície das partículas do solo, resultando numa distribuição de volume de poros mais homogênea do que aquela apresentada pelo material tratado com cimento alcalino.

Por outro lado, o material AAC-S apresentou uma transição claramente mais suave, entre as fases saturada e insaturada, do que o solo original e, inclusive, mais suave do que a transição apresentada pelo material OPC-S, ao mesmo tempo que apresentou uma gama mais extensa de valores de sucção. Este comportamento está relacionado com a formação de uma nova estrutura interna do material (fábrica), formada sobretudo pela influência do gel de aluminossilicatos resultante da ativação das partículas de cinza volante, que produziu uma matriz mais compacta que inclui também as partículas que não reagiram durante o processo de ativação (Fernández-Jiménez et al., 2005). A formação do referido gel levou à segmentação dos poros, produzindo uma estrutura semelhante à de uma rocha natural, em termos moleculares (Cristelo et al., 2011). Não foram detetadas diferenças significativas na evolução da sucção deste material em função do período de cura, o que foi corroborado quer pelos valores (semelhantes) do teor em água volumétrica saturada ($\theta_s = 39,4\%$, após 28 ou 90 dias de cura), quer pelos valores de teor de água volumétrica residual ($\theta_r = 0\%$). Dada a evolução do gel de aluminossilicato ao longo do tempo (Fernández-Jiménez et al., 2005), era esperada alguma influência do tempo de cura na sucção matricial. No entanto, os resultados sugerem que, com base na complexidade do processo de formação do gel (dissolução,

condensação, precipitação, cristalização), a matriz global do gel já está formada aos 28 dias, e apenas a última fase (isto é, a cristalização) está ainda por concluir.

Os resultados sugerem igualmente que esta potencial cristalização do gel não teve qualquer influência na estrutura dos poros do material, não tendo sido por isso responsável por qualquer sucção do tipo osmótico. Sendo assim, pode dizer-se que o sistema solo-ligante não sofreu alterações posteriores às verificadas no estágio inicial de desenvolvimento do gel. Esta ideia é corroborada pelos ensaios triaxiais (apresentados em seguida), em que o material AAC-S apresentou de facto um desempenho superior aos 90 dias, em relação aos 28 dias de cura, devido precisamente ao endurecimento (cristalização) do gel ligante.

3.2 – Ensaios triaxiais

A evolução do comportamento do solo original e do solo estabilizado, obtida através de ensaios de consolidação isotrópica e de ensaios triaxiais consolidados não drenados (CU), é apresentada nas Figuras 3 a 6. A Figura 3a apresenta o solo original sob compressão isotrópica, ou seja, traduz a variação do índice de vazios (Δe) em função da tensão média efetiva (p'). Fica claro que a variação no Δe é maior que a apresentada pelos materiais estabilizados quimicamente, para uma mesma tensão efetiva média aplicada, reforçando a ideia de que a estabilização diminui a deformabilidade do material original.

A Figura 3b apresenta a curva tensão-deformação, ou seja, a tensão de desvio (q) em função da deformação axial (ϵ_a), onde é possível observar que amostras com maior tensão de consolidação apresentam maior rigidez. Nenhum pico de tensão foi observado para este material não tratado, que seguiu uma trajetória tensão-deformação pós-rotura de endurecimento, permitindo assim algum

