

Análise da viabilidade do índice porosidade/teor volumétrico de ligante na previsão do comportamento mecânico de um solo sedimentar argiloso

Carolina Pereira dos Santos¹, Giovani Jordi Bruschi¹, Emanuele Amanda Gauer²

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Osvaldo Aranha, 99, Porto Alegre, 90035-190 – Brasil.

² Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Rodovia Taufik Germano, 3013, Cachoeira do Sul, 96503-205 – Brasil.

carolinaps@ufrgs.br, giovani.bruschi@ufrgs.br, emanuele.gauer@ufsm.br

Abstract: *Stabilization is a technique for the improvement of the soil properties, however, little research presents a dosage methodology for the addition of binder as seen for concrete. The present research seeks to analyze the effect of porosity/binder index (η/B_{iv}) on the behavior of a clayey soil. The controlling factors evaluated are the amounts of fly-ash and dolomite lime and the dry unit weight. The results indicate an increase in the unconfined compressive strength with the addition of lime and fly-ash as well as with the reduction of the dry unit weight. Still, it was possible to prove the effectiveness of the porosity/binder index on the analysis of the mechanical behavior of the clayey soil.*

Keywords: *Sedimentary soil; Soil stabilization; Alternative binder.*

Resumo: *A estabilização é uma técnica para melhoria das propriedades do solo, entretanto, poucos estudos apresentam uma metodologia de dosagem para a adição de ligantes como existe para concretos. A presente pesquisa busca analisar o efeito do índice porosidade/teor volumétrico de ligante (η/B_{iv}) no comportamento de um solo argiloso. Os fatores controláveis são as quantidades de cinza volante e de cal dolomítica e o peso específico aparente seco. Os resultados indicam aumento da resistência à compressão não confinada com a adição de cal e cinza, assim como com a redução da porosidade. Além disso, foi possível comprovar a eficácia do índice porosidade/teor volumétrico de ligante na análise do comportamento de solos argilosos.*

Palavras-chave: *Solo sedimentar; Estabilização de solos; Ligante alternativo.*

1. Introdução

Os solos sedimentares argilosos se dão, principalmente, pelo intemperismo físico-químico das rochas. Sendo que sua formação pode ocorrer de duas maneiras: pelo acúmulo de partículas minerais, a partir de componentes em solução durante o transporte de sedimentos e pela decomposição química de outros minerais (LAMBE e WHITMAN, 1979).

Solos argilosos apresentam, por diversas vezes, rigidez média a baixa em seu estado seco, no entanto, quando saturados ou parcialmente saturados tem sua rigidez reduzida, em função da redução da tensão efetiva. Assim, são geralmente caracterizados

por baixa capacidade de carga e alta compressibilidade (SAKR, SHAHIN e METWALLY, 2009).

Diversos métodos podem ser adotados para melhoria das propriedades geotécnicas dos solos argilosos, entre eles se destaca a estabilização química pela adição de agentes cimentantes, usualmente com o uso de cimento Portland (DIAMBRA *et al.*, 2018; RIOS *et al.*, 2013). No entanto, devido as preocupações ambientais e o custo do cimento, o emprego de materiais alternativos vem sendo cada vez mais necessário (AL-SWAIDANI, HAMMOUD e MEZIAB, 2016; PACHECO-TORGAL, CASTRO-GOMES e JALALI, 2008).

No Brasil são produzidas anualmente cerca de 4 milhões de toneladas de cinza volante, um subproduto da queima do carvão betuminoso. Esse material não apresenta propriedades autocimentantes quando utilizado de forma isolada e, com isso, para que seja possível seu emprego na estabilização de solos deve ser associado a outros insumos, como por exemplo a cal (CONSOLI, DALLA ROSA e SALDANHA, 2011; SALDANHA, REDDY e CONSOLI, 2019).

