

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5043>

ARTIGO ORIGINAL

## Previsão da resistência à compressão simples de um solo expansivo estabilizado com cimento através do índice porosidade/teor volumétrico de cimento

**RESUMO:** Os solos que sofrem alterações volumétricas quando sua umidade varia são chamados de expansivos e podem ser encontrados com facilidade em regiões áridas e semiáridas, como o nordeste brasileiro. Para aumentar a resistência do solo e diminuir sua variação volumétrica, podem-se utilizar aglomerantes químicos como o cimento. O objetivo deste trabalho foi analisar a aplicabilidade de uma nova metodologia de dosagem para prever a resistência à compressão simples do solo expansivo do nordeste brasileiro com o uso de cimento como aglomerante. Foram feitos ensaios de resistência à compressão simples em corpos de prova com diferentes teores de cimento e pesos específicos secos (4%, 6%, 8% e 14 kN/m<sup>3</sup>, 15 kN/m<sup>3</sup> e 16 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente) e teor de umidade de 19%. Os resultados mostraram que a resistência aumenta com o acréscimo do teor de cimento e com o decréscimo da porosidade. Observou-se também que a variação da resistência em função da razão porosidade/teor volumétrico de cimento, ajustado com um expoente ( $\eta/C_{iv}^\alpha$ ), pode ser representada por uma curva única. A análise de variância (ANOVA) para um e dois fatores, assim como o teste de Tukey, corroboram os resultados. Portanto, a metodologia de dosagem do índice  $\eta/C_{iv}^\alpha$  apresenta-se eficaz para prever a resistência do solo expansivo.

**Palavras-chave:** dosagem; estabilização química; relação porosidade/teor volumétrico de cimento.

*Prediction of the unconfined compressive strength of expansive soil stabilized with cement at the ratio of porosity to the volumetric cement content*

SUBMETIDO 13/11/2020

APROVADO 13/04/2021

PUBLICADO ON-LINE 14/08/2021

PUBLICADO 30/06/2022

EDITOR ASSOCIADO

Nelma Mirian Chagas Araújo Meira

 João Pedro Camelo Guedes <sup>[1]</sup>

 Eduardo Antonio Guimarães Tenório <sup>[2]</sup>

 Carina Silvani <sup>[3]</sup>

 Raabi Inarair Ferreira Braz <sup>[4]</sup>

[1] [joaopedro\\_guedes@hotmail.com](mailto:joaopedro_guedes@hotmail.com)

[2] [eduardo\\_agt123@hotmail.com](mailto:eduardo_agt123@hotmail.com)

[3] [carinasilvani@hotmail.com](mailto:carinasilvani@hotmail.com)

[4] [raabifb@gmail.com](mailto:raabifb@gmail.com)

Universidade Federal de Campina Grande (UFCCG), Brasil.

**ABSTRACT:** Soils undergoing volumetric changes with moisture variation are called expansive soils and can be easily found in arid and semi-arid regions, such as northeastern Brazil. Chemical binders like cement can be used to increase soil strength and decrease soil volumetric changes. The present research is focused on analyzing the applicability of a new dosage methodology to predict the unconfined compressive strength of expansive soil in the northeast Brazil by using cement as a binder. Unconfined compressive strength tests were performed on specimens with different cement content, specific dry unit weight (4%, 6%, 8% and 14 kN/m<sup>3</sup>, 15 kN/m<sup>3</sup> and 16 kN/m<sup>3</sup>, respectively) and moisture content of 19%. The results revealed that the strength increases as the cement content increases and porosity decreases. Furthermore, the strength variation as a function of porosity/volumetric cement content ratio adjusted by an exponent ( $\eta/C_{iv}^a$ ) can be represented by a single curve. The one-and-two-factor analysis of variance (ANOVA), as well as the Tukey test, corroborate the results. The dosage methodology at  $\eta/C_{iv}^a$  was shown to be an efficient method to predict expansive soil strength.

**Keywords:** chemical stabilization; dosage; porosity/volumetric cement content ratio.

## 1 Introdução

As variações volumétricas a partir da alteração de umidade e a presença de alto teor de argilominerais, em especial a montmorilonita, são aspectos característicos de solos expansivos (PEI *et al.*, 2020). Esses solos estão presentes em diversos países como Austrália, China, Índia, Israel, África do Sul e Reino Unido, sendo comum em regiões áridas e semiáridas, como o nordeste brasileiro (CONSOLI *et al.*, 2019a; FERREIRA *et al.*, 2017; LI; CAMERON; REN, 2014; POONI *et al.*, 2019). O comportamento expansivo desses solos acarreta diversos problemas em rodovias, edifícios e canais (KULANTHAIVEL *et al.*, 2021; TAHER; SCALIA; BAREITHER, 2020).

A estabilização química do solo com uso de aglomerantes é uma prática comumente utilizada para melhorar as propriedades naturais do solo, a exemplo da resistência mecânica (KUMAR; KUMAR, 2019). Além disso, essa solução é mais economicamente viável do que alterações do projeto de fundação ou retirada da camada expansiva (ANOOP *et al.*, 2017). Entre os diversos aglomerantes, o cimento é um dos agentes cimentantes mais utilizados para estabilizar solos de baixa resistência, pois gera aumento na durabilidade e na resistência mecânica (CONSOLI *et al.*, 2019b; FESTUGATO *et al.*, 2018). Como ocorre no concreto, o cimento serve de ligante, formando ligações entre as partículas do solo (TOMASI, 2018). De acordo com Ibeiro (2016), o ganho de resistência do solo deve-se aos produtos da hidratação do cimento e das reações secundárias. Estas ocorrem em solos argilosos, quando a cal, subproduto da hidratação do cimento, produz substâncias cimentícias, através das reações pozolânicas, aumentando continuamente a resistência mecânica do solo (ROCHA, 2018).