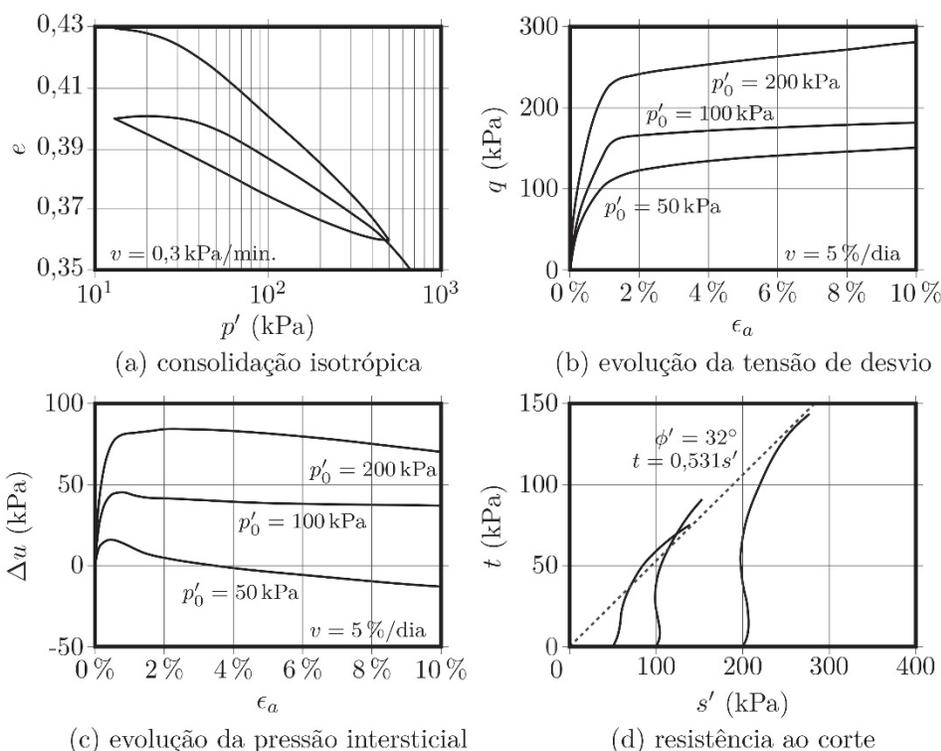


Fig. 3 – Ensaios de consolidação isotrópica e ensaios triaxiais CIU sobre o solo original (sem cimentação artificial)

aumento de carga após a plastificação, uma indicação clara não só da sua ductilidade original mas também da sua elevada capacidade de deformação (Elliott e Brown, 1985). A variação da pressão neutra (Δu) é também apresentada, na Figura 3c, mostrando um rápido aumento no início do ensaio, aumento esse que estabiliza após plastificação. Por fim, a Figura 3d apresenta a trajetória de tensões nas coordenadas s - t , a partir do qual foi estimado um o ângulo de atrito efetivo de $\phi' = 32^\circ$.

Os resultados dos ensaios triaxiais no material AAC-S são apresentados nas Figuras 4 e 5, para provetes curados durante 28 e 90 dias de cura, respetivamente. A resposta durante o ensaio de compressão isotrópica apresenta uma clara influência do período de cura, pois há uma menor variação do índice de vazios para os provetes com 90 dias, que apresentaram maior rigidez. Tal comportamento era expectável, pois este tipo de estabilização química é fortemente influenciado pela tempo decorrido desde o início das reações químicas, sendo que o intervalo de 28 dias não é normalmente suficiente para permitir a cristalização dos produtos de reação que constituem a matriz cimentícia (Cristelo et al., 2015). Portanto, é possível a existência de partículas não abrangidas pelo aumento de rigidez provocado pelo gel cimentício, provocando uma heterogeneidade (em termos de rigidez) ao longo da massa de solo estabilizado (Rodríguez et al., 2013).

Relativamente à evolução da tensão deviatória com a deformação axial, existe um claro valor de pico, ao contrário do que foi observado para o solo natural, em que se verificou um endurecimento pós-plastificação. Após atingir este pico, verifica-se uma diminuição, para ambos os períodos de cura, da tensão deviatória (amolecimento), exceto no caso do provete em que foi aplicada uma tensão de consolidação de apenas 10 kPa (proвете esse que, além disso, curou ‘apenas’ durante 28 dias). A existência de um pico na resposta destes solos estabilizados artificialmente com cinzas volantes ativas é consistente com a tendência descrita por outros autores para este tipo de estabilização

