EFEITO DO TEMPO DE CURA NA RESISTÊNCIA E DEFORMABILIDADE DE UM SOLO ARGILOSO LIGADO COM CIMENTO

Effect of the curing time on the strength and deformability of a cement bound clayey soil

Teresa Santana[a], João Dias[b], Pedro Lamas[c]

[a] UNIC, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, Portugal
[b] EDP Valor-Gestão Integrada de Serviços, S.A, Lisboa, Portugal
[c] GeoBioTec, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, Portugal

RESUMO – Este trabalho apresenta os resultados laboratoriais de um solo argiloso ligado com cimento, utilizando um cimento Portland, CEM IV/A 32,5 R, adicionado nas percentagens de 8 % e 12 % em relação à massa seca do solo. Foram realizados ensaios de compressão não confinada, em provetes compactados num molde Proctor com um teor em água ótimo (owc), para diferentes tempos de cura até 90 dias. Os resultados mostram que o uso de cimento permite um aumento na resistência à compressão de 30% até 7 dias de cura e apenas um aumento de 6% dos 7 aos 90 dias de cura, para os dois teores em cimento estudados. São propostas correlações entre a resistência à compressão não confinada, R_c e a percentagem de cimento e o tempo de cura, bem como para o módulo de deformabilidade secante, E_{30}, permitindo prever, a longo prazo, o comportamento dessas misturas, conhecendo as propriedades de compactação e resistência do solo utilizado.

ABSTRACT – This work presents the laboratory results of a cement bound clayey soil, using a Portland cement, CEM IV/A 32,5 R, added in the proportions of 8 % and 12 % relative to the dry mass of soil. Unconfined compression tests were conducted on specimens compacted in a Proctor mould, under the optimum water content (owc), for different curing times up to 90 days. The results show that the use of cement allows an increase in the unconfined compression strength of 30 % up to 7 days of curing time and only an increase in 6 % from 7 to 90 days of curing time, for the two cement contents studied. Correlations between unconfined compression strength, R_c and the percentage of cement and the curing time are proposed, as well as for the secant Young's modulus, E_{30}. The models enable the long-term prediction of the behaviour of those mixtures, knowing the compaction and strength properties of the soil used.

Palavras Chave - solo ligado com cimento, resistência à compressão, tempo de cura.

Keywords - cement bound soil, unconfined compression strength, curing time.

1 – INTRODUÇÃO

Solo tratado com cimento refere-se a um material onde o cimento é responsável pelas características de presa e endurecimento, através de reação pozolânica que lhe confere propriedades melhoradas.

E-mails: mtgs@fct.unl.pt (T. Santana), jjd19227@campus.fct.unl.pt (J. Dias), pcl@fct.unl.pt (P. Lamas)

ORCID: orcid.org/0000-0002-1691-8153 (T. Santana), orcid.org/0000-0002-1530-8126 (P. Lamas)

A utilização de solos tratados com cimento é uma prática corrente em muitos países para atender à indisponibilidade local de materiais de boa qualidade (Neves et al., 2023)

De acordo com a EN 14227-10 (2013), os solos tratados com cimento são divididos em dois grupos: solos estabilizados com cimento e solos ligados com cimento. Neste último caso, exige-se que a mistura atinja uma integridade estrutural, medida diretamente pela resistência à compressão não confinada, ou por ensaios de resistência à tração e módulo de deformabilidade. O presente estudo refere-se a este último caso, solo ligado com cimento, em que o solo e o cimento são misturados mecanicamente até obter uma mistura homogénea que obedeça às referidas propriedades. Além disso, o processo de colocação destas misturas inclui geralmente compactação, pelo que estas misturas precisam de estar com um teor em água próximo do ótimo para um determinado nível de energia de compactação. Neste sentido, o solo ligado com cimento tem sido utilizado para o melhoramento da capacidade de carga dos terrenos que suportam aterros, vias rodoviárias e ferroviárias e fundações de estruturas.

Muitos estudos de misturas de solo e cimento têm sido descritos na literatura, designadamente em obras geotécnicas. No entanto, muitos destes estudos referem-se a tratamento de solos com elevados teores em água naturais, próximos do limite de liquidez, como é o caso de "deep soil mixing" e "jet grouting", em que a relação água/cimento (A/C) desempenha um papel primordial, como na tecnologia do betão, o que não é o caso dos solos ligados com cimento. Nestes, um teor em água próximo do ótimo significa que estas misturas são curadas num estado não saturado em que o teor em água não reflete a quantidade de vazios.

Segundo Nusit et al. (2017), o desempenho estrutural do solo ligado com cimento é essencialmente influenciado pelo tipo e teor em cimento, pela porosidade da mistura, pelo tipo de solo, tempo de cura e grau de compactação Uma correta avaliação das características de resistência e de deformabilidade destas misturas deve ter em consideração as características de compactação a fim de obter uma dosagem mínima de cimento que possa garantir o desempenho mecânico requerido, requisito esse que tem sido correntemente usado para fins de investigação (Consoli et al., 2012; Jiang e Fan, 2013; Rios et al., 2016; Consoli et al., 2017; Pongsivasathit et al., 2019; Moreira et al., 2019; Solihu, 2020 e Santana et al., 2021).

Neste estudo, a aplicação do solo ligado com cimento é igualmente considerada em relação às suas características de compactação. Para o efeito, é utilizada uma areia argilosa natural, extraída no concelho de Almada, Portugal, misturada com 8 % e 12 % de cimento em relação à massa seca do solo. Para cada dosagem de cimento, são realizados ensaios de compactação, utilizando uma energia do Proctor modificado para avaliar a quantidade de água que conduz a um teor em água ótimo (owc) e a um peso volúmico seco máximo (mdd). Com base no teor em água ótimo são definidas as dosagens de água a adicionar a cada uma das misturas. São então preparados provetes cilíndricos, com a mesma energia de compactação, e ensaiados à compressão não confinada para tempos de cura de 0, 7, 28 e 90 dias, com medição de deslocamentos. As curvas tensão deformação obtidas permitem, após correcão, a determinação do módulo de deformabilidade secante, E_{30}. São assim estabelecidas relações entre a resistência à compressão não confinada, R_c e E_{30} para o solo e ambos os teores em cimento, bem como para os quatro tempos de cura, fornecendo as ferramentas necessárias ao estabelecimento de dosagens de misturas, tendo em consideração o comportamento a longo prazo.

2 – MATERIAIS

2.1 – Solo

Para este estudo, foi retirada uma amostra de solo argiloso de uma barreira em frente a uma estrada local no concelho de Almada, a sul de Lisboa. O local de recolha é indicado na Figura 1. A formação miocénica de onde foi retirada a amostra de solo pertence, em termos cronoestratigráficos, à parte inferior do estágio serravaliano e corresponde à unidade "argilas azuis de Xabregas" (Cotter,

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 158 – julho/julio/july 2023 – pp. 25-47
https://doi.org/10.14195/2184-8394_158_2 – © 2023 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

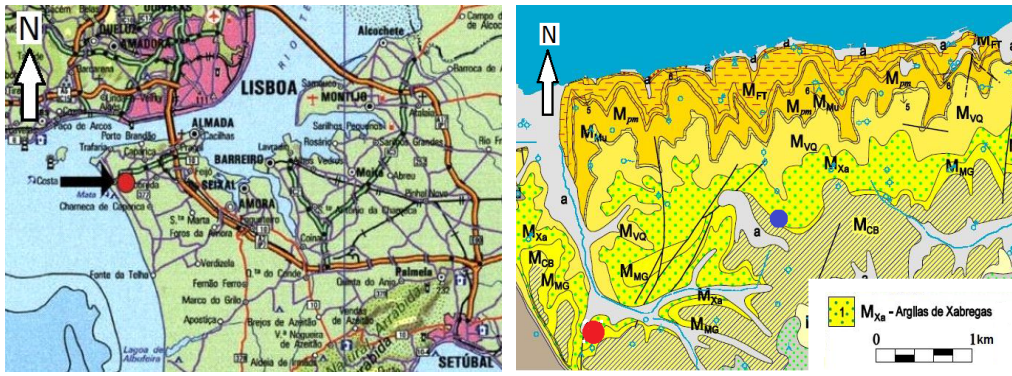

Fig. 1 – Localização, a vermelho, do ponto de recolha do solo em estudo e enquadramento geológico do mesmo (Pais e Legoinha, 2004)

1956). Ocupa uma área relativamente importante ao longo do cume aplanado e da suave encosta virada a sul da costeira de Almada, abrangendo uma área que, desde a década de 80 do século passado, sofreu uma progressiva ocupação urbana.

Segundo Jonet (1972) e Antunes et al. (1992), esta unidade tem cerca de 15 m de espessura na parte mais ocidental da serra de Almada. Em estudos mais recentes, entretanto, Pais e Legoinha (2004) baseados em observações em outro local, afirmam que a espessura máxima observada não ultrapassa os 10 m. Essa diferença de espessura pode ser decorrente de uma variação lateral na possança dos depósitos, já que os locais de observação distam cerca de 5 km um do outro. Esta unidade é composta essencialmente por camadas argilo-siltosas algo piritosas, de cor azul-acinzentada se não alteradas, em sucessão rítmica com finos leitos de arenito ricos em fósseis com conchas bem preservadas. Como se pode ver na Figura 1, a unidade "argilas azuis de Xabregas" está assinalada na carta geológica como Mxa, junto à foz do rio Tejo. A oeste, esta unidade de argilas azuis desempenha um papel proeminente na morfologia da arriba fóssil da Costa da Caparica (Lamas e Rodrigues Carvalho, 2005).