A técnica da estabilização do solo com cimento é usualmente adotada em projetos de engenharia (CONSOLI *et al.*, 2019a). O maior projeto chinês de transposição de água, *South-North Water Transfer Project*, é um exemplo: o cimento foi utilizado para estabilizar os taludes do canal aberto em solo expansivo por um comprimento de 340 km (GONG *et al.*, 2016). No Iraque, também foi utilizado o cimento para estabilização de taludes em um trecho de instabilidade crítica da rodovia Erbil-Haj Omran, reduzindo a expansão em 90% (DARAEI *et al.*, 2018).

Como o uso do cimento era apenas baseado em experiências práticas (LATIFI *et al.*, 2017), Foppa (2005) e Consoli *et al.* (2007) propuseram uma relação racional para dosagem de solos cimentados que relaciona a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) com um parâmetro de porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/C_{iv}$ ). Essa razão associa a compactação e o teor de cimento. Dessa forma, o projetista pode escolher entre uma alta energia de compactação e um maior teor de cimento para uma mesma resistência (CORTE *et al.*, 2019; MARQUES; CONSOLI; FESTUGATO, 2019). Esse parâmetro também pode ser utilizado no controle da compactação em campo, de forma a corrigir uma compactação defeituosa pela adição de cimento (LEON, 2018).

Portanto, este estudo tem o objetivo de avaliar a aplicabilidade da razão  $\eta/C_{iv}$  na previsão do comportamento de um solo expansivo estabilizado com cimento.

## 2 Programação experimental

O programa experimental foi realizado em três partes. A primeira se baseou em caracterizar as propriedades do solo expansivo. Em seguida, foram feitos ensaios de resistência à compressão simples das misturas solo-cimento para diferentes teores de cimento e pesos específicos secos. A última etapa foi de análise estatística visando à avaliação da significância do teor de cimento e do peso específico na resistência à compressão simples.

O solo expansivo utilizado na pesquisa foi proveniente do município de Paulista (PE), localizado no litoral da Região Nordeste do Brasil. A granulometria e os limites físicos do solo estão apresentados no Quadro 1. A partir dos dados do Quadro 1, o solo foi classificado, de acordo com o SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), como uma argila plástica com baixa compressibilidade.

### Quadro 1 ►

Propriedades do solo expansivo.

Fonte: dados da pesquisa

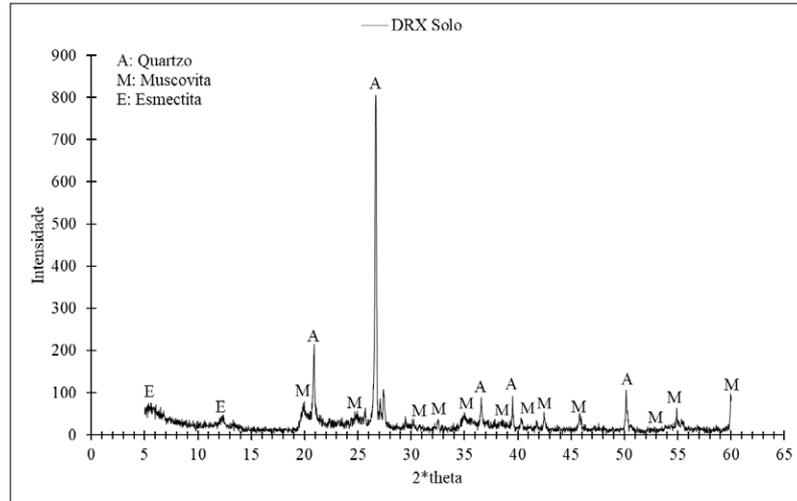
| Propriedades                 | Solo  | Norma         |
|------------------------------|-------|---------------|
| Areia > 0,06 – 2,0 mm (%)    | 10,58 | NBR 7181/2017 |
| Silte > 0,002 – 0,006 mm (%) | 43,96 |               |
| Argila ≤ 0,002 mm (%)        | 45,46 |               |
| Limite de Liquidez (%)       | 49    | NBR 6459/2016 |
| Limite de Plasticidade (%)   | 21    | NBR 7180/2016 |
| Índice de Plasticidade (%)   | 28    | -             |

O ensaio de adsorção do azul de metileno foi realizado para verificar a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e a superfície específica do solo, resultando em 59,2 meg/g e 462 m<sup>2</sup>/g, respectivamente. De acordo com os parâmetros de Lan (1980), o solo apresenta grau de atividade muito alto.

A Figura 1 apresenta o difratograma dos raios X (DRX) do solo estudado. A análise da Figura 1 permite observar picos de quartzo e bandas de muscovita e esmectita, sendo esses dois últimos argilominerais expansivos. O Quadro 2 apresenta o resultado do ensaio de Fluorescência de raios X (FRX) do solo estudado. A partir desse quadro, pode-se observar que os principais componentes do solo são os óxidos de silício (SiO<sub>2</sub>), de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Esses óxidos são elementos essenciais para a ocorrência das reações pozolânicas (SALDANHA *et al.*, 2017).