A previsão do comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados, bem como sua dosagem racional, é um campo da engenharia geotécnica que ainda carece de competências técnico-científicas. De modo a suprir essa lacuna de conhecimento, Consoli *et al.* (2007) propuseram um método de dosagem, semelhante ao fator água/cimento para concretos, com o índice porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}), que é capaz de relacionar os vazios presentes na amostra com o teor volumétrico de agente cimentante aplicado, possibilitando a previsão do comportamento mecânico dos materiais.

Posteriormente, Consoli *et al.* (2018) sugeriram o índice porosidade/teor volumétrico de ligante (η/B_{iv}), que permite normalizar o comportamento de resistência à compressão não confinada e diametral, módulo de cisalhamento a pequenas deformações e a perda de massa acumulada de solos melhorados com ligantes alternativos (CONSOLI *et al.*, 2020; CONSOLI *et al.*, 2019).

O índice η/B_{iv} é relativamente recente e os estudos que foram realizados analisaram, em sua maior parte, a eficácia do método em solos residuais Botucatu. Desse modo, o objetivo deste artigo é validar o índice η/B_{iv} para a previsão do comportamento mecânico, e como método de dosagem como o fator água/cimento, de solos sedimentares argilosos na resistência à compressão não confinada das amostras.

2. Programa experimental

2.1. Materiais

O solo usado neste estudo é um solo sedimentar argiloso do sul do Brasil. Na Figura 1 é exposta a análise granulométrica do material (ABNT, 2018). Ainda, de acordo com a classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS (ASTM, 2017), o solo é uma argila inorgânica de baixa a média plasticidade (CL).

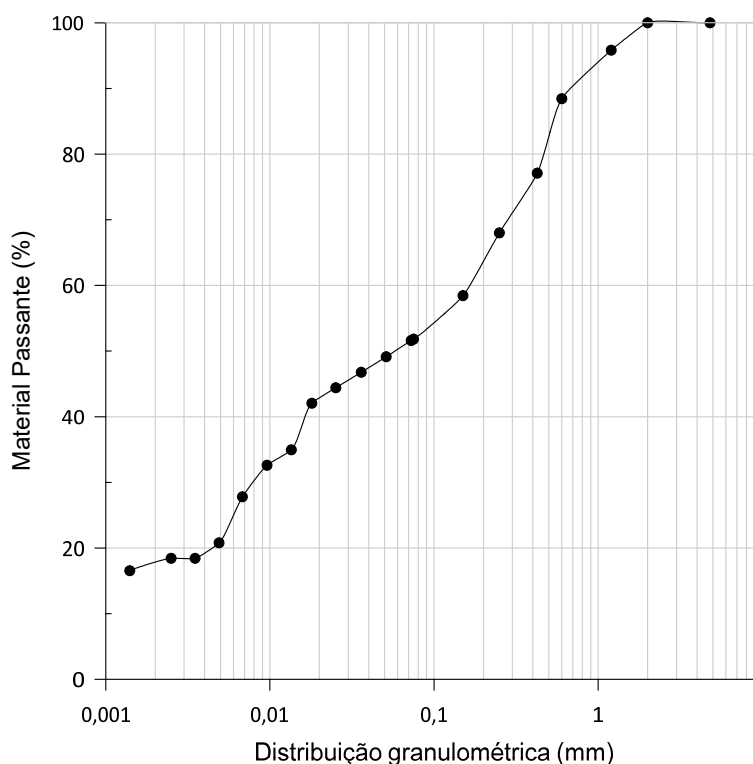


Figura 1. Análise granulométrica do solo

Isto posto, para melhoramento das características do solo fez-se uso de cal dolomítica hidratada CH-II e da cinza volante (CV) da classe C (ASTM, 2019). A massa específica da cal e da cinza são, respectivamente, $2,49 \text{ g/cm}^3$ e $2,23 \text{ g/cm}^3$, na Tabela 1 são apresentadas as propriedades físicas do solo (ABNT, 2016a, 2016b, 2018, 2017, 2009).