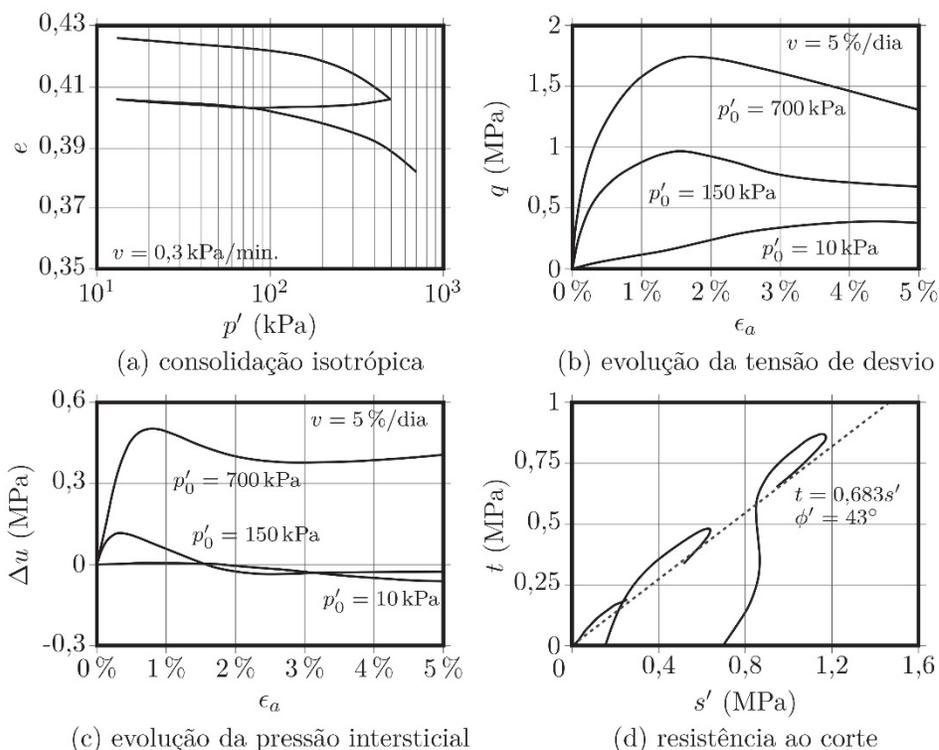


Fig. 4 – Ensaio de consolidação isotrópica e ensaios triaxiais CIU em provetes de AAC-S com 28 dias de cura.

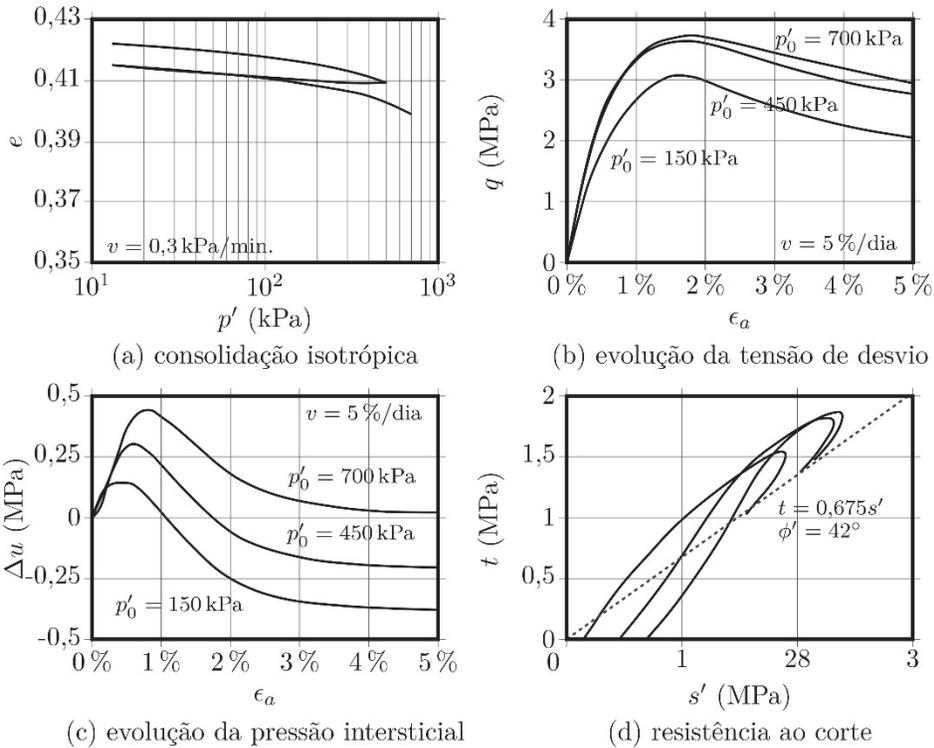


Fig. 5 – Ensaio triaxiais CIU em provetes de AAC-S com 90 dias de cura.

química (Rios et al., 2013; 2016; Silva, 2016). O material estabilizado AAC-S apresentou maior resistência e rigidez após o período de cura de 90 dias e, conseqüentemente, menor deformação em comparação com os provetes curados durante 28 dias. A estabilização química tende a apresentar uma forte dependência da evolução das reações químicas, verificando-se uma melhoria das propriedades mecânicas que, com este tipo de ligante, pode estender-se até pelo menos 1 ano após o início da cura (Cristelo et al, 2011).