**Figura 1** ▶

Difração dos raios X do solo.  
Fonte: dados da pesquisa



**Quadro 2** ▶

Fluorescência dos raios X do solo. Fonte: dados da pesquisa

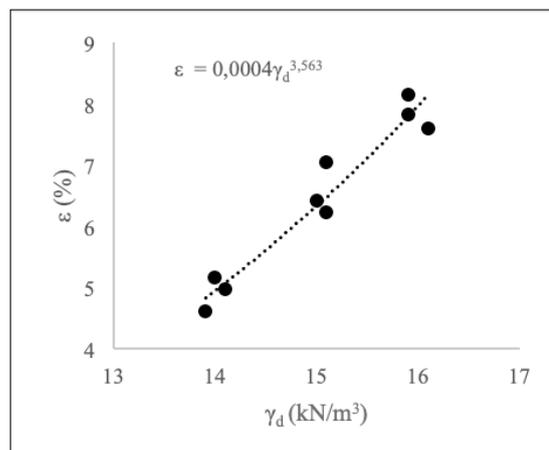
| Elemento                       | Fração (%) |
|--------------------------------|------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 55         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 25         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5          |
| K <sub>2</sub> O               | 2          |
| MgO                            | 1          |
| TiO <sub>2</sub>               | 1          |
| PR                             | 10         |

A curva de compactação feita por Silvani *et al.* (2020) resultou em um peso específico seco máximo de 15,4 kN/m<sup>3</sup> e umidade ótima de 23%. Por se tratar do mesmo solo, foram utilizados valores equivalentes. O mesmo ocorreu para a determinação do peso específico dos grãos do solo, que foi de 26,5 kN/m<sup>3</sup>.

O comportamento expansivo foi confirmado através do ensaio de expansão em uma dimensão feito por Silvani *et al.* (2020). Os resultados do ensaio estão expostos na Figura 2. A comparação dos resultados apresentados na Figura 2 com os critérios de Vijayvergiya e Ghazzaly (1973) indica que o solo estudado apresenta expansão elevada.

**Figura 2** ▶

Gráfico da expansão em uma dimensão em função do peso específico aparente seco.  
Fonte: dados da pesquisa



### 3 Métodos

Após os ensaios das propriedades físicas do solo, foram estabelecidos os teores de cimento, os pesos específicos secos e a umidade. Os teores de cimento (4%, 6% e 8%) foram escolhidos de acordo com a prática usual (ALHASSAN; MUSTAPHA, 2007; AUDU; OKOVIDO, 2019; PAKBAZ; ALIPOUR, 2012). Os pesos específicos secos e a umidade – 14 kN/m<sup>3</sup>, 15 kN/m<sup>3</sup> e 16 kN/m<sup>3</sup> e 19%, respectivamente – foram selecionados com base no ensaio de Proctor normal realizado por Silvani *et al.* (2020). O cimento utilizado na pesquisa foi o Portland CP-V-ARI (ABNT NBR 16697/2018).

#### 3.1 Moldagem e cura dos corpos de prova

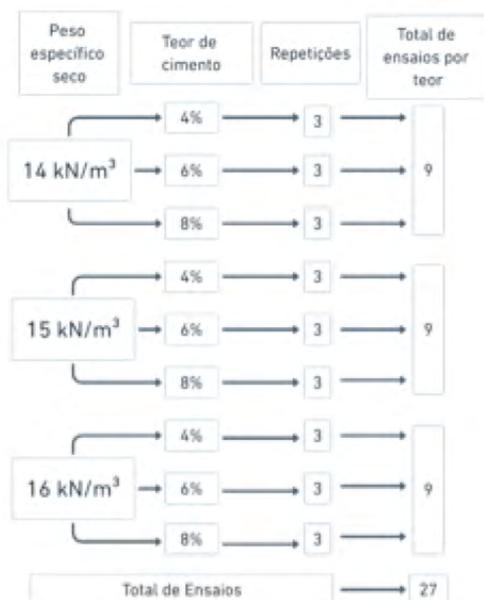
Os ensaios da pesquisa foram realizados em cilindros com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. O solo e o cimento foram misturados com água e, posteriormente, compactados estaticamente em três camadas, com escarificação entre elas. Os corpos de prova fora dos intervalos de umidade ( $\pm 0,5\%$ ) ou de peso específico seco (99% a 101%) foram descartados.

Durante os 28 dias de cura, os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida, com temperatura constante, envoltos em plástico filme e acondicionados em sacos plásticos. Visando minimizar os efeitos da sucção na resistência à compressão simples das amostras, os corpos de prova foram submersos em água 24 horas antes da ruptura (CONSOLI *et al.*, 2020).

#### 3.2 Ensaios de resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples têm sido usados na maioria dos programas experimentais para verificar a eficiência da estabilização do solo com cimento e para estudar os fatores de influência na resistência mecânica dos solos cimentados (CONSOLI *et al.*, 2011). Para o ensaio, feito em triplicata, os corpos de prova foram submetidos a um carregamento axial com deformação de 1% por minuto em uma prensa hidráulica Shimadzu. A Figura 3 indica o esquema dos 27 ensaios realizados.