Tabela 1. Propriedades físicas do solo, da cal e da cinza

Propriedades	Argila sedimentar
Limite de Liquidez (%)	40
Limite de Plasticidade (%)	29
Índice de Plasticidade	11
Massa Específica do Solo (g/cm^3)	2,55
Areia Grossa (%) – $0,6 \leq d < 2 \text{ mm}$	5
Areia Média (%) – $0,2 \leq d < 0,6 \text{ mm}$	20
Areia Fina (%) – $0,06 \leq d < 0,2 \text{ mm}$	23,5
Silte (%) – $0,002 \leq d < 0,06 \text{ mm}$	9,5
Argila (%) – $d < 0,002 \text{ mm}$	42
Classificação SUCS	CL

2.2. Determinação dos valores de moldagem e cura das amostras

As quantidades de cal adotadas foram determinadas pelo método de Eades e Grim (1960), que busca encontrar a quantidade mínima de cal para elevar o pH do solo,

aproximadamente, a 12,4, ou até que ocorra uma estabilização da curva de pH (ROGERS, GLENDINNING e ROFF, 1997).

Visto que não existe normatização para a adição de cinza volante ao solo, repetiu-se o ensaio anterior com pequenos incrementos de cinza a fim de identificar a alteração do pH com as adições, dado que a cinza volante possui grande quantidade de sílica e alumina em sua composição, assim como as argilas, passíveis de reagir com a cal (CONSOLI, DALLA ROSA e SALDANHA, 2011; CONSOLI *et al.*, 2001).

Na Figura 2 consta o teste de pH pelo método de Eades e Grim (1960). Pelos valores expostos percebe-se a estabilização das curvas de pH entre 4% e 6% de cal. Por conseguinte, dados os resultados do ensaio de pH, os teores de cal adotados foram 5%, 7%, 9% e 11%, para os teores de cinza de 0%, 4% e 6%.

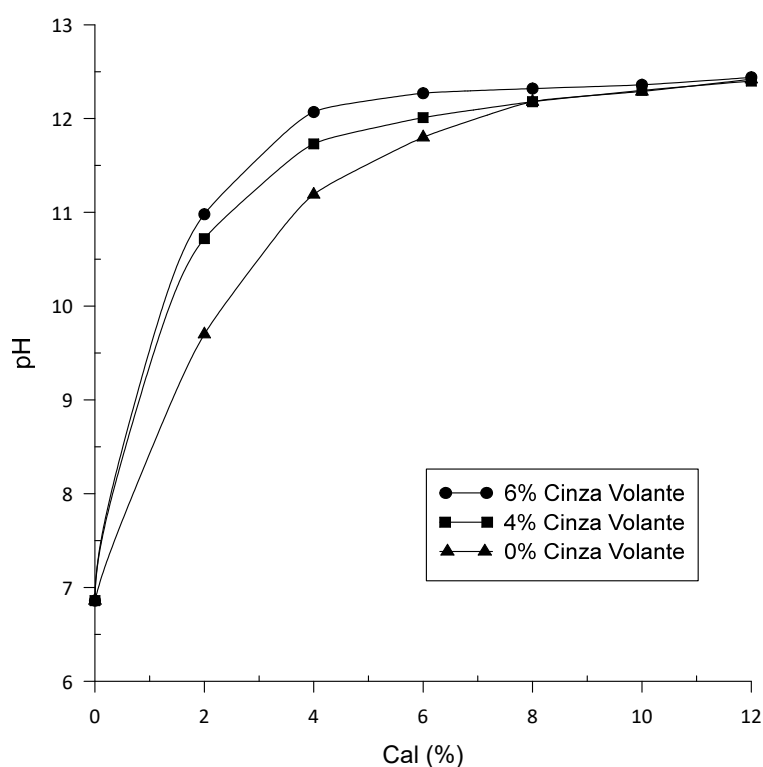


Figura 2. Teste de pH

Com base no ensaio de compactação, energia normal (ABNT, 2016c) determinou-se dois pesos específicos para a pesquisa, 15 kN/m^3 - o peso específico aparente seco máximo e, $14,3 \text{ kN/m}^3$ - 95% do peso específico aparente máximo, a fim de verificar a influência da porosidade na resistência à compressão não confinada. A umidade das misturas foi mantida constante em 27% conforme a umidade ótima atingida no ensaio de compactação (ABNT, 2016c), Figura 3.