Duas sondagens geotécnicas, realizadas no campus da Universidade NOVA de Lisboa, marcadas com um ponto azul na Figura 1, atravessaram esta unidade e, com base em descrições visuais das amostras recolhidas, foram obtidos 63% a 67% de solos argilosos a siltosos. Os restantes 33 - 37% das amostras foram classificadas principalmente como areias de grão fino e mais raramente (não mais do que 1% da espessura total da unidade) arenitos carbonatados compactos. Descrições visuais de barreiras rodoviárias (Jonet, 1972) corroboram essas proporções entre solos finos, siltosos a argilosos e solos arenosos mais grosseiros atestando, aliás, a própria denominação de "argilas azuis de Xabregas".

A amostra de solo foi recolhida no seu estado natural, por escavação com ferramenta manual, em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios previstos. A amostra assim obtida foi armazenada e transportada com todo o cuidado para evitar qualquer tipo de contaminação. Apesar de não existirem solos homogéneos na Natureza, era importante obter uma certa homogeneidade das amostras ensaiadas, pelo que se utilizou a técnica de esquartelamento. Para a distribuição granulométrica seguiu-se a norma EN ISO 17892-4 e os resultados da análise granulométrica são mostrados na Figura 2 (Dias, 2012). A distribuição da dimensão das partículas mostra que 40% das mesmas são de granulometria fina (< # 200).

Para a obtenção dos valores dos limites de consistência do solo estudado seguiu-se o procedimento descrito na norma portuguesa NP 143 (1969), tendo-se obtido 32 % para o limite de liquidez, 21 % para o limite de plasticidade e 11 % para o índice de plasticidade.

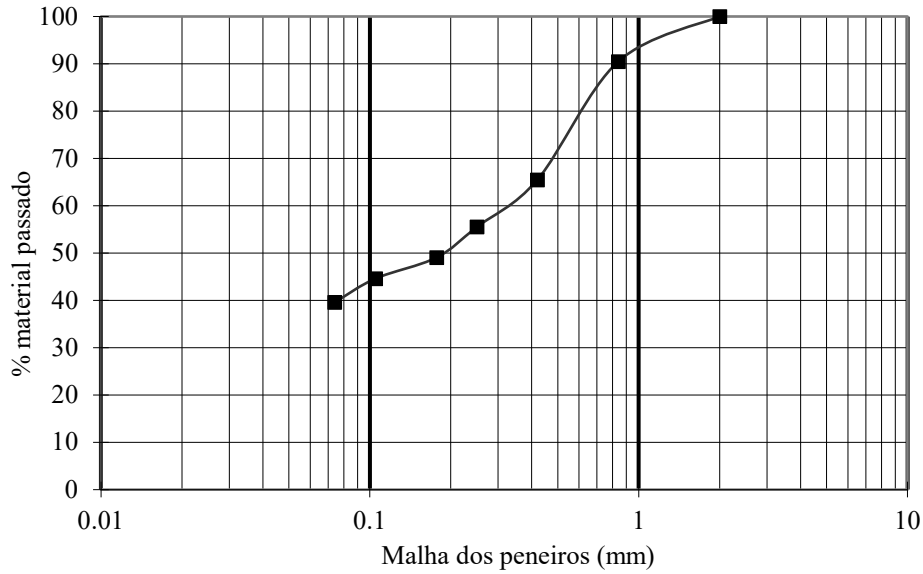

Fig. 2 – Curva granulométrica do solo

Os valores obtidos para o solo em estudo cumprem a especificação do LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) que determina as características dos solos a estabilizar com cimento em termos de granulometria e de limites de consistência (LNEC E 243, 1971). A especificação refere que, para o peneiro de malha 4.74 mm, a percentagem de material passado deve ser igual ou superior a 80 % o valor do limite de liquidez deve ser inferior a 45%. Com base nesta caracterização, foi feita a classificação do solo usando duas classificações: a classificação Unificada e a classificação para fins rodoviários. As propriedades físicas do solo estão resumidas no Quadro 1.

Quadro 1 – Propriedades físicas do solo

Propriedade	Norma	Valor
Limite de liquidez (%)	NP 143	32
Limite de plasticidade (%)	NP 143	21
Índice de plasticidade (%)	NP 143	11
Areia média (0.42-2.0 mm) (%)	EN ISO 17892-4	34.5
Areia fina (0.074-0.42 mm) (%)	EN ISO 17892-4	25.9
Teor em finos (<0.074 mm) (%)	EN ISO 17892-4	39.6
Diâmetro efetivo (mm)	D_{50}	0.2
Teor matéria orgânica (%)	E LNEC 201	0.86
Densidade das partículas sólidas	G	2.64
Classificação unificada	ASTM D 2487	SC
Classificação AASHTO	AASHTO M145-42	A-6 (14)

Segundo a Classificação Unificada, proposta pela norma ASTM D 2487-06 (2006), o solo em estudo é designado por areia argilosa (classe - SC). Quanto à classificação para fins rodoviários, (AASHTO M145-42), o solo em estudo possui mais de 35% de material que passa no peneiro nº 200, inserindo-se assim no grupo A-6 – Solos Argilosos, onde o limite de liquidez pode atingir, no máximo, o valor de 40% e o índice de plasticidade mínimo é igual a 11%. Para este solo a classificação é designada por A-6 (14), em que o índice de grupo é menor que 16, o que significa que este solo possui um comportamento "regular a mau" para esse efeito, tendo, portanto que se

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 158 – julho/julio/july 2023 – pp. 25-47
https://doi.org/10.14195/2184-8394_158_2 – © 2023 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

adicionar uma maior percentagem de cimento para a sua estabilização, quando comparado com outros solos que possuem melhor comportamento.

2.2 – Cimento

O cimento utilizado foi o cimento Portland IV, classificação obtida com base na norma do IPQ (Instituto Português da Qualidade), NP EN 197-1. É um cimento pozolânico de alta resistência química utilizado no fabrico de betões e argamassas sujeitos a ambientes agressivos e em todas as obras com exigências específicas de durabilidade. É especialmente indicado para pavimentos rodoviários, betonagens em meios agressivos, ambiente marítimo e misturas de solo-cimento. Este cimento pozolânico contém adição de pozolana que varia entre 15 e 50 %, em massa. Este alto teor de pozolana confere ao cimento uma baixa permeabilidade e consequentemente durabilidade, proporciona estabilidade em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos. O uso deste cimento confere resistência mecânica à compressão superior ao cimento comum (tipo I) a longo prazo. Ao contrário dos solos, o cimento Portland é um produto industrial, manufaturado sob normas rígidas de qualidade, assegurando uniformidade de comportamento, o que o torna um material económico e de fácil utilização. As propriedades do cimento estão indicadas no Quadro 2. Além disso este cimento é muito fino, com 100% de partículas menores que o peneiro 200 (<0.074 mm) e tem uma densidade das partículas sólidas de 3.15.

O cimento utilizado foi armazenado em recipiente de plástico e adequadamente vedado para evitar a sua hidratação prematura em função da humidade do ar.

Quadro 2 – Propriedades do cimento Portland

Propriedade	Norma	Valor
Constituintes (%)	NP EN 197-1	>69 K >26 CV
Perda ao fogo (%)	NP EN 197-1	2.3
Resíduo insolúvel (%)	NP EN 197-1	26.3
Superfície específica (Blaine) (cm^2/g)	NP EN 196-6	4292
Resistência à compressão 28 d (MPa)	NP EN 196-1	44.3
Tempo de presa (min)	NP EN 196-3	>75

2.3 – Água

A água é um componente essencial deste tipo de misturas, dado que o cimento é um ligante hidráulico, ou seja, só ganha presa quando em presença da água. As características a que a água deve obedecer encontram-se fixadas na especificação do LNEC E 304 (1974). Segundo esta especificação, a água não deve conter óleos, ácidos ou qualquer outra substância prejudicial ao cimento, podendo ter até 36g/l de sais em solução, até 5g/l de matéria orgânica e substâncias em suspensão e até 0.2% de sulfatos (quando somada com a percentagem de sulfatos do solo). A água utilizada neste trabalho é da rede pública admitindo-se que todas as condições referidas se encontram garantidas.

3 – MISTURAS DE SOLO LIGADAS COM CIMENTO

3.1 – Ensaios de compactação

Segundo o ACI (1990), a percentagem de cimento recomendada para um solo do tipo A-6, varia entre os 9 e os 15%, sendo o valor típico usado igual a 12% de cimento em função da massa seca de solo. Com base nestes dados foram definidas as seguintes percentagens de cimento a utilizar neste trabalho: 12%, visto ser a percentagem típica para este tipo de solo, e 8%, um valor percentual abaixo

do recomendado. As percentagens de cimento foram determinadas em relação à massa de solo seco. Para cada tipo de mistura foi criada uma nomenclatura, tendo-se adotado a letra "C" para designar a inclusão do cimento e incluindo-se o valor da percentagem. Assim S8C refere-se a misturas de solo com 8% de cimento, S12C representa as misturas de solo com 12% cimento e a letra S corresponde a provetes constituídos só por solo.

Além da caracterização das propriedades físicas do solo, já mencionadas, o programa experimental incluiu a determinação dos pesos volúmicos secos máximos e dos teores em água ótimos do solo e das misturas solo-cimento a serem utilizadas neste trabalho. As misturas foram compactadas em molde Proctor, de aço inoxidável, com 102 mm de diâmetro e 117 mm de altura, utilizando uma energia de compactação do Proctor modificado de E=2800 N.m/m^3 com pilão pesado, em 5 camadas, com 25 pancadas por camada e uma altura de queda de 475 mm.

Esta energia de compactação é representativa do processo de compactação de aterros de estradas e é determinada a partir da expressão:

$$E = \frac{B \cdot n \cdot W \cdot h}{V} \tag{1}$$

em que:

- E é a energia de compactação (N.m/m^3);
- B é o número de pancadas por camada;
- n é o número de camadas;
- W é o peso do pilão (N);
- h é a altura de queda do pilão (m);
- V é o volume do molde (m^3).