**Figura 3** ▶  
Esquema experimental dos ensaios de resistência à compressão simples.  
Fonte: dados da pesquisa



### 3.3 Análise estatística

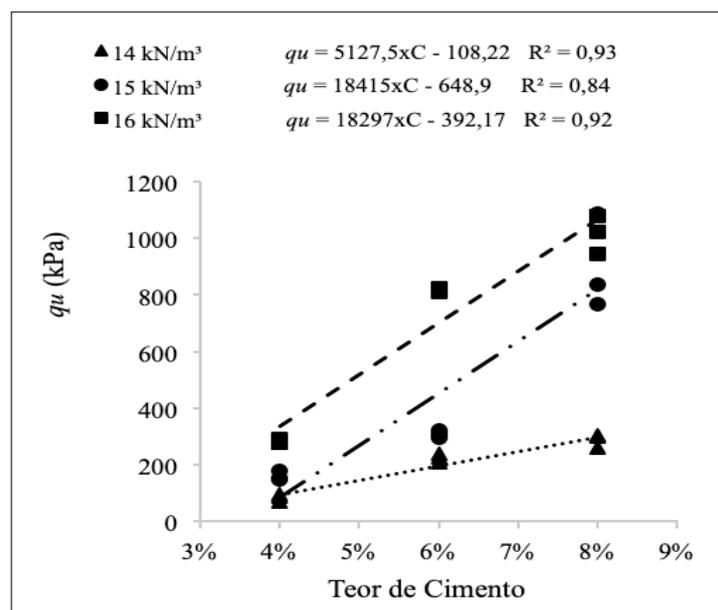
A análise estatística foi dividida em dois grupos. No primeiro grupo, considerou-se cada par de peso específico e teor de cimento como um tratamento. No segundo grupo, o peso específico e o teor de cimento, bem como a interação entre eles, foram analisados individualmente. Em ambas as situações, avaliou-se a influência da variação do peso específico e do teor de cimento na resistência à compressão simples.

As análises estatísticas do primeiro e do segundo grupo foram feitas por meio da análise de variância (ANOVA), com nível de significância de 5%, e, posteriormente, foi feito *post hoc* com o teste de Tukey, com mesmo nível de significância.

## 4 Resultados e discussão

A Figura 4 indica a variação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) com o teor de cimento ( $C$ ). A Figura 4 permite observar que as variáveis apresentam um comportamento linear: à medida que o teor do aglomerante aumenta, a resistência à compressão simples aumenta proporcionalmente (CONSOLI *et al.*, 2007; CONSOLI; CRUZ; FLOSS, 2011; CONSOLI; MORAES; FESTUGATO, 2013).

**Figura 4** ►  
Resistência à compressão simples em função do teor de cimento.  
Fonte: dados da pesquisa

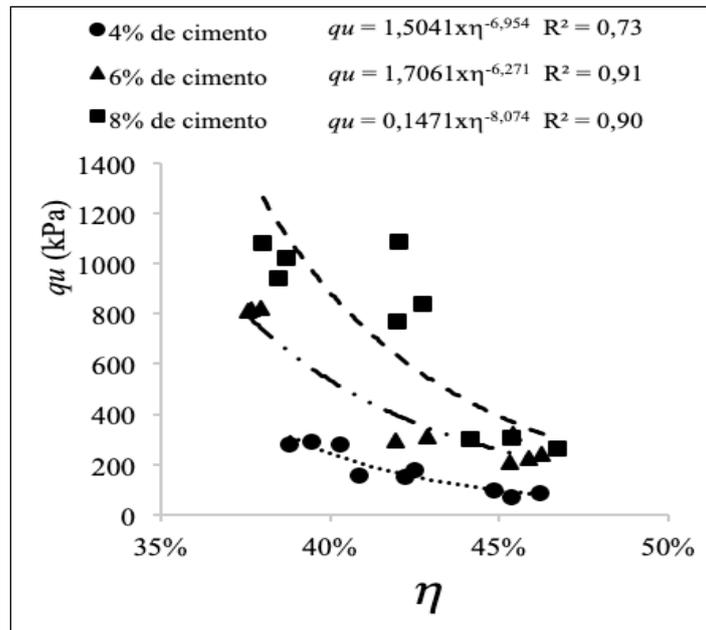


A Figura 5 apresenta a resistência à compressão simples em função da porosidade. De acordo com essa figura e com a prática experimental mostrada em vários artigos (CONSOLI *et al.*, 2011, 2017; CONSOLI; QUIÑÓNEZ; VILLALBA, 2016), a resistência à compressão simples reduz conforme a porosidade aumenta, devido a maior presença de vazios.

**Figura 5** ►

Resistência à compressão simples em função da porosidade.

Fonte: dados da pesquisa

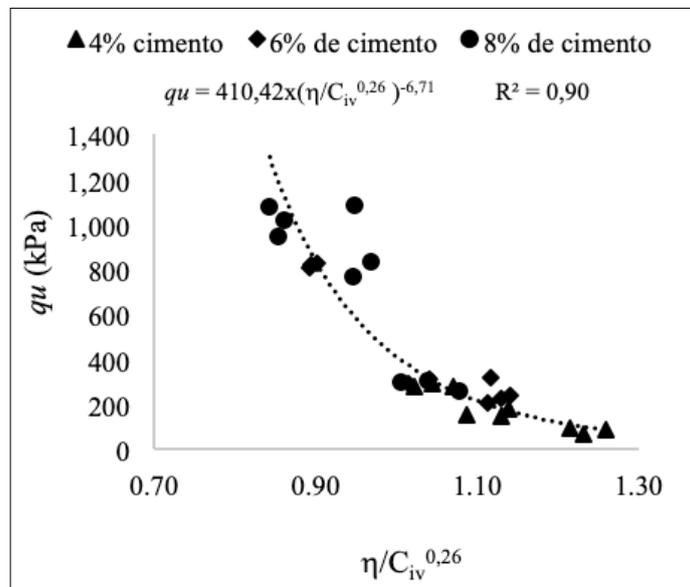


A Figura 6 contém a resistência à compressão simples pelo índice porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/C_{iv}^{0,26}$ ). Essa relação representa os parâmetros que influenciam no  $q_u$  (porosidade e teor de cimento) ajustados por um expoente escolhido como forma de potencializar o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (CONSOLI *et al.*, 2016). Assim como os parâmetros da compactação e do peso específico dos grãos, esse expoente também foi baseado no valor estabelecido por Silvani *et al.* (2020) para previsão da expansão livre do solo em questão. Logo, pode-se usar o mesmo parâmetro  $\eta/C_{iv}^{0,26}$  para prever a variação da resistência à compressão simples e da expansão do solo.