Conclusões semelhantes podem ser retiradas relativamente à evolução da pressão neutra, com os materiais curados durante 90 dias a apresentar uma menor Δu , em comparação com as amostras curadas por 28 dias, em resultado do desenvolvimento da matriz cimentícia produzida pelas reações químicas. Curiosamente, a variação da pressão neutra é maior nos materiais AAC-S do que no solo natural, o que é conseqüência do menor volume de vazios no primeiro, em comparação com o mais elevado volume de vazios do solo natural, dada a ausência de gel cimentício. As envolventes obtidas para ambos os períodos de cura são também apresentadas, revelando valores de ângulo de atrito de $\phi' = 43^\circ$, aos 28 dias, e $\phi' = 42^\circ$, aos 90 dias. Por fim, a Figura 6 compara o estado geral dos provetes antes e depois de serem submetidos ao respetivo ensaio CIU.

As Figuras 7 e 8 apresentam os resultados obtidos nos materiais estabilizados com OPC-S, aos 28 e 90 dias de cura, respetivamente. Em relação ao ensaio de compressão isotrópica, é interessante observar que a variação do volume, medida pela variação do índice de vazios, é significativamente menor do que a variação apresentada pelos materiais AAC-S. Além disso, o aumento de resistência registado aos 28 dias foi significativamente superior ao obtido com os materiais à base de cimento alcalino. Isto não é surpreendente, dado que o cimento Portland apresenta normalmente uma taxa de aumento de resistência superior à dos cimentos alcalinos à base de cinzas volantes (i.e. com baixo teor em cálcio) (Cristelo et al., 2011; 2013). A influência do período de cura no cimento Portland, após 28 dias, é menos relevante. Ao contrário, os cimentos alcalinos desenvolvem uma parcela muito

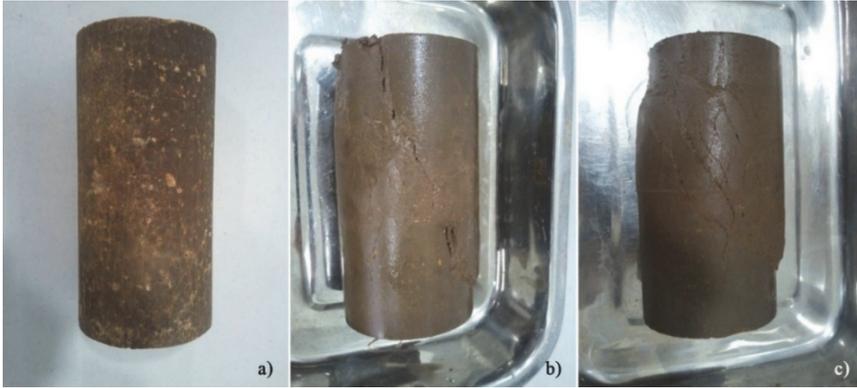


Fig. 6 – Aspeto geral dos provetes AAC-S: a) antes do ensaio, com 90 dias de cura; b) após ensaio, com 90 dias de cura e consolidados com 450 kPa; c) após ensaio, com 90 dias de cura e consolidados com 700 kPa.

significativa da sua resistência num período normalmente muito superior aos primeiros 28 dias, e que pode estender-se durante vários meses. Consequentemente, é compreensível que a variação do índice de vazios no material OPC-S, entre os 28 e 90 dias, tenha sido muito pequena, principalmente quando comparada com a variação apresentada pelo material AAC-S, para o mesmo intervalo de cura.