As curvas de compactação obtidas para cada um dos materiais são apresentadas na Figura 3. Os teores em água foram medidos imediatamente após cada ensaio de compactação. O teor em água ótimo (owc) do solo natural (sem cimento) é de 13.1 % e o correspondente peso volúmico seco máximo (mdd), $\gamma_{d\,máx}$, é igual a 18.4 kN/m^3. Esses resultados para todas as misturas podem ser vistos no Quadro 3, onde S é o solo natural (sem cimento), S8C e S12C são as misturas de solo com 8% e 12% de cimento, respetivamente, como explicado anteriormente.

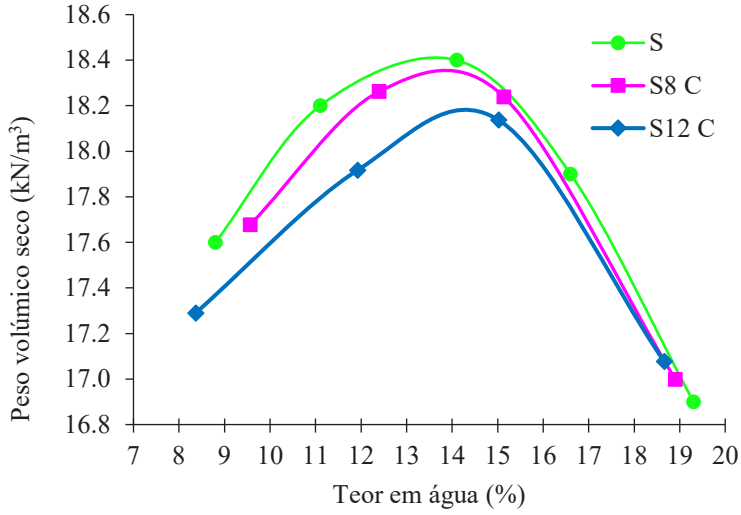

Fig. 3 – Curvas de compactação

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 158 – julho/julio/july 2023 – pp. 25-47
https://doi.org/10.14195/2184-8394_158_2 – © 2023 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Quadro 3 – Resultados dos ensaios de compactação

Mistura	Cimento (%)	w_{opt} (%)	$\gamma_{d\ máx}$ (kN/m^3)
S	0	13.1	18.4
S8C	8	13.5	18.3
S12C	12	14.1	18.1

Para a energia de compactação utilizada, as misturas de solo ligado com cimento têm pesos volúmicos secos máximos inferiores ao solo e o teor em água ótimo aumenta com o aumento da quantidade de cimento, como se as misturas de solo ligado com cimento fossem compactadas com energias mais baixas ou como se um material mais fino fosse compactado. Uma explicação para a menor energia pode ser o fato de que, no solo ligado com cimento, o processo de hidratação ocorre imediatamente após o contato do cimento com a água. Este processo envolve o endurecimento da mistura de solo, o que significa que é necessário compactar a mistura de solo o mais rápido possível. Qualquer atraso na compactação pode resultar no endurecimento da massa da mistura e, portanto, pode ser necessário uma energia de compactação adicional para produzir o mesmo efeito. Por outro lado, as misturas de solo ligado com cimento são de facto materiais mais finos, devido ao aumento da quantidade de finos, induzido pela adição de cimento (Ikhlef et al., 2015).

Conforme mencionado anteriormente, o cimento utilizado neste estudo possui 100% de partículas menores que 0.074 mm, donde resultam as curvas granulométricas teóricas de cada mistura, apresentadas na Figura 4, sendo possível confirmar que se trata de materiais mais finos.

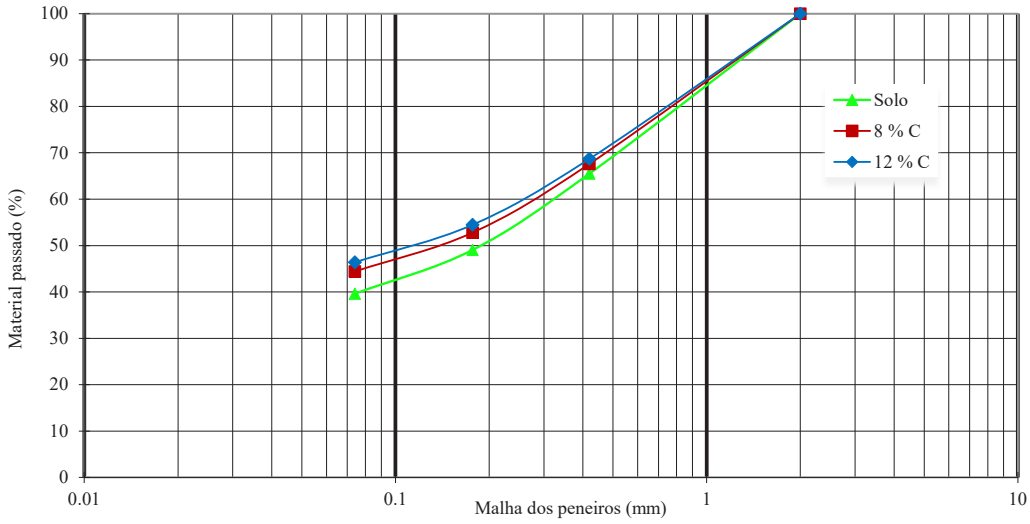

Fig. 4 – Curvas granulométricas das misturas de solo ligadas com cimento

3.2 – Moldagem e cura dos provetes

O programa experimental foi conduzido sobre amostras das misturas de solo ligado com cimento preparadas com o teor em água ótimo, determinado anteriormente pelo ensaio de compactação Proctor, expresso em percentagem da massa seca de solo e cimento. Fica assim estabelecida a dosagem de água a adicionar, tendo-se procedido à moldagem dos diferentes provetes para posteriormente se realizarem os ensaios de resistência à compressão não confinada com medição de deformações.

Para a moldagem, todas as amostras foram preparadas de forma semelhante. Como os tempos de cura ensaiados foram 0, 7, 28 e 90 dias, foi necessário preparar 27 provetes: 3 para o solo natural (sem tempo de cura) e 12 para cada uma das outras duas misturas (SC8 e SC12). Foi usado o mesmo molde Proctor para todos os ensaios de compactação.

O solo foi seco ao ar e peneirado no peneiro de 4 mm para eliminar o material mais grosseiro. Em seguida, foi determinado o teor em água natural do solo. Isso permitiu obter o peso seco do solo e calcular a percentagem desejada de cimento (por peso seco de solo) a ser adicionada. Em seguida, o solo e o cimento foram pesados e misturados até que a mistura adquirisse uma consistência uniforme.

A quantidade de água a ser adicionada a cada mistura (solo natural humedecido e cimento) foi estabelecida pela equação:

$$\Delta W_w = W_t \frac{w_{opt} - w_{nat}}{1 + w_{nat}} \tag{2}$$

em que:

ΔW_w é a água a adicionar (em peso);
W_t é o peso inicial da amostra de solo húmido+cimento;
w_{opt} é o teor em água requerido para a mistura;
w_{nat} é o teor em água natural do solo húmido.

Posteriormente, todos os componentes foram bem misturados, até formar uma pasta homogénea. Em seguida a mistura foi compactada, como nos ensaios de compactação, no molde Proctor.

O tempo de preparação (mistura e compactação) foi sempre inferior a uma hora, muito menor que o tempo de presa do cimento Portland utilizado. Após a compactação, o provete foi imediatamente extraído do molde e o seu peso, diâmetro e altura medidos.

Em seguida, os provetes foram acondicionados em sacos de plástico, adequadamente vedados para evitar variações significativas de humidade e, por último, foram armazenados e curados durante o período de cura definido, num ambiente com temperatura e humidade controladas (temperatura de 23º ± 2 ºC e humidade relativa do ar aproximadamente 85%).

No final, foram considerados aptos para os ensaios de resistência à compressão não confinada, os provetes que respeitavam as seguintes tolerâncias:

- peso volúmico seco (γ_d): grau de compactação no mínimo de 95% sendo o grau de compactação definido como o valor de γ_d efetivamente obtido na moldagem dividido pelo valor de γ_d definido como objetivo;
- teor em água (ω): valor especificado ± 2 pontos percentuais;
- dimensões: diâmetro 102 ± 1 mm e altura 117 ± 1 mm.

Devido à dispersão típica dos resultados de ensaios de compressão não confinada, foram preparados três provetes para cada ensaio.

3.3 – Ensaios de compressão não confinada

De acordo com a EN 14227-10 (2013), a resistência à compressão não confinada, R_c, é o parâmetro para quantificar a resistência dessas misturas.

A preparação e as dimensões dos provetes atenderam aos requisitos da EN 13286-50 (2004) e os ensaios de compressão não confinada foram conduzidos nas amostras de solo natural e nas amostras com cimento de acordo com a EN 13286-41 (2013). Todos os ensaios foram realizados em provetes não imersos.

Após o tempo de cura, os ensaios foram realizados a uma velocidade constante de 1mm/min usando uma prensa Zwick com capacidade máxima de carga de 50 kN e durante os ensaios foram

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 158 – julho/julio/july 2023 – pp. 25-47
https://doi.org/10.14195/2184-8394_158_2 – © 2023 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

registados os valores do deslocamento axial. Como critério de aceitação dos provetes foi estipulado que as resistências individuais dos três provetes, moldados com as mesmas características, não deveriam ter um desvio padrão superior a 10 % (da resistência média).

A Figura 5 mostra a relação tensão-deformação dos ensaios de resistência à compressão não confinada dos três provetes de solo natural. Obviamente não foram ensaiados para outros tempos de cura.