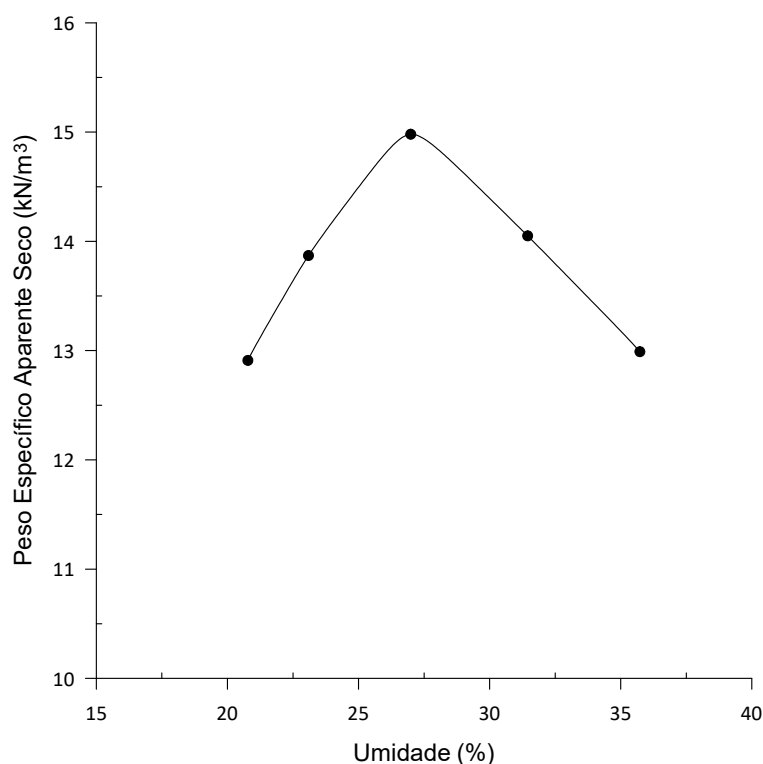


Figura 3. Ensaio de compactação

Amostras cilíndricas foram moldadas com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, em um molde tripartido. Assim, a quantidade de solo foi definida pela multiplicação da massa específica aparente seca pelo volume do cilindro, então a quantidade de cinza foi calculada em relação a massa de solo e a de cal em função da massa de solo e de cinza, finalmente a quantidade de água destilada era determinada de acordo com a massa total dos materiais secos.

Após moldados, os corpos de prova tiveram sua massa e medidas aferidas, bem como amostras reservadas para determinação da umidade, em seguida, eram acondicionados em sacos herméticos e curados por 28 dias a temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

As amostras eram consideradas aptas a serem ensaiadas quando atendiam aos seguintes critérios de aceitação: Grau de compactação entre 99% e 101% do determinado; Teor de umidade $\pm 0,5\%$ do calculado; Diâmetro ± 1 mm e Altura ± 2 mm (ABNT, 2012a).

2.3. Ensaio de Compressão Não Confinada

Para este ensaio fez-se uso de uma prensa de compressão não confinada com anel dinamométrico e capacidade máxima de carga de 25 toneladas. A velocidade de deformação do ensaio foi de 1,14 mm por minuto em conformidade com a D5102 (ASTM, 2009).

Antes da realização do ensaio, os corpos de prova foram submersos por pelo menos 24 horas de modo a saturá-los e reduzir o efeito da sucção na resistência. Ainda, as amostras ensaiadas eram consideradas adequadas para análise apenas quando obtinham resistência de 10% para mais ou para menos da média do conjunto – triplicatas.

2.4. Medidas de sucção – Técnica do papel filtro

Em sua umidade de moldagem, as amostras testadas encontravam-se não saturadas. Devido a menor permeabilidade associada as argilas, um certo nível de sucção pode estar presente alterando o grau de saturação, mesmo após o período de imersão de 24h dos corpos de prova.