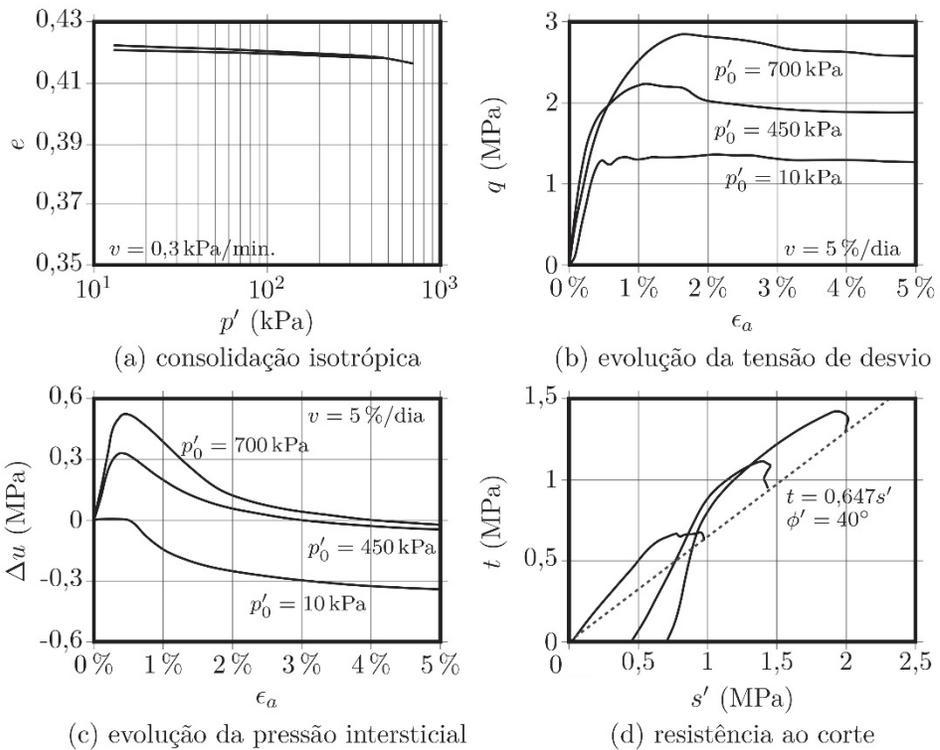


Fig. 7 – Ensaios de consolidação isotrópica e ensaios triaxiais CIU em provetes de OPC-S com 28 dias de cura.

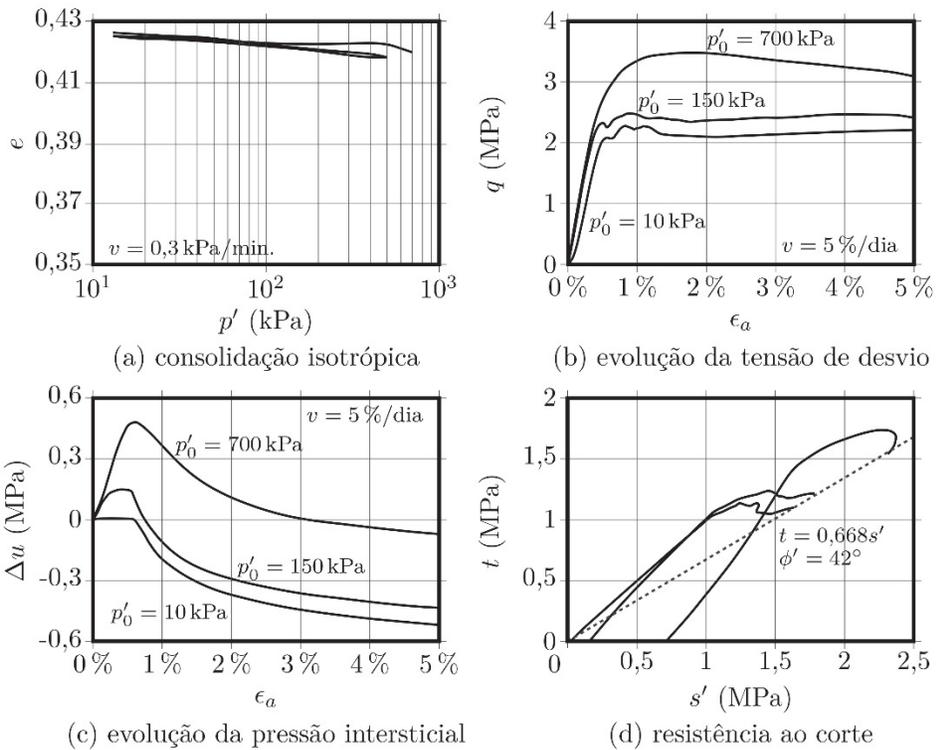


Fig. 8 – Ensaios triaxiais CIU em provetes de OPC-S com 90 dias de cura.

Uma comparação entre as curvas tensão-deformação dos 3 materiais, aos 28 dias, mostra uma tensão de plastificação superior no material OPC-S, nomeadamente em relação à obtida para o AAC-S. Porém, como foi já mencionado, as reações de hidratação responsáveis pelos aumentos de resistência do cimento Portland desenvolvem-se principalmente durante os primeiros 28 dias, atingindo 80 a 90% de sua resistência à compressão máxima durante esse período. Pelo contrário, nos primeiros 90 dias os cimentos alcalinos baseados em cinzas volantes classe F atingem apenas 40% a 60% da resistência expectável ao fim de 1 ano (Cristelo et al., 2011; 2013).