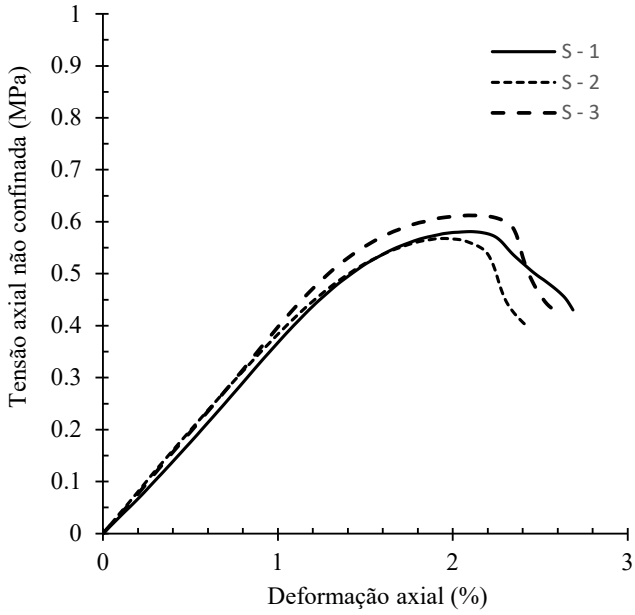

Fig. 5 – Comportamento tensão-deformação de provetes de solo

No Quadro 4 são apresentados os valores de resistência à compressão não confinada, R_c, desvio padrão, deformação axial e módulo de deformabilidade secante, E_{30}, de todas as amostras de solo natural. O módulo de deformabilidade E_{30} foi definido como a inclinação da curva tensão-deformação, para tensões até 30% da tensão de compressão não confinada máxima, média a que corresponde uma deformação, $\varepsilon_{0,3Rc}$ indicada no Quadro.

Quadro 4 – Resumo dos ensaios de compressão não confinada do solo natural

Provete	R_c (MPa)	Desvio padrão (%)	Deformação axial (%)	$\varepsilon_{0.3Rc}$ (%)	E_{30} (MPa)
S – 1	0.581	0.9	2.09	0.5	38
S – 2	0.567	3.4	1.94		
S – 3	0.612	4.1	2.13		

Na Figura 6 é apresentado o comportamento tensão-deformação, até à rotura, dos ensaios de resistência à compressão não confinada, para as misturas de solo ligado com cimento com 8% de cimento, S8C, para 0, 7, 28 e 90 dias.

Pode observar-se que, à medida que o tempo de cura aumenta, o pico de tensão aumenta significativamente. A parte linear das curvas permite prever um aumento da rigidez das misturas,

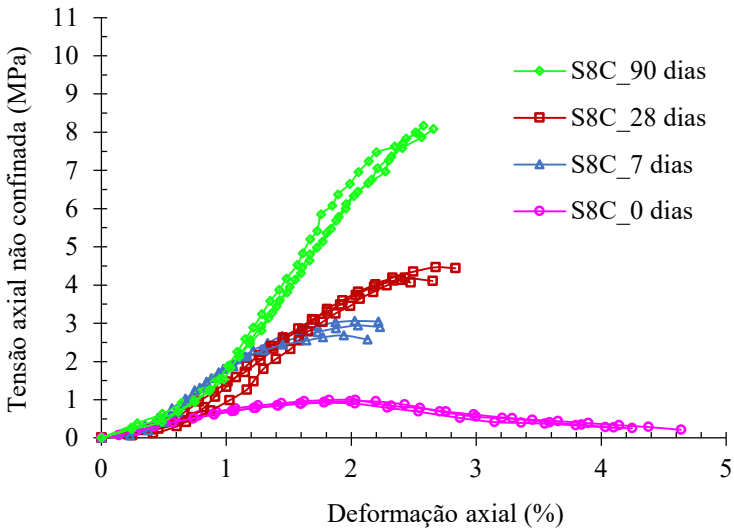

Fig. 6 – Comportamento tensão-deformação dos provetes S8C aos 0, 7, 28 e 90 dias

com o tempo de cura. Para 90 dias de cura, não foi possível prolongar o ensaio para além dos valores apresentados.

A Figura 7 mostra as roturas dos provetes aos 0, 7 e 28 dias de cura. As formas das superfícies de rotura aos 7 e 28 dias são consideradas insatisfatórias, de acordo com a EN 13286-41 (2013), apesar do cuidado que se teve no posicionamento da amostra entre as placas da prensa. Apenas a superfície de rotura ao fim 0 dias parece ser satisfatória. Aos 90 dias, as amostras simplesmente colapsaram quando a tensão axial máxima foi atingida.

Fig. 7 – Rotura dos provetes S8C aos a) 0 dias, b) 7 dias e c) 28 dias

No Quadro 5 são apresentados os valores de resistência à compressão não confinada (R_c), desvio padrão e deformação axial máxima de todas as amostras das misturas S8C. Como afirmado anteriormente, o módulo de deformabilidade foi definido como a inclinação da curva tensão-deformação para tensões até 30% da resistência máxima, neste caso com base na norma EN 13286-43. Para esta determinação, houve o cuidado de ter em linha de conta a perturbação da parte inicial das curvas, devido à adaptação dos provetes aos pratos da prensa quando é iniciado o ensaio. Sendo assim, a fase inicial de comportamento elástico considerada foi a fase após aquela perturbação. Esta parte linear é prolongada até à origem, obtendo-se assim a deformação axial correspondente a uma tensão axial nula. Com este procedimento, as curvas deslocam-se para a esquerda até à origem, e é possível obter um valor corrigido para a deformação, correspondente a tensões de 30% das resistências médias máximas, como explicado em Couto (2018). Esses valores estão igualmente

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 158 – julho/julio/july 2023 – pp. 25-47
https://doi.org/10.14195/2184-8394_158_2 – © 2023 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

representados no quadro, $\varepsilon^*_{Rc0.3}$, permitindo obter E_{30}. A análise do Quadro mostra que o módulo de deformabilidade aumenta com o tempo de cura, aumentando a rigidez das misturas.

Quadro 5 – Resumo dos ensaios de compressão não confinada das misturas com 8 % de cimento

Tempo de cura (dias)	Provete	R_c (MPa)	Desvio padrão (%)	Deformação axial (%)	$\varepsilon^*_{Rc0.3}$ (%)	E_{30} (MPa)
0	S8C – 1	0,957	0,1	2,0	0.36	79
	S8C – 2	0,992	3,7	2,0		
	S8C – 3	0,920	3,8	1,8		
7	S8C – 4	2.683	7.3	1.9	0.36	241
	S8C – 5	3.062	5.8	2.0		
	S8C – 6	2.941	1.6	2.0		
28	S8C – 7	4.133	3.0	2.4	0.45	284
	S8C – 8	4.464	4.7	2.7		
	S8C – 9	4.189	1.7	2.4		
90	S8C – 10	8.083	0.2	2.7	0.50	480
	S8C – 11	8.170	1.2	2.6		
	S8C – 12	7.958	1.4	2.6		

Na Figura 8 é apresentado o comportamento tensão-deformação até à rotura, dos ensaios de resistência à compressão não confinada, para as misturas de solo ligado com cimento com 12 % de cimento, S12C, para 0, 7, 28 e 90 dias.

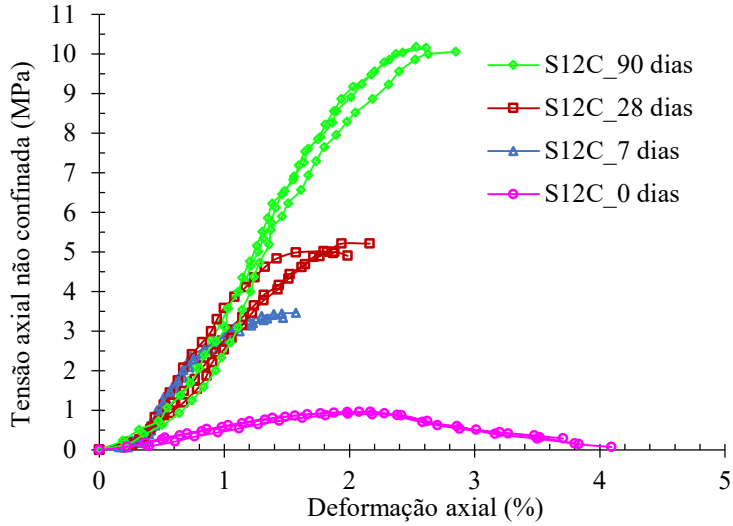

Fig. 8 – Comportamento tensão-deformação dos provetes S12C aos 0, 7, 28 e 90 dias

Pode observar-se que, à medida que o tempo de cura aumenta, o pico de tensão aumenta (mais significativamente do que nas misturas com 8% de cimento). Como anteriormente, a parte linear das curvas permite prever um aumento da rigidez das misturas, com o tempo de cura.

A Figura 9 mostra as roturas observadas nos provetes aos 0, 7 e 28 dias de cura. Aos 90 dias, as amostras simplesmente colapsaram quando a tensão axial máxima foi atingida. Como no caso

Fig. 9 – Rotura dos provetes S12C aos a) 0 dias, b) aos 7 dias e c) 28 dias

anterior, e com base na norma já referida, apenas a forma da superfície de rotura para o tempo de cura de 0 dias parece ser satisfatória.

No Quadro 6 são apresentados os valores de resistência à compressão não confinada, R_c, desvio padrão, deformação e axial para todas as amostras de misturas S12C. Como anteriormente, a fase inicial de comportamento elástico considerada foi a fase após a perturbação inicial, tendo sido corrigidos os valores da deformação correspondente à tensão de 30% da resistência média máxima, $\varepsilon^*_{Rc0.3}$, permitindo obter E_{30} de cada uma das misturas. A análise do Quadro mostra que o módulo de deformabilidade aumenta com o tempo de cura, aumentando a rigidez das misturas.