**Figura 6** ►

Varição da resistência à compressão simples em função da relação porosidade/teor volumétrico de cimento

Fonte: dados da pesquisa



#### 4.1 Análise estatística

Os dados pesquisados foram organizados em dois grupos. No primeiro grupo, os dados foram organizados em tratamentos. Cada tratamento foi nomeado por uma letra do alfabeto e constituído por um par de variáveis controláveis: peso específico e teor de cimento. O Quadro 3 ilustra a organização dos dados para o primeiro grupo.

**Quadro 3** ►  
Dados organizados em tratamentos.  
Fonte: dados da pesquisa

| $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) | C (%) | Tratamento | $Q_u$ (kPa) |      |      |
|---------------------------------|-------|------------|-------------|------|------|
|                                 |       |            | CP 1        | CP 2 | CP 3 |
| 14                              | 4     | A          | 70          | 87   | 96   |
| 14                              | 6     | B          | 208         | 227  | 241  |
| 14                              | 8     | C          | 262         | 300  | 306  |
| 15                              | 4     | D          | 150         | 155  | 179  |
| 15                              | 6     | E          | 295         | 311  | 321  |
| 15                              | 8     | F          | 770         | 837  | 1087 |
| 16                              | 4     | G          | 280         | 280  | 290  |
| 16                              | 6     | H          | 810         | 820  | 825  |
| 16                              | 8     | I          | 943         | 1022 | 1080 |

CP: corpo de prova;  $\gamma_d$ : peso específico seco;  $Q_u$ : resistência a compressão simples.

A análise dos dados organizados no Quadro 3 foi realizada através da ANOVA e do teste de Tukey de um fator. Dessa forma, foi possível comparar o efeito de cada tratamento sobre a resistência à compressão simples.

O segundo grupo foi constituído de forma a avaliar, isoladamente, o efeito de cada variável controlada, peso específico e teor de cimento, bem como da interação entre elas. A Tabela 1 ilustra a organização dos dados para duas variáveis controladas.

**Tabela 1** ►  
Dados organizados para duas variáveis controladas.  
Fonte: dados da pesquisa

| Variáveis                       | C (%) |     |      |      |
|---------------------------------|-------|-----|------|------|
|                                 | 4     | 6   | 8    |      |
| $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 14    | 70  | 150  | 280  |
|                                 | 14    | 87  | 155  | 280  |
|                                 | 14    | 96  | 179  | 290  |
|                                 | 15    | 208 | 295  | 810  |
|                                 | 15    | 227 | 311  | 820  |
|                                 | 15    | 241 | 321  | 825  |
|                                 | 16    | 262 | 770  | 943  |
|                                 | 16    | 300 | 837  | 1022 |
|                                 | 16    | 306 | 1087 | 1080 |

$\gamma_d$ : peso específico seco; C: teor de cimento.

A análise dos dados organizados na Tabela 1 foi realizada por meio da ANOVA e do teste de Tukey para dois fatores. Dessa forma, foi possível comparar o efeito de cada variável controlada e da interação entre elas sobre a resistência à compressão simples.

## 4.2 ANOVA e teste de Tukey para um fator

O resultado da ANOVA para um fator é apresentado no Quadro 4. Nesse quadro, observa-se que o valor-p encontrado é menor que 5%; esse fato significa que nem todas as médias avaliadas são iguais, logo os tratamentos promovem ganhos distintos de  $q_u$ .

**Quadro 4** ►  
Resultado da análise ANOVA com um fator.  
Fonte: dados da pesquisa

| Fonte da variação | Entre grupos | Dentro dos grupos | Total    |
|-------------------|--------------|-------------------|----------|
| SQ                | 3,00E+06     | 68386             | 3,00E+06 |
| gl                | 8            | 18                | 26       |
| MQ                | 373858       | 3799,2            | -        |
| F                 | 98,403807    | -                 | -        |
| valor-p           | 0,00%        | -                 | -        |
| F crítico         | 2,51016      | -                 | -        |

SQ: soma dos quadrados; gl: graus de liberdade; MQ: média dos quadrados; F: estatística do teste F; valor-p: significância dos dados; F crítico: estatística F para o nível de significância de 5%.

Para identificar quais tratamentos promoveram ganhos de resistência estatisticamente distintos ou iguais, utilizou-se o teste de Tukey, comparando os tratamentos dois a dois. O teste foi realizado com confiabilidade de 95%.

O Quadro 5 apresenta os resultados do teste de Tukey para uma análise direta. Os tratamentos que apresentaram  $q_u$  estatisticamente iguais compartilham uma mesma letra de referência. Como se pode observar, os tratamentos A e B apresentam resultados estatisticamente iguais, bem como os tratamentos F, H e I. Dessa forma, percebe-se que o aumento ou redução do teor de cimento pode ser compensado pelo aumento ou redução do peso específico, para uma mesma resistência à compressão simples.