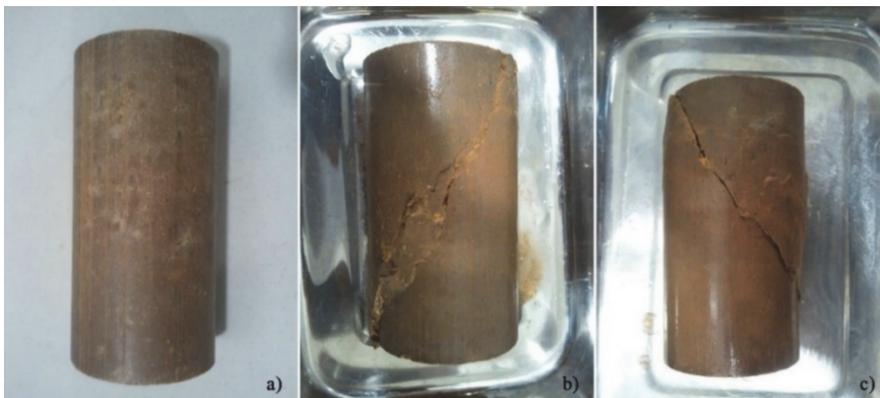


Fig. 9 – Aspeto geral dos provetes OPC-S: a) antes do ensaio, com 90 dias de cura; b) após ensaio, com 90 dias de cura e consolidados com 150 kPa; c) após ensaio, com 90 dias de cura e consolidados com 700 kPa.

A definição das envolventes de rotura no material estabilizado com CP permitiu estabelecer um ângulo de atrito efetivo de 40°, aos 28 dias. Aos 90 dias, o ângulo de atrito efetivo foi de 42°. Isto significa que a variação da componente friccional foi residual, independentemente das condições de drenagem.

A Figura 9 apresenta o aspeto de diferentes provetes de OPC-S, antes do ensaio e já ensaiados (todos com cura de 90 dias). O plano de corte é muito nítido, independentemente da tensão de consolidação, indicando um comportamento expectável em materiais artificialmente cimentados.

4 – DISCUSSÃO

Tanto quanto sabemos, esta foi a primeira vez que foram traçadas curvas de retenção de água de um solo estabilizado com cimentos alcalinos, à base de cinzas volantes. Uma vantagem muito interessante permitida por estas curvas foi o conhecimento da estrutura dos poros destes materiais, quer AAC-S quer OPC-S, apresentando o AAC-S uma curva mais larga e 'mais suave', indicando uma variação mais gradual da estrutura de vazios, em comparação com o OPC-S. Além disso, as mudanças nas curvas entre o solo original e o estabilizado sugerem que o gel ligante de alguma forma preencheu (parcialmente) os vazios do solo original, criando uma rede de poros distinta.

Os valores do grau de saturação não foram afetados por nenhum dos ligantes utilizados, nem tão-pouco pelos períodos de cura superiores a 28 dias. Contudo, o desenvolvimento das curvas de retenção é significativamente diferente, especialmente entre os ligantes AAC-S e OPC-S, mas também entre o solo natural e o estabilizado. Estas diferenças centram-se no tipo de desenvolvimento apresentado pelas respetivas curvas, especialmente entre os dois tipos de estabilização, com o cimento Portland a produzir uma transição mais abrupta, contrariamente ao cimento alcalino, que gerou uma transição marcadamente mais suave. Estas diferentes curvas de retenção traduzem diferentes fábricas nos dois materiais, que certamente influenciaram os resultados dos ensaios triaxiais.

Após 28 dias de cura, o material OPC-S apresentou tensões desviatórias de pico superiores às do material AAC-S, mas o oposto foi observado após 90 dias. Tal diferença não está relacionada com a sucção existente nos provetes durante a etapa de corte, já que todos os provetes passaram para uma saturação prévia, mas provavelmente com a distribuição mais heterogênea do volume de poros do AAC-S, que produziu uma estrutura mais compacta e densa, que poderia ser corresponsável pelos valores de resistência apresentados por este material. Isto é consistente com os resultados obtidos após 28 dias, quando o gel ainda está num estágio inicial de desenvolvimento, devendo, portanto, apresentar um pico desviatório significativamente menor; ou após 90 dias, quando apresentou níveis de resistência superiores aos do material OPC-S.

O outro fator que contribuiu para a maior tensão de desvio apresentada pelo AAC-S, após 90 dias, foi a qualidade do seu gel ligante, que, a essa altura, já estaria mais desenvolvido e numa fase mais avançada do processo de cristalização (Cristelo et al., 2011). A maior tensão desviatória do OPC-S aos 28 dias de cura está relacionada com a superior velocidade de ganho de resistência inicial deste ligante, que é significativamente superior à do ligante AAC-S. Pelo contrário, os cimentos alcalinos à base de cinzas volantes levam vários meses para se desenvolverem completamente. A quantificação da contribuição relativa destes dois fatores necessitará de mais estudos.