Quadro 6 – Resumo dos ensaios de compressão não confinada das misturas com 12 % de cimento

Tempo de cura (dias)	Provete	R_c (MPa)	Desvio padrão (%)	Deformação axial (%)	$\varepsilon^*_{Rc0.3}$ (%)	E_{30} (MPa)
0	S12C – 1	0,959	2,0	2,2	0.35	79
	S12C – 2	0,907	3,5	2,0		
	S12C – 3	0,954	1,5	2,1		
7	S12C – 4	3.426	0.6	1.4	0.032	321
	S12C – 5	3.326	2.3	1.5		
	S12C – 6	3.460	1.6	1.6		
28	S12C – 7	5.013	1.2	1.8	0.039	389
	S12C – 8	4.998	1.5	2.0		
	S12C – 9	5.210	2.7	2.2		
90	S12C – 10	10.577	3.1	2.7	0.045	684
	S12C – 11	10.058	2.0	2.9		
	S12C – 12	10.155	1.1	2.5		

4 – DISCUSSÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 – Efeito do teor em cimento

Diferentes autores têm abordado a evolução da resistência à compressão não confinada, R_c, de misturas de solos argilosos ligados com diferentes percentagens de cimento, para diferentes tempos de cura, mas apenas alguns destes trabalhos situam o solo no seu teor em água ótimo como no presente estudo (Kongsukprasert et al., 2007; Consoli et al., 2012 e Sheen et al., 2013). A Figura 10 mostra a comparação das curvas tensão-deformação entre misturas de 8% (S8C) e 12% (S12C) de cimento, para todos os tempos de cura (Dias, 2012). O autor refere que, para um determinado período de cura, a adição de cimento faz com que a resistência à compressão não confinada aumente

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 158 – julho/julio/july 2023 – pp. 25-47
https://doi.org/10.14195/2184-8394_158_2 – © 2023 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

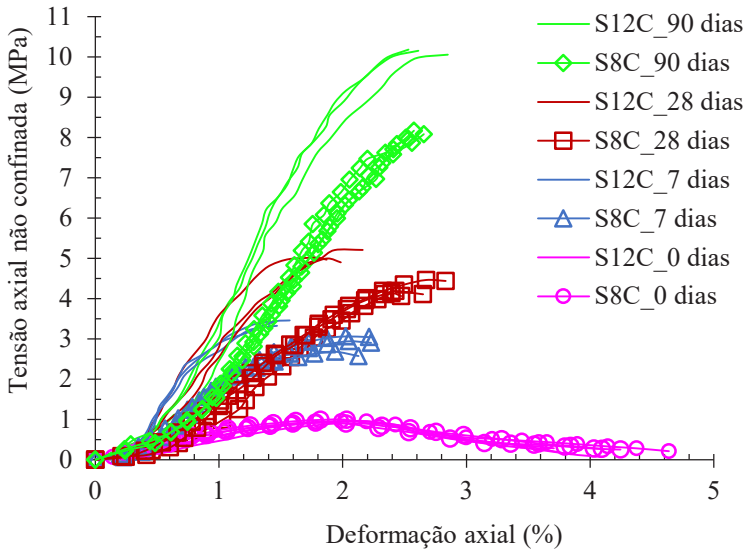

Fig. 10 – Comparação entre as duas misturas S8C e S12C para os 0, 7, 28 e 90 dias de cura

significativamente. Por exemplo, o pico de tensão axial aumenta mais significativamente para misturas de 12% do que para misturas de 8%, para tempos de cura a partir dos 7 dias.

De facto, um maior teor em cimento resultaria num menor volume de vazios e também como a água disponível é limitada (comparando com outros estudos de "jet grouting" ou "deep soil mixing" o aumento do teor em cimento induz uma maior redução da quantidade de água pela hidratação do cimento.

Também se observa que, quando o teor em cimento é mais elevado, resultam misturas mais rígidas. Para o mesmo teor em cimento, à medida que o tempo de cura aumenta, a rigidez aumenta a taxas maiores, devido ao desenvolvimento no tempo das reações pozolânicas, o que está de acordo com o referido por outros autores em estudos anteriores (Kongsukprasert et al., 2007 e Rios et al., 2019).

Na Figura 11 é apresentada a variação da resistência à compressão não confinada em função do teor em cimento, para cada tempo de cura. Ao contrário de uma relação linear entre a resistência à compressão e o teor em cimento, proposta por Consoli et al. (2012), neste trabalho foi ajustado um polinómio de 2ª ordem, para cada tempo de cura. Isso ocorre porque o autor estudou um teor máximo em cimento de 7%, enquanto neste estudo os teores em cimento são maiores.

Equações do tipo da seguinte, apresentadas na Figura 11, mostram boas correlações entre resistência à compressão e percentagens de cimento (R^2>0,9):

$$R_c = a_1(t) \cdot C^2 + a_2(t) \cdot C + R_{c-soil} \quad (3)$$

Nesta equação:

$a_1(t)$ e $a_2(t)$ são constantes que tomam diferentes valores para cada tempo de cura (ver Fig. 11).

C é o teor em cimento (%); para C=0 % (solo), R_c=$R_{c\text{-}soil}$=0.6 MPa (média dos valores do Quadro 4).

O aumento de R_c com o teor em cimento é apresentado na Figura 12, onde os resultados dos Quadros 5 e 6 são apresentados usando um índice de resistência para o cimento, independente do solo, definido como a relação entre as resistências à compressão, $R_{c_cimento}/R_{c_solo}$. Na figura, a tendência crescente do referido índice é maior para o maior teor em cimento de 12%. De facto, para

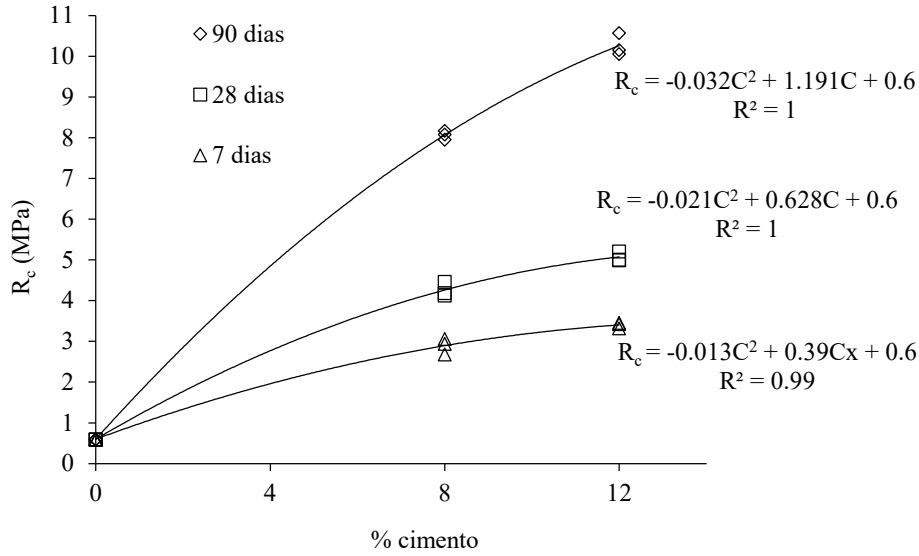

Fig. 11 – Resistência à compressão em função do teor em cimento para cada tempo de cura

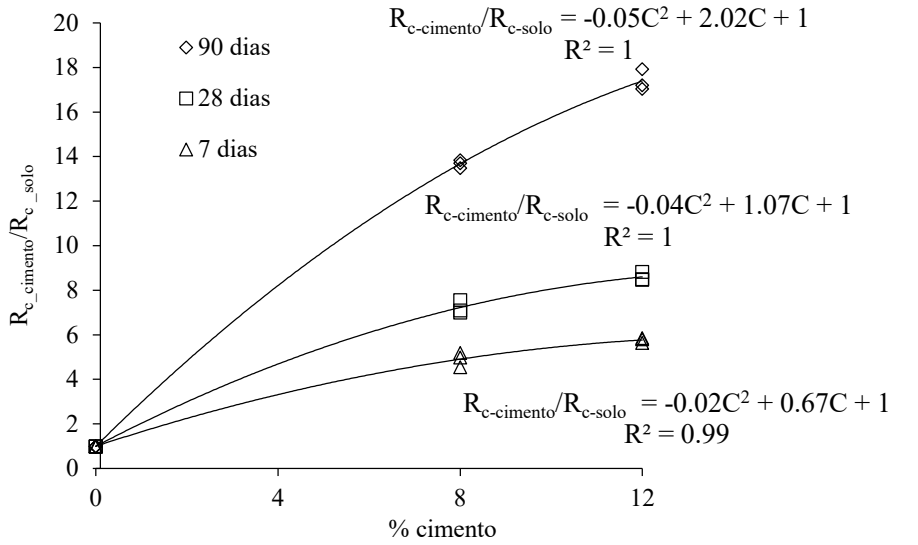

Fig. 12 – Variação do índice de resistências com o teor em cimento, para cada tempo de cura

cada tempo de cura, a variação de $R_{c_cimento}/R_{c_solo}$ pode ser razoavelmente ajustado com outro polinómio de 2ª ordem da forma:

$$R_{c-cimento}/R_{c-solo} = \alpha.C^2 + \beta.C + 1 \quad (4)$$

em que α e β são coeficientes experimentais que dependem do tempo de cura, apresentados no Quadro 7 para o solo ensaiado.

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 158 – julho/julio/july 2023 – pp. 25-47
https://doi.org/10.14195/2184-8394_158_2 – © 2023 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Quadro 7 – Valores dos coeficientes α e β para o índice $R_{c_cimento}/R_{c_solo}$

Tempo de cura (dias)	α	β
90	-0.05	2.02
28	-0.04	1.07
7	-0.02	0.67

Com os valores apresentados no Quadro 7, construiu-se a Figura 13 em que os valores de α e β foram ajustados com as equações seguintes:

$$a = -0.01t^{0.36} \tag{5}$$

$$\beta = 0.28t^{0.43} \tag{6}$$

em que *t* é o tempo de cura em dias e α e β são os parâmetros a introduzir na equação (4).