**Quadro 5** ►  
Teste de Tukey organizado para tratamentos estatisticamente iguais.  
Fonte: dados da pesquisa

| Tratamento | $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) | C (%) | Média de $q_u$ (kpa) | Letra de referência |
|------------|---------------------------------|-------|----------------------|---------------------|
| A          | 14                              | 4     | 84,06                | A                   |
| B          | 14                              | 6     | 225,08               | AB                  |
| C          | 14                              | 8     | 289,16               | BC                  |
| D          | 15                              | 4     | 161,2                | ABCD                |
| E          | 15                              | 6     | 309                  | BCDE                |
| F          | 15                              | 8     | 897,8                | F                   |
| G          | 16                              | 4     | 283,33               | BCDEG               |
| H          | 16                              | 6     | 818,33               | FH                  |
| I          | 16                              | 8     | 1015,19              | FI                  |

$\gamma_d$ : peso específico seco; C: teor de cimento;  $Q_u$ : resistência a compressão simples.

### 4.3 ANOVA e teste de Tukey para dois fatores

Visto que os tratamentos influenciaram no resultado da compressão simples, é necessário avaliar a influência individual de cada variável controlada. O Quadro 6 apresenta a ANOVA para dois fatores. Como pode ser observado no Quadro 6, o valor-*p* foi menor que 5% para o peso específico, o teor de cimento e a interação entre eles; dessa forma, esses fatores são estatisticamente significantes, bem como sua interação.

**Quadro 6** ►  
ANOVA dois fatores.  
Fonte: dados da pesquisa

| Variável                        | <i>SQ</i>            | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | valor- <i>p</i> (%) | <i>F</i> crítico |
|---------------------------------|----------------------|-----------|-----------|----------|---------------------|------------------|
| $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 1,4x10 <sup>6</sup>  | 2         | 700260    | 184,3    | 0,00                | 3,55             |
| C (%)                           | 1,1 x10 <sup>6</sup> | 2         | 576542    | 151,7    | 0,00                | 3,55             |
| Interações                      | 0,4 x10 <sup>6</sup> | 4         | 109314    | 28,7     | 0,00                | 2,92             |
| Dentro                          | 0,6 x10 <sup>6</sup> | 18        | 3799,2    | -        | -                   | -                |
| Total                           | 3,0 x10 <sup>6</sup> | 26        | -         | -        | -                   | -                |

*SQ*: soma dos quadrados; *gl*: graus de liberdade; *MQ*: média dos quadrados; *F*: estatística do teste *F*; valor-*p*: significância dos dados; *F* crítico: estatística *F* para o nível de significância de 5%.

A identificação de quais fatores promoveram ganhos de resistência distintos foi realizada através do teste de Tukey para dois fatores, cujos resultados são apresentados no Quadro 7 e no Quadro 8. Os valores-*p* menores que 5% (estatisticamente significativos) estão sublinhados.

**Quadro 7** ►  
Teste de Tukey para  
peso específico.  
Fonte: dados da pesquisa

| Peso específico   |              |              |              |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| kN/m <sup>3</sup> | 14           | 15           | 16           |
| 14                |              | <u>0,02%</u> | <u>0,00%</u> |
| 15                | <u>0,02%</u> |              | <u>0,03%</u> |
| 16                | <u>0,00%</u> | <u>0,03%</u> |              |

**Quadro 8** ►  
Teste de Tukey para  
teor de cimento.  
Fonte: dados da pesquisa

| Teor de cimento |              |              |              |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| %               | 4            | 6            | 8            |
| 4               |              | <u>0,01%</u> | <u>0,00%</u> |
| 6               | <u>0,01%</u> |              | <u>0,00%</u> |
| 8               | <u>0,00%</u> | <u>0,00%</u> |              |

O Quadro 7 e o Quadro 8 indicam que as duas variáveis controláveis, peso específico e teor de cimento, influenciam significativamente na resistência à compressão simples. O Quadro 9 apresenta o resultado do teste de Tukey para a interação entre as variáveis controladas. Os valores-*p* menores que 5% estão sublinhados.

**Quadro 9 ►**

Teste de Tukey para a interação entre peso específico e teor de cimento.  
*Fonte: dados da pesquisa*

| TRATAMENTOS |        | valor- <i>p</i> |
|-------------|--------|-----------------|
| A-14/4      | B-14/6 | 12,90%          |
| A-14/4      | C-14/8 | <u>1,04%</u>    |
| A-14/4      | D-15/4 | 72,30%          |
| A-14/4      | G-16/4 | <u>1,32%</u>    |
| B-14/6      | C-14/8 | 85,52%          |
| B-14/6      | E-15/6 | 64,40%          |
| B-14/6      | I-16/6 | <u>0,00%</u>    |
| C-14/8      | F-15/8 | <u>0,00%</u>    |
| C-14/8      | I-16/8 | <u>0,00%</u>    |
| D-15/4      | E-15/6 | 10,10%          |
| D-15/4      | F-15/8 | <u>0,00%</u>    |
| D-15/4      | G-16/4 | 24,35%          |
| E-15/6      | F-15/8 | <u>0,00%</u>    |
| E-15/6      | H-16/6 | <u>0,01%</u>    |
| F-15/8      | I-16/8 | 28,18%          |
| G-16/4      | H-16/6 | <u>0,01%</u>    |
| G-16/4      | I-16/8 | <u>0,00%</u>    |
| H-16/6      | I-16/8 | <u>1,46%</u>    |

Observa-se, no Quadro 9, que a interação foi insignificante em algumas comparações – por exemplo, tratamento A e tratamento B, tratamento A e tratamento D. Dessa forma, o efeito conjunto do teor de cimento e do peso específico, nesses tratamentos, apresenta o mesmo resultado. O Quadro 9 mostra, ainda, que diferentes combinações das variáveis controláveis permitem obter  $q_u$  estatisticamente iguais. Esse fato corrobora os achados expostos na Figura 6, pois mostra que estatisticamente o aumento ou redução de uma das variáveis pode ser compensado pela outra, de forma a manter o resultado (resistência à compressão simples) semelhante.