A semelhança das curvas AAC-S aos 28 e 90 dias de cura também é esclarecedora em termos da formação do seu gel ligante. Estes resultados indicam que a estrutura do gel (ou seja, a sua distribuição dentro do volume dos poros) é formada numa idade precoce (não mais de 28 dias) e, a partir daí, o desenvolvimento do gel (corroborado pelo aumento da resistência clara entre 28 e 90 dias) é principalmente devido à sua cristalização. A semelhança entre ambas as curvas de retenção do material OPC-S também indica que a estrutura do gel estava já instalada aos 28 dias. Porém, neste caso, a estrutura do gel não só se formou após 28 dias, como a sua evolução também já estaria praticamente terminada nessa altura.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho experimental mostraram que este tipo de ligante é uma alternativa válida aos ligantes à base de cimento Portland, normalmente utilizados na estabilização de solos. As curvas de retenção do solo original e do solo estabilizado apresentaram diferenças consistentes, permitindo uma interpretação mais profunda da estrutura do volume de poros de cada solução:

- Os valores iniciais de entrada de ar são substancialmente diferentes para o solo e respectivas soluções de estabilização, apesar de teores em água de saturação semelhantes. O elevado valor de entrada de ar do solo natural indica que ele permanece saturado até valores de sucção muito superiores aos observados para o OPC-S ou AAC-S.
- A estrutura solo-gel já está formada após 28 dias, resultando em curvas semelhantes para ambos os períodos de cura. Isto é particularmente surpreendente no caso do gel de cimento alcalino, conhecido por ter um período de desenvolvimento superior a 28 dias.
- As maiores tensões desviatórias apresentadas pelo AAC-S após 90 dias, em comparação com os valores do OPC-S para o mesmo período, não estão relacionadas com a evolução da estrutura do volume de poros, mas sim com o desenvolvimento e cristalização do gel.
- A sucção matricial é claramente influenciada pelo tipo de estabilização química, no que diz respeito à forma das curvas de retenção e respetivos valores de entrada de ar, sugerindo que os resultados obtidos abrem a possibilidade de utilização da curva de retenção para avaliar a eficácia do processo de estabilização, quando à base de cimentos alcalinos.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM C 618 - 12 (2012). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. Annual Book of ASTM Standards 2012, vol. 04.02, pp 1-5.
- ASTM D 2487 - 06 (2006). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. Annual Book of ASTM Standards 2006, vol. 04.08, pp 1-12.
- ASTM D 3282 - 15 (2015). *Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. Annual Book of ASTM Standards 2015, vol. 04.08, pp 1-6.
- ASTM D 5298 - 16 (2016). *Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper*. Annual Book of ASTM Standards 2012, vol. 04.08, pp 1-6.
- BS 1377-4 (1990). *Methods of test for soils for civil engineering purposes, Part 4: Compaction-Related Tests*. British Standards Institution, London, 4 p.
- BS 1377-8 (1990). *Methods of test for soils for civil engineering purposes, Part 8: Shear strength tests (effective stress)*. British Standards Institution, London, 8 p.
- Corrêa-Silva, M.; Araújo, N.; Cristelo, N.; Miranda, T.; Topa Gomes, A.; Coelho, J. (2019). *Improvement of a clayey soil with alkali activated low-calcium fly ash for transport infrastructures applications*. Road Materials and Pavement Design, 20(8), pp. 1912–1926. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1473286>
- Cristelo, N.; Glendinning, S.; Pinto, A. T. (2011). *Deep soft soil improvement by alkaline activation*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement, 164(2), pp. 73–82. <https://doi.org/10.1680/grim.900032>