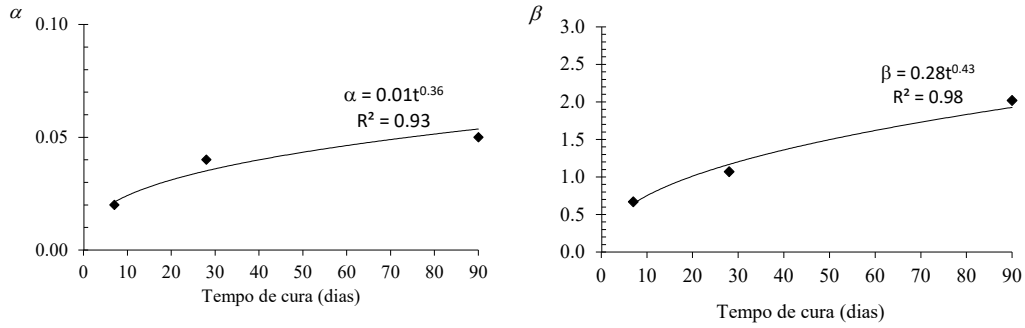

Fig. 13 – Valores de α e β do Quadro 7

As equações (4), (5) e (6) podem ser utilizadas para o pré-dimensionamento de misturas de solo ligadas com cimento, para o solo estudado neste trabalho, para teores em cimento e tempos de cura situados nos intervalos correspondentes. Conhecendo o owc de um ensaio de compactação do solo, a água e o cimento podem ser ajustados instantaneamente in situ para atingir o valor de resistência do projeto. Para teores em cimento inferiores a 10%, o owc da mistura é igual ao owc do material de origem (Nusit et al., 2017).

O efeito da percentagem de cimento no módulo de deformabilidade, E_{30}, para cada tempo de cura, pode ser visto na Figura 14. Os valores são os módulos secantes E_{30} dos Quadros 5 e 6, calculados para uma tensão de compressão igual a 30% da resistência à compressão não confinada máxima média das curvas tensão-deformação, conforme explicado anteriormente.

Pode observar-se que o módulo de deformabilidade aumenta com o teor em cimento para todos os tempos de cura, de forma mais significativa para o tempo de cura de 90 dias. De facto, para cada tempo de cura, a variação de E_{30} para as misturas ensaiadas pode ser razoavelmente ajustada com uma equação linear da forma:

$$E_{30}(t) = b(t).C + E_{30-solo} \tag{7}$$

em que:

E_{30} (t) é o modulo de deformabilidade secante E_{30} para um determinado tempo de cura, *t*

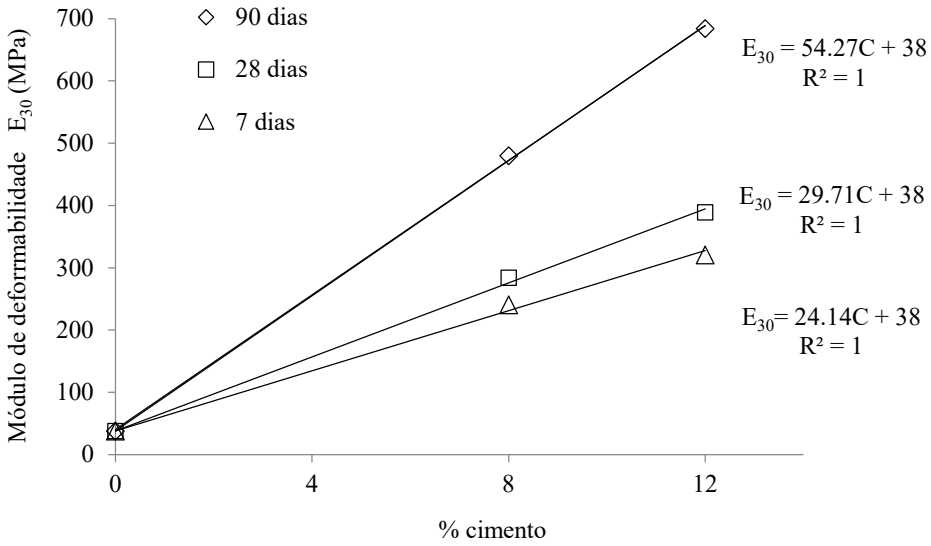

Fig. 14 – Módulo de deformabilidade E_{30} em função do teor em cimento para cada tempo de cura

$b(t)$ é um coeficiente experimental dependente do tempo de cura e apresentado no Quadro 8, para o solo ensaiado neste trabalho;
C é o teor em cimento (%);
$E_{30\text{-soil}}$ é o valor de E_{30} para o solo (2.0 MPa para o solo do presente trabalho).

Quadro 8 – Valores do coeficiente *b(t)* para o obter E_{30} (t)

Tempo de cura (dias)	***b(t)***
90	54.27
28	29.71
7	24.14

O aumento de E_{30} com o teor em cimento, para cada tempo de cura, é também apresentado na Figura 15, onde os resultados dos Quadros 5 e 6 são apresentados usando um índice independente do solo, para cada tempo de cura, ou seja, o índice $E_{30_cimento}/E_{30_solo}$, à semelhança do que foi feito para a resistência à compressão não confinada.

De facto, para cada tempo de cura, a variação do índice $E_{30_cimento}/E_{30_solo}$ pode ser razoavelmente ajustado com uma equação linear, da forma:

$$E_{30-cimento}/E_{30-solo} = \delta(t).C + 1 \quad (8)$$

em que:

C é o teor em cimento (%);
$\delta(t)$ é o parâmetro, dependente do tempo de cura a introduzir na equação (8), apresentados no Quadro 9.

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 158 – julho/julio/july 2023 – pp. 25-47
https://doi.org/10.14195/2184-8394_158_2 – © 2023 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

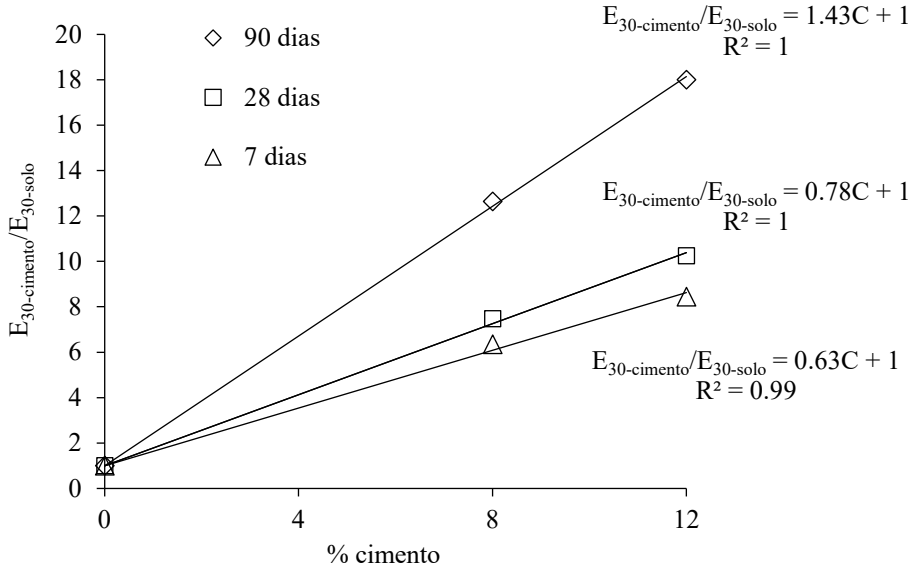

Fig. 15 - Variação do índice de deformabilidade com o teor em cimento, para cada tempo de cura

Quadro 9 – Valores do coeficiente $\delta(t)$ para o obter $E_{30_cimento}/E_{30_solo}$

Tempo de cura (dias)	$\delta(t)$
90	1.43
28	0.78
7	0.63

No tratamento de solos e na prática de engenharia de fundações, a relação entre E_{30} e R_c é um importante parâmetro de avaliação. Para o efeito, construiu-se o gráfico da Figura 16, em que todos os valores do módulo secante E_{30} e os valores correspondentes de R_c estão apresentados em escala bi-logarítmica. Embora, como pode ser visto, haja alguma dispersão em torno da reta que melhor se ajusta, pode considerar-se que existe uma equação única que assume a forma:

$$E_{30} = 69.2\, R_c^{1.02} \tag{9}$$

Esta equação reflete assim a capacidade de resistência à deformação elástica para os dois teores em cimento deste estudo, independentemente do tempo de cura e independente do teor em cimento.

Outros autores expressaram o mesmo tipo de correlação (Ikhlef et al., 2015). No entanto, nenhuma expressão matemática generalizada foi encontrada para todas as contribuições que descrevem uma relação entre E_{30} e R_c para solos ligados com cimento, principalmente devido aos diferentes componentes dos solos e cimentos utilizados nos diferentes estudos.

4.2 – Efeito do tempo de cura

A Figura 17 mostra a resistência à compressão com o tempo de cura para os teores em cimento de 0, 8% e 12%. R_c aumenta acentuadamente numa fase inicial, para em seguida esta tendência crescente diminuir claramente.