#### 4 Conclusões

Este trabalho apresentou a previsão da resistência à compressão simples do solo expansivo com diferentes teores de cimento e pesos específicos a partir da metodologia de dosagem com base no índice porosidade/teor volumétrico de cimento ajustado por um expoente. A partir do presente estudo, pode-se afirmar que:

- Considerando os teores de cimento e pesos específicos estudados, a resistência à compressão simples do solo melhora significativamente com o aumento do teor de cimento adicionado à mistura. E, quanto maior o peso específico seco do solo, para um teor de cimento constante, maior é a resistência à compressão simples. Isso ocorre, provavelmente, porque, quanto maior o peso específico seco, mais próximas estarão suas partículas;
- A aplicação do índice  $\eta/C_{iv}$ , corrigido pelo coeficiente de 0,26 é eficaz para prever a resistência à compressão simples do solo expansivo a partir de uma curva de dosagem que relaciona  $q_u$  com a porosidade e o teor volumétrico de cimento;
- Além de validar a afirmativa acima, a análise estatística confirma a aplicabilidade da razão  $\eta/(C_{iv})^{0,26}$ , pois constata que o efeito do peso específico do solo e o teor de cimento influenciam diretamente na resistência à compressão simples.

Nesse contexto, afirma-se que, visando a uma mesma resistência à compressão simples, pode-se optar por aplicar uma maior energia de compactação ou um teor mais elevado de cimento ou, alternativamente, uma combinação de ambos os processos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento (Chamada Universal MCTIC/CNPq n.º 28/2018 – Processo 430993/2018-8) e pela concessão de bolsas de iniciação científica e de pós-graduação.

## Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland –Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ALHASSAN, M.; MUSTAPHA, A. M. Effect of rice husk ash on cement stabilized laterite. **Electronic Journal of Practices and Technologies**, n. 11, p. 47-58, 2007. Disponível em: [http://lejpt.academicdirect.org/A11/047\\_058.pdf](http://lejpt.academicdirect.org/A11/047_058.pdf) . Acesso em: 13 jun. 2022.

ANOOP, S. P.; BEEGOM, H.; JOHNSON, J. P.; MIDHULA, J.; THARIS, M. T. N.; PRASANTH, S. Potential of egg shell powder as replacement of lime in soil stabilization. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 4, n. 8, p. 86-88, Aug. 2017. DOI: <https://doi.org/10.22161/ijaers.4.8.15> .

AUDU, H. A. P.; OKOVIDO, J. O. Experimental study on effect of lime and cement stabilizers on geotechnical properties of lateritic soil. **International Journal of Engineering Research and Advanced Technology (IJERAT)**, v. 5, n. 4, p. 9-15, 2019. DOI: <https://doi.org/10.31695/IJERAT.2019.3409> .

CONSOLI, N. C.; BITTAR, E.; SAMANIEGO, A.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MIRANDA, T.; CRISTELO, N. The Effect of mellowing and coal fly ash addition on the behavior of sulfate-rich dispersive clay after lime stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 6, p. 1-10, 2019a. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002699](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002699) .

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; FLOSS, M. F. Variables controlling strength of artificially cemented sands: influence of curing time. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 5, p. 692-696, 2011. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000205](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000205) .

CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L.; SCHEUERMANN, H. C.; MIGUEL, G. D.; NETO, A. T.; ANDREGHETTO, D. Durability assessment of soil-pozzolan-lime blends through ultrasonic-pulse velocity test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 8, Aug. 2020. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003298](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003298) .

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. Key parameters for strength control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 133, n. 2, p. 197-215, Feb. 2007. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:2\(197\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(197)) .

CONSOLI, N. C.; LEON, H. B.; CARRETTA, M. S.; DARONCO, J. V. L.; LOURENÇO, D. E. The effects of curing time and temperature on stiffness, strength and durability of sand-environment friendly binder blends. **Soils and Foundations**, v. 59, n. 5, p. 1428-1439, 2019b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.06.007> .

CONSOLI, N. C.; MORAES, R. R.; FESTUGATO, L. Variables controlling strength of fiber-reinforced cemented soils. **Ground Improvement**, v. 166, n. 4, p. 221-232, nov. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1680/grim.12.00004> .

CONSOLI, N. C.; QUIÑONEZ, R. A.; GONZÁLEZ, L. E.; LÓPEZ, R. A. 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**, v. 29, n. 5, 2017. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001819](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001819) .

CONSOLI, N. C.; QUIÑONEZ, R. A.; MARQUES, S. F. V.; VENSON, G. I.; PASCHE, E.; VELÁSQUEZ, L. E. G. Single model establishing strength of dispersive clay treated with distinct binders. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 53, n. 12, p. 2072-2079, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0606> .