- Cristelo, N.; Glendinning, S.; Miranda, T.; Oliveira, D.; Silva, R. (2012). *Soil stabilisation using alkaline activation of fly ash for self compacting rammed earth construction*. Construction and Building Materials, 36(11), pp. 727–735. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.037>
- Cristelo, N.; Glendinning, S.; Fernandes, L.; Pinto, A.T. (2013). *Effects of alkaline-activated fly ash and Portland cement on soft soil stabilisation*. Acta Geotechnica, 8(4), pp. 395–405. <https://doi.org/10.1007/s11440-012-0200-9>
- Cristelo, N.; Miranda, T.; Oliveira, D.; Rosa, I.; Soares, E.; Coelho, J.; Fernandes, L. (2015). *Assessing the production of jet mix columns using alkali activated waste based on mechanical and financial performance and CO₂(eq) emissions*. Journal of Cleaner Production, 102, pp. 447–460. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.102>
- Elliott, G. M.; Brown, E. T. (1985). *Yield of a soft, high porosity rock*. Géotechnique, 35(4), pp. 413–423. <https://doi.org/10.1680/geot.1985.35.4.413>
- Fernández-Jiménez, A.; Palomo, A.; Criado, M. (2005) *Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model*. Cement and Concrete Research, 35(6), pp. 1204–1209. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.021>
- Fernández-Jimenez, A.; Torre, A.G. de la; Palomo, A.; López-Olmo, G.; Alonso, M.M.; Aranda, M.A.G. (2006). *Quantitative determination of phases in the alkali activation of fly ash. Part I. Potential ash reactivity*. Fuel, 85(5–6), pp. 625–634. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.08.014>
- Fredlund, D. G.; Gitirana Jr.; G. (2005). *Unsaturated Soil Mechanics as a Series of Partial Differential Equations*. in Proceedings of International Conference on Problematic Soils. Eastern Mediterranean University, Famagusta, N. Cyprus, pp. 25–27.
- Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470172759>.
- Fredlund, D. G.; Xing, A. (1994). *Equations for the soil-water characteristic curve*. Canadian Geotechnical Journal, 31(4), pp. 521–532. <https://doi.org/10.1139/t94-061>
- Gens, A. (2010). *Soil–environment interactions in geotechnical engineering*. Géotechnique, 60(1), pp. 3–74. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.9.P.109>
- Van Genuchten, M. T. (1980). *A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils*. Soil Science Society of America Journal, 44(5), p. 892. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Han, Z.; Vanapalli, S. K. (2016). *Stiffness and shear strength of unsaturated soils in relation to soil-water characteristic curve*. Géotechnique, 66(8), pp. 627–647. <https://doi.org/10.1680/jgeot.15.P.104>
- Lu, N.; Likos, W. J. (2004) *Unsaturated Soil Mechanics*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Manuel, E. (2013) *Melhoria do solo residual granítico com recurso à activação alcalina de cinzas volantes*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro Escola de Ciências e Tecnologia .
- Pourakbar, S.; Asadi, A.; Huat, B. B. K.; Cristelo, N.; Fasihnikoutalab, M. H. (2017). *Application of Alkali-Activated Agro-Waste Reinforced with Wollastonite Fibers in Soil Stabilization*, Journal of Materials in Civil Engineering, 29(2), p. 04016206. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001735](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001735)
- Ridley, A. M.; Burland, J. B. (1993). *A new instrument for the measurement of soil moisture suction*. Géotechnique, 43(2), pp. 321–324. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.2.321>

- Rios, S.; Viana da Fonseca, A.; Baudet, B. A. (2013). *On the shearing behaviour of an artificially cemented soil*. Acta Geotechnica, 9(2), pp. 215–226.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11440-013-0242-7>
- Rios, S.; Cristelo, N.; Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C. (2016). *Structural performance of alkali-activated soil ash versus soil cement*. Journal of Materials in Civil Engineering, 28(2): 04015125. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001398](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001398)
- Rios, S.; Cristelo, N.; Miranda, T.; Araújo, N.; Oliveira, J.; Lucas, E. (2018). *Increasing the reaction kinetics of alkali-activated fly ash binders for stabilisation of a silty sand pavement sub-base*. Road Materials and Pavement Design, 19(1), pp. 201–222.
<http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2016.1251959>
- Rodrigues, C.; Rodrigues, P.; Cruz, N.; Rios, S.; Viana da Fonseca, A. (2016). *Estabilização de solos com geopolímeros para camadas de leito de estradas*. in 15º Congresso Nacional de Geotecnia e 8º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia.
- Rodríguez, E. D.; Bernal, S.; Provis, J.; Paya, J.; Monzo, J.; Borrachero, M. (2013). *Effect of nanosilica-based activators on the performance of an alkali-activated fly ash binder*. Cement and Concrete Composites, 35(1), pp. 1–11.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.025>
- Silva, M. C. A. da (2016). *Melhoramento de um solo argiloso com recurso à ativação alcalina de resíduos para aplicação em infraestruturas de transporte*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho.
- Silva, R. A.; Oliveira, D.; Miranda, T.; Cristelo, N.; Escobar, M.; Soares, E. (2013) *Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal*. Construction and Building Materials, 47, pp. 181–191. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.047>
- Topa Gomes, A.; Viana da Fonseca, A.; Silva Cardoso, A. (2011) *Soil water characteristic curve for a granite residual soil: Experimental and numerical results*, in Defect and Diffusion Forum, 312, pp. 1172–1177. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.312-315.1172>