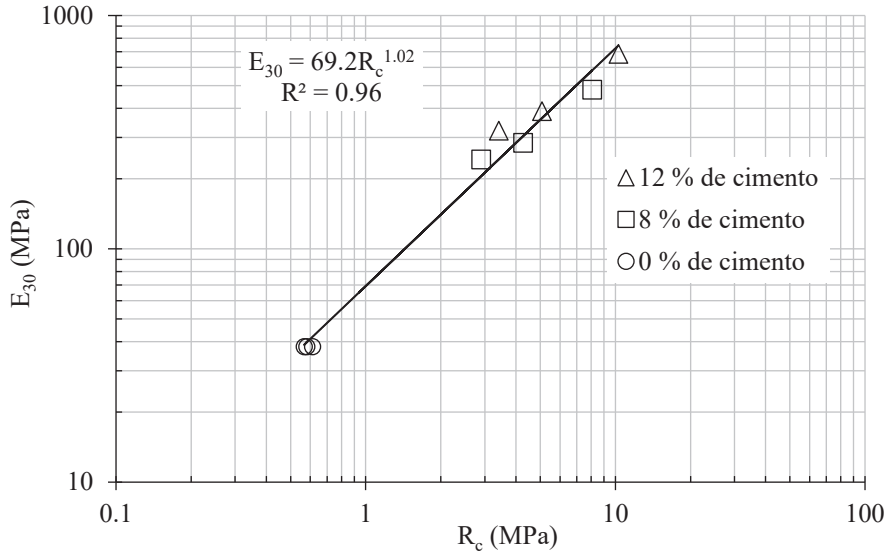

Fig. 16 – Relação entre o módulo secante e a resistência â compressão

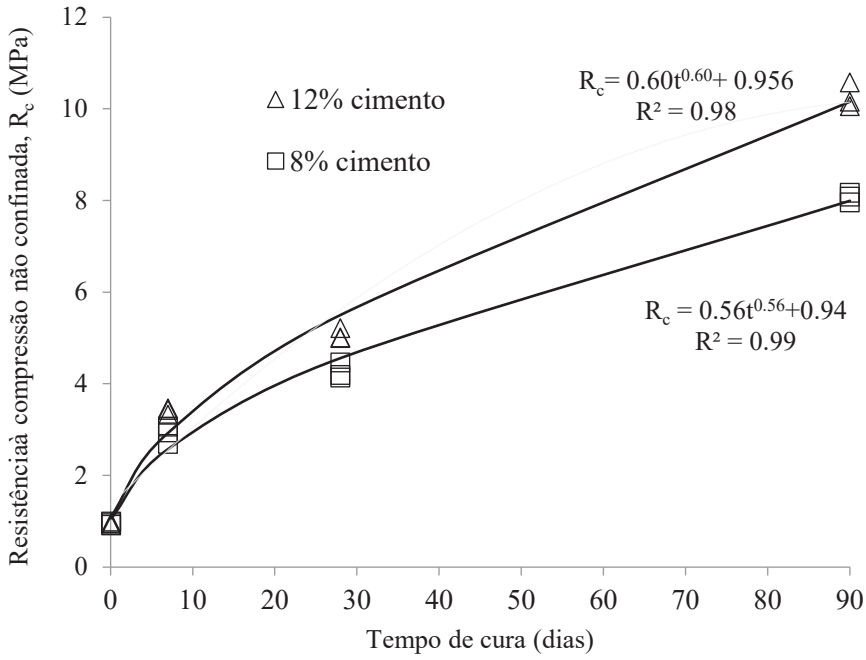

Fig. 17 – Variação da resistência à compressão com o tempo de cura

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 158 – julho/julio/july 2023 – pp. 25-47
https://doi.org/10.14195/2184-8394_158_2 – © 2023 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Equações do tipo da equação (10), apresentadas na Figura 17, mostram boas correlações entre a resistência à compressão e o tempo de cura:

$$R_c = d \cdot t^d + R_{c-0dias} \tag{10}$$

em que:

d é uma constante que toma diferentes valores para cada teor em cimento:

d=0.6 para C=12 % e d=0.56 para C=8 %

$R_{c\text{-}0dias}$ é a resistência à compressão aos 0 dias de cura;

$R_{c\text{-}0dias}$ =0.94 MPa for C=12 % and $R_{c\text{-}0days}$ =0.956 MPa for C=8 %

Estes resultados mostram que R_c aumenta de forma rápida até aos 7 dias adquirindo uma resistência 2,5 vezes maior para 8% de cimento e 3,5 vezes maior para 12% de cimento. Isso pode ser explicado pela rápida diminuição do teor em água causada pela secagem na superfície. Após um período de 7 dias, a redução da água nos vazios torna-se mais lenta, levando a um aumento mais lento da resistência mecânica. Essa mesma tendência foi observada por Ikhlef et al (2015) que registaram uma variação muito pequena da resistência à compressão entre 28 e 180 dias, quando ensaiaram diferentes misturas com percentagens de cimento entre 2% e 6%.

Na Figura 18 é apresentado o módulo de deformabilidade, E_{30}, em função do tempo de cura para os teores em cimento de 8% e 12%. Para o solo ensaiado, e para cada teor em cimento, E_{30} pode ser razoavelmente ajustado com uma função da forma:

$$E_{30} = e_1 . t^{e_2} + E_{30-0dias} \tag{11}$$

em que:

e_1 e e_2 são constantes que tomam diferentes valores para cada teor em cimento (ver Fig. 18).

e_1=90.1 para C=12 % e e_1=60.5 para C=8 %

e_2=0.42 e parece ser constante para os teores em cimento estudados

$E_{30\text{-}0dias}$ é o módulo secante E_{30}, aos 0 dias de cura e manteve-se igual a 79 MPa para ambos os teores em cimento estudados.

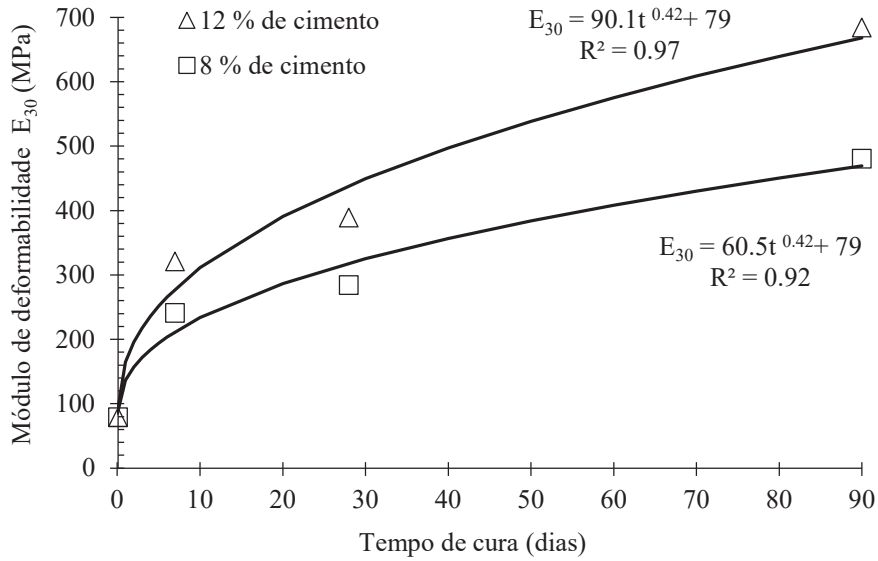

Fig. 18 – Variação de E_{30} com o tempo de cura

Para ambas as percentagens de cimento, E_{30} aumenta acentuadamente na fase inicial mas, subsequentemente, esta tendência crescente diminui. Outros autores (Rios et al., 2019 e Rong-rong e Dong-dong, 2020) apresentaram uma equação logarítmica para esta variação, mas apenas até aos 30 dias de cura, sugerindo que, após este tempo, o valor do módulo de deformabilidade tenderia a estabilizar. Pelo contrário, neste trabalho, os resultados experimentais, até aos 90 dias, parecem indicar uma tendência crescente de E_{30} para tempos superiores aos apresentados pelos autores referidos.

4.3 – Estabelecimento de dosagens

Com base neste estudo é possível propor um procedimento para estabelecer a quantidade de cimento a ser adicionada ao solo argiloso ensaiado neste trabalho, a fim de obter uma resistência necessária em obra. Neste sentido é necessário um estudo prévio dos materiais em causa, para confirmar se apresentam características semelhantes. Após esta confirmação, os passos a serem seguidos poderão ser os seguintes:

- determinar owc e mdd do solo a ser utilizado, a partir de um ensaio de compactação; se o teor em cimento for <10%, owc e mdd da mistura serão os mesmos;
- compactar provetes de solo no ótimo (owc) e ensaiar à resistência à compressão não confinada.
- com base nas equações (4), (5) e (6), estimar a quantidade (percentagem) de cimento para atingir a resistência necessária para o solo ligado com cimento para um determinado tempo de cura;
- ajustar as quantidades de água e cimento para se adequar ao teor em água das condições de campo.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo pretendeu investigar a capacidade de melhorar uma areia argilosa, recolhida no Município de Almada, de forma a obter um material de características adequadas para a construção.

Ao material original, solo, foram adicionadas quantidades de cimento de 8 % e 12 %, em relação ao peso seco do solo. A composição ótima para cada mistura de solo ligado com cimento foi obtida por meio de ensaios de compactação para a obtenção de owc e mdd. De acordo com os resultados dos ensaios de compactação, a adição de cimento aumentou o teor ótimo em água e diminuiu o peso volúmico seco máximo apenas para a mistura com 12% de cimento. Para a mistura de 8%, tanto owc quanto mdd permanecem mais ou menos os mesmos do material original (solo).

Com as dosagens de cimento e água definidas a partir de owc, foram preparados provetes cilíndricas e ensaiados à resistência à compressão não confinada, com tempos de cura de 0, 7, 28 e 90 dias, com medição de deslocamentos.

A partir das curvas tensão-deformação, pôde observar-se que há um aumento gradual na resistência à compressão com o teor em cimento e com o tempo de cura. Nota-se também um aumento sucessivo da rigidez. Durante o tempo inicial de cura, a sensibilidade à diferença de teores em cimento não é significativa. Apenas para tempos de cura superiores a sete dias, há um aumento da resistência à compressão com o teor em cimento.