CONSOLI, N. C.; QUIÑONEZ, R. A.; VILLALBA, N. M. K. Durability, strength and stiffness of dispersive clay-lime blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 11, 2016. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001632](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001632) .

CONSOLI, N. C.; ROSA, A. D.; CORTE, M. B.; LOPES, L. S.; CONSOLI, B. S. Porosity-cement ratio controlling strength of artificially cemented clays. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 8, p. 1249-1254, 2011. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000283](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000283) .

CORTE, M. B.; IBRAIM, E.; FESTUGATO, L.; DIAMBRA, A.; CONSOLI, N. C. Stiffness of lightly cemented sand under multiaxial loading. **ES3 Web of Conferences**, v. 92, p. 1-6, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199211008> .

DARAEI, A.; HERKI, B. M. A.; SHERWANI, A. F. H.; ZARE, S. Slope stability in swelling soils using cement grout: a case study. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 4, n. 10, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40891-018-0127-9> .

FERREIRA, S. R. M.; PAIVA, S. C.; MORAIS, J. J. O.; VIANA, R. B. Avaliação da expansão de um solo do município de Paulista-PE melhorado com cal. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, supl. 1, artigo e-11930, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0266> .

FESTUGATO, L.; SILVA, A. P.; DIAMBRA, A.; CONSOLI, N. C.; IBRAIM, E. Modelling tensile/compressive strength ratio of fiber reinforced cemented soils. **Geotextiles and geomembranes**, v. 46, n. 2, p. 155-165, Apr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2017.11.003> .

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/7845> . Acesso em: 13 jun. 2022.

GONG, B.; CHENG, Z.; TONG, J.; LIU, J.; LIU, M. Field test study on expansive soil canal of middle route of South to North Water Diversion Project. **Japanese Geotechnical Society Special Publication**, v. 2, n. 75, p. 2600-2605, Jan. 2016. DOI: <https://doi.org/10.3208/jgssp.CHN-37> .

IBEIRO, L. S. **Estudo da distribuição dimensional de poros e da condutividade hidráulica de solos arenosos compactados e tratados com cal e cimento**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/153307> . Acesso em: 13 jun. 2022.

KULANTHAIVEL, P.; SOUNDARA, B.; VELMURUGAN, S.; NAVEENRAJ, V. Experimental investigation on stabilization of clay soil using nano-material and white cement. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, n. 2, p. 507-511, Mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.107> .

KUMAR, J. K.; KUMAR, V. P. Soil stabilization using E-waste: a retrospective analysis. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, n. 3, p. 661-663, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.145> .

LATIFI, N.; EISAZADEH, A.; MARTO, A.; MEEHAN, C. Tropical residual soil stabilization: a powder form material for increasing soil strength. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 827-836, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.115> .

LAN, T. N. L'Essai au bleu de méthylène – un progrès dans la mesure et le contrôle de la propreté des granulats. **Bulletin de Liaison des Ponts des chaussées**, França, n. 107, p. 130-135, 1980.

LEON, H. B. **O índice porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta$ /Civ) como um parâmetro de estado para areias cimentadas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/174407> . Acesso em: 12 jun. 2022.

LI, J.; CAMERON, D. A.; REN, G. Case study and back analysis of a residential building damaged by expansive soil. **Computers and Geotechnics**, v. 56, p. 89-99, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.11.005> .

MARQUES, S. F. V.; CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L. Effects of curing stress on the stiffness of cemented-mixed sand. **ES3 Web of Conferences**, v. 92, p. 1-5, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199204006> .

PAKBAZ, M. S.; ALIPOUR, R. Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay. **Applied Clay Science**, v. 67-68, p. 1-4, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.07.006> .

PEI, P.; ZHAO, Y.; PENG PENG, N.; MEI, G. A protective measure for expansive soil slopes based on moisture content control. **Engineering Geology**, v. 269, n. 8, p. 105527, Feb. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105527> .

POONI, J.; GIUSTOZZI, F.; ROBERT, D.; SETUNGE, S.; O'DONNELL, B. Durability of enzyme stabilized expansive soil in road pavements subjected to moisture degradation. **Transportation Geotechnics**, v. 21, p. 100255, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100255> .

ROCHA, G. S. **Efeito da cal na resposta mecânica de um solo residual maduro: análise da resistência à compressão não confinada, permeabilidade, compressibilidade e efeito de cura acelerada na resistência mecânica**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/18660> . Acesso em: 13 jun. 2022.

SALDANHA, R. B.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; RIBEIRO, J. L. D.; CONSOLI, N. C. Modelling the influence of density, curing time, amounts of lime and sodium chloride on the durability of compacted geopolymers monolithic walls. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 65-72, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.023> .

SILVANI, C.; LUCENA, L. C. F. L.; TENÓRIO, E. A. G.; SCHEUERMANN, H. C.; CONSOLI, N. C. Key Parameter for Swelling Control of Compacted Expansive Fine-Grained Soil–Lime Blends. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 146, n. 9, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002335](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002335) .

TAHER, Z. J.; SCALIA, J.; BAREITHER, C. A. Comparative assessment of expansive soil stabilization by commercially available polymers. **Transportation Geotechnics**, v. 24, p. 100387, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100387> .

TOMASI, L. F. **Comportamento mecânico de resíduo de mineração estabilizado com cimento**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/178448> . Acesso em: 13 jun. 2022.

VIJAYVERGIYA, V. N.; GHAZZALY, O. I. Prediction of swelling potential for natural clays. **Proceedings of Third International Research and Engineering Conference on Expansive Clays**, v. 3, p. 227-236, 1973.