Por tanto, de modo a verificar a magnitude da sucção nas amostras rompidas à compressão não confinada e examinar se havia diferença entre as amostras com porosidades e teores de ligantes distintos mediu-se a sucção matricial das amostras, isto é, a sucção resultante das forças capilares dentro do corpo de prova, por efeito das condições ambientais (MARINHO, 1994). A técnica utilizada para medição da sucção foi a do papel filtro, apresentada por Chandler, Crilly e Montgomery-Smith (1992).

O papel filtro utilizado foi o Whatman Nº 42. Sua umidade inicial é de aproximadamente 6% o que permite medições de 0 a 29 MPa. A Equação 1 apresenta a expressão de calibração para medidas de umidades do papel filtro maior que 47% e a Equação 2 para umidades menores ou iguais a 47% (CHANDLER, CRILLY e MONTGOMERY-SMITH, 1992).

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(6,05-2,48 \log w)} \quad (1)$$

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(4,84-0,0622w)} \quad (2)$$

2.5. Efeito do índice porosidade/teor volumétrico de ligante

De acordo com Consoli *et al.* (2018), expressando a resistência à compressão não confinada pelo índice porosidade/teor volumétrico de ligante é possível criar uma relação única para previsão do comportamento mecânico. A Equação 3 expressa a porosidade em função do peso específico aparente seco, da massa de solo (S), da quantidade de pozolana (P) e da fração de cal (C), sendo que cada material tem seu peso específico natural (γ_{SS} , γ_{SP} e γ_{SC}) considerado também.

$$\eta = 100 - 100 \left\{ \frac{\gamma_d}{\frac{S}{100} + \frac{P}{10} + \frac{C}{100}} \left[\frac{S}{\gamma_{SS}} + \frac{P}{\gamma_{SP}} + \frac{C}{\gamma_{SC}} \right] \right\} \quad (3)$$

A Equação 4 apresenta o teor volumétrico do ligante segundo o método proposto por Consoli *et al.* (2018), onde “ V_P ” e “ V_C ” representam, respectivamente, o volume de pozolana e cal na amostra e “ m_P ” e “ m_C ”, nessa ordem, a massa de pozolana e a massa de cal.

$$B_{iv} = \frac{V_P + V_C}{V} = \frac{m_P}{\gamma_{SP}} + \frac{m_C}{\gamma_{SC}} \quad (4)$$

Por fim, o índice dá-se pela razão entre as Equações 3 e 4, além do mais, um expoente externo pode ser adicionado ao “ B_{iv} ”, assim como anteriormente constatado para o índice porosidade/teor volumétrico de cimento, para um melhor ajuste do teor de ligante. Esse expoente, de acordo com Consoli *et al.* (2007), provavelmente, se dê em função dos materiais usados, por diversas vezes sendo necessário ajustá-lo a medida que os materiais variem.

2.6. Análise estatística de variância

Para validação dos resultados obtidos pelo ensaio de compressão não confinada foi realizada uma análise estatística de variância (ANOVA). Com a utilização desse procedimento experimental foi viável discernir a influência dos fatores controláveis na variável resposta (resistência à compressão não confinada), o nível de confiabilidade definido sendo de 95%. Na Tabela 2 são apontados os fatores controláveis do estudo.

Tabela 2. Fatores controláveis do estudo

Fatores Controláveis	Níveis dos Fatores
Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³)	14,3; 15
Teor de Cinza (%)	0; 4; 6
Teor de Cal	5; 7; 9; 11

3. Resultados e discussão

3.1. Influência do índice porosidade/teor volumétrico de ligante na resistência à compressão não confinada

A Figura 4 expressa os resultados de resistência à compressão não confinada (q_u) pelo índice porosidade/teor volumétrico de ligante com um expoente de 0,28, utilizado e sugerido em pesquisas anteriores para um melhor ajuste do coeficiente de determinação (R^2) (CONSOLI *et al.*, 2020; CONSOLI *et al.*, 2019; CONSOLI *et al.*, 2018).