Para o solo estudado, e para os teores em cimento adotados, a partir das curvas de variação da resistência à compressão, R_c com o teor em cimento, foi possível ajustar um polinómio de segunda ordem, para cada tempo de cura. A equação requer o conhecimento de dois parâmetros experimentais que são dependentes do tempo de cura. Além disso, quando se introduz uma relação $R_{c\text{-cimento}}/R_{c\text{-solo}}$, propõe-se uma nova equação que permite a simples previsão de R_c de uma mistura de solo ligado com cimento, com o solo argiloso, quando se conhece R_c do solo natural e a percentagem de cimento a ser utilizada.

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 158 – julho/julio/july 2023 – pp. 25-47
https://doi.org/10.14195/2184-8394_158_2 – © 2023 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Nos gráficos de variação do módulo de deformabilidade secante, E_{30}, com o teor em cimento, pode observar-se que E_{30} aumenta com o teor em cimento, de forma mais significativa para o tempo de cura de 90 dias. A variação ajustou bem com funções lineares, com um parâmetro que depende do tempo de cura. Ao introduzir a relação $E_{30_cimento}/E_{30_solo}$, a nova equação linear proposta tem também um parâmetro que depende do tempo de cura e permite prever o valor de E_{30} das misturas quando o E_{30} do solo é conhecido.

As curvas que representam a variação da resistência à compressão, R_c, com o tempo de cura, para cada teor em cimento, mostraram que R_c aumenta de forma rápida até 7 dias, mas posteriormente a tendência de aumento diminui. No entanto, R_c continua a aumentar após 28 dias de cura.

O módulo de deformabilidade secante das misturas aumenta significativamente com o tempo de cura, na fase inicial, continuando a aumentar posteriormente, mas a uma taxa menor. Isto é evidenciado nas funções de potência que correlacionam E_{30} com o tempo de cura, para cada percentagem de cimento.

A capacidade de resistência à deformação elástica refletiu-se num gráfico bi-logarítmico de E_{30} em função de R_c, para todos os resultados experimentais deste trabalho incluindo também o material solo natural. Obteve-se uma função única, de razoável ajuste, que mostra uma variação daquela capacidade independente do tempo de cura e do teor em cimento utilizados.

Este trabalho evidencia a adequação do tratamento do solo argiloso utilizado, obtendo-se uma mistura de solo ligado com cimento com boas características mecânicas. Fornece várias ferramentas e expressões para estimar o comportamento do solo ligado com cimento, com o tempo de cura, para teores em cimento entre 8 % e 12 % por peso seco do solo.

No entanto, é importante ter em mente que o dimensionamento e o estabelecimento de dosagens das misturas de solo ligadas com cimento dependem das características intrínsecas dos materiais utilizados. Recomenda-se assim uma utilização cautelosa das relações e modelos propostos, pois foram construídos com base em condições experimentais específicas. Estes devem assim ser calibrados com resultados de alguns ensaios base, se forem utilizados materiais de características diferentes.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI (1990). *State of the art report on soil cement*, 230.1R-90. ACI Mater. J.

Antunes, M.; Pais, J.; Legoinha, P. (1992). *Neogene deposits of Lisbon and Setúbal Peninsula, Excursion* A. Ciências da Terra, Univ. Nova de Lisboa, nº esp. II, pp. 29-35.

AASHTO M145-42 (1991). *Standard specification for classification of soils and soil - aggregate mistures for highway construction purposes.* American Association of State Highway and Transportation Officials.

ASTM D 2487-17 (2017). *Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. https://doi.org/10.1520/D2487-17E01.

Consoli, N.C.; Fonseca, A.V. da, Silva, S.R.; Cruz, R.C.; Fonini, A. (2012). *Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils.* Géotechnique, 62, pp. 177–183. https://doi.org/10.1680/geot.8.P.084.

Consoli, N.C.; Quiñónez, R.A.; González, L.E.; López, R.A. (2017). *Influence of Molding Moisture Content and Porosity/Cement Index on Stiffness, Strength, and Failure Envelopes of Artificially Cemented Fine-Grained Soils*. Journal of Materials in Civil Engineering, 29, 04016277. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001819.

Couto, A. (2018). *Propriedades mecânicas de misturas de solo ligado com cimento com diferentes teores em água*. Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa. http://hdl.handle.net/10362/47634.

Cotter, J. (1956). *O miocénico marinho de Lisboa (obra póstuma)*. Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal, supl. ao t. XXXVI, 170 p.

Dias, J. (2012). *Estabilização de solos com cimento para obter melhores características mecânicas*. Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa. http://hdl.handle.net/10362/7837.

EN 13286-41 (2013). *Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 41: Test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures*. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.

EN 13286-43 (2013). *Unbound and Hydraulically Bound Mixtures. Part 43: Test Method for the determination of the modulus of elasticity of hydraulically bound mixtures*. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.

EN 13286-50 (2004). *Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 50: Method for the manufacture of test specimens of hydraulically bound mixtures using Proctor equipment or vibrating table compaction*. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.

EN 14227-10 (2013). *Hydraulically bound mixtures specifications. Part 10: soil treated by cement*. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.

EN ISO 17892-4 (2016). *Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 4: Determination of particle size distribution*. International Organization for Standardization: Genebra, Suíça.

Ikhlef, N.-S.; Ghembaza, M.S.; Dadouch, M. (2015). *Effect of Treatment with Cement on the Mechanical Characteristics of Silt from Telagh Region of Sidi Belabes, Algeria*. Geotechnical and Geological Engineering, 33, pp. 1067–1079. https://doi.org/10.1007/s10706-015-9888-2.

Jiang, Y.J.; Fan, L.F. (2013). *An investigation of mechanical behavior of cement-stabilized crushed rock material using different compaction methods*. Construction and Building Materials, 48, pp. 508–515. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.017.

Jonet, J. (1972). *Étude des otolithes des téléostéens (Pisces) du Miocêne des environs de Lisbonne*. Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal, LVI (1972-73) pp. 107-328.

Kongsukprasert, L.; Tatsuoka, F.; Takahashi, H. (2007). *Effects of Curing Period and Stress Conditions on the Strength and Deformation Characteristics of Cement-mixed Soil*. Soils and Foundations, 47, pp. 577–596. https://doi.org/10.3208/sandf.47.577.

Lamas, P.C.; Rodrigues Carvalho, J.A. (2005). *Failure mechanisms at the northern end of the Costa de Caparica Fossil Cliff*. Geotecnia, 104, pp. 3–15.

LNEC E 201 (1967). *Solos. Determinação do teor em matéria orgânica*. Portugal.

LNEC E 243 (1971). *Solo. Solo-cimento*. Portugal.

LNEC E 304 (1974). *Pavimentos rodoviários. Solo-cimento*. Portugal

Moreira, E.B.; Baldovino, J.A.; Rose, J.L.; Luis dos Santos Izzo, R. (2019). *Effects of porosity, dry unit weight, cement content and void/cement ratio on unconfined compressive strength of roof tile waste-silty soil mixtures*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 11, pp. 369–378. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.04.015.

Neves, J.; Castro, L.; Monteiro, A. (2023). *Modelação numérica do comportamento de solos tratados com cimento em pavimentos rodoviários*. Geotecnia, 157, pp. 07–28. https://doi.org/10.14195/2184-8394_157_1.

NP 143 (1969). *Solos. Determinação dos limites de consistência.*

NP EN 196-1 (2017). *Métodos de ensaio de cimentos - parte 1: determinação das resistências mecânicas*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa, Portugal.

NP EN 196-3 (1990). *Métodos de ensaio de cimentos - parte 3. Determinação do tempo de presa e da expansibilidade.* Instituto Português da Qualidade, Lisboa, Portugal.

NP EN 196-6 (2019). *Métodos de ensaio de cimentos - parte 6. Determinação da finura*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa, Portugal.

NP EN 197-1 (2012). *Cimento - parte 1: composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.* Instituto Português da Qualidade, Lisboa, Portugal.

Nusit, K.; Jitsangiam, P.; Kodikara, J.; Bui, H.H.; Leung, G.L.M. (2017). *Advanced Characteristics of Cement-Treated Materials with respect to Strength Performance and Damage Evolution*. Journal of Materials in Civil Engineering, 29, 04016255. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001772.

Pais, J.; Legoinha, P. (2004). *Notícia Explicativa da Carta Geológica do Concelho de Almada*. Almada.

Pongsivasathit, S.; Horpibulsuk, S.; Piyaphipat, S. (2019). *Assessment of mechanical properties of cement stabilized soils*. Case Studies in Construction Materials, 11, e00301. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00301.

Rios, S.; Ramos, C.; Viana da Fonseca, A.; Cruz, N.; Rodrigues, C. (2019). *Mechanical and durability properties of a soil stabilised with an alkali-activated cement*. European Journal of Environmental and Civil Engineering 23, pp. 245–267. https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1275987.

Rong-rong, Z.; Dong-dong, M. (2020). *Effects of Curing Time on the Mechanical Property and Microstructure Characteristics of Metakaolin-Based Geopolymer Cement-Stabilized Silty Clay*. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, pp. 1–9. https://doi.org/10.1155/2020/9605941.

Santana, T.; Gonçalves, J.; Pinho, F.; Micaelo, R. (2021). *Effects of the Ratio of Porosity to Volumetric Cement Content on the Unconfined Compressive Strength of Cement Bound Fine Grained Soils*. Infrastructures, 6, 96. https://doi.org/10.3390/infrastructures6070096.

Sheen, Y.-N.; Zhang, L.-H.; Le, D.-H. (2013). *Engineering properties of soil-based controlled low-strength materials as slag partially substitutes to Portland cement.* Construction and Building Materials, 48, pp. 822–829. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.046.

Solihu, H. (2020). *Cement Soil Stabilization as an Improvement Technique for Rail Track Subgrade, and Highway Subbase and Base Courses: A Review*. Journal of Civil and Environmental Engineering, 10. https://doi.org/10.37421/jcde.2020.10.344.