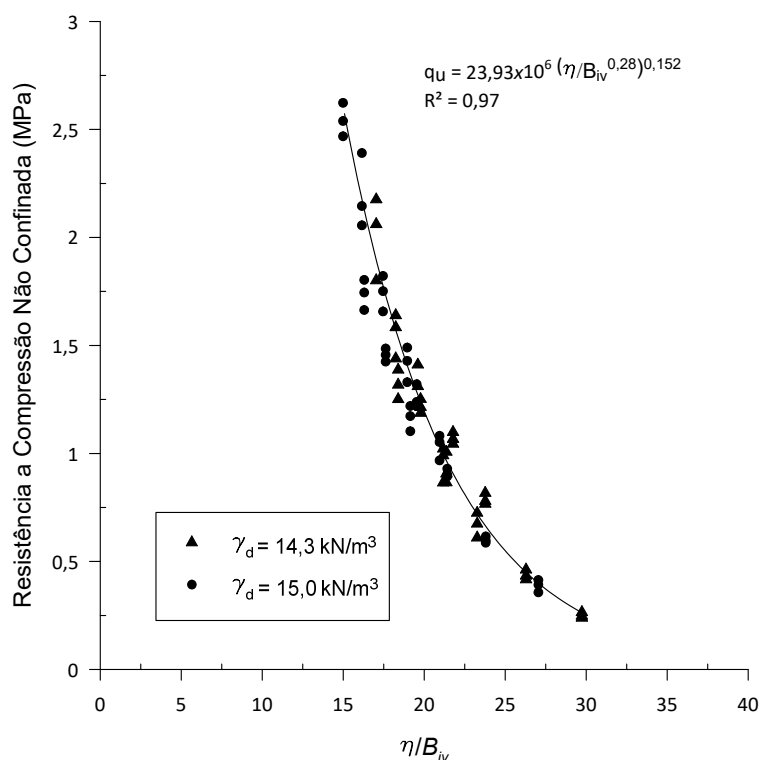


Figura 4. Resistência à Compressão não confinada com o ajuste do índice porosidade/teor volumétrico de ligante

Para os fatores e níveis estudados houve acréscimo da resistência à compressão não confinada à medida que o peso específico aparente seco aumentou e o teores de cal e cinza foram elevados (lê-se maior resistência para menores valores do índice η/B_{iv}).

Ainda, a partir do exposto pode-se afirmar que o índice porosidade/teor volumétrico de ligante comanda a resistência à compressão não confinada do solo com cal dolomítica e cinza volante do presente estudo, se mostrando eficaz na previsão do comportamento mecânico de solos sedimentares.

Logo, com a Equação 5, obtida pela curva resistência à compressão não confinada η/B_{iv} , é exequível estimar, com bastante precisão devido ao alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,97$), a resistência para esse solo e ligante.

$$q_u = 23,93 \times 10^6 \frac{\eta^{0,152}}{B_{iv}^{0,28}} \quad (5)$$

Para aplicação dos solos melhorados como camada de pavimentos, a norma brasileira NBR 12253 (ABNT, 2012b) estabelece um valor mínimo de resistência à compressão não confinada de 2,1 MPa.

Apesar da variável resposta ser do tipo maior-é-melhor, ou seja, os fatores são estudados a fim de obter-se a melhor condição para que haja o aumento da resistência, realizou-se uma análise estatística de Otimização de Resposta com o valor alvo de 2,1 MPa, em outros termos, verificou-se os valores ótimos dos fatores controláveis para a obtenção do valor alvo.

Assim, a Otimização de Resposta possibilitou a identificação do melhor ajuste para a atingir o valor de resistência de interesse, sendo eles: Peso Específico Aparente Seco de 14,5 kN/m³, teor de cal igual a 11% e teor de cinza igual a 6%.

Além disso, com a Equação 5 é exequível determinar o η/B_{iv} mínimo (17,0) para que o critério de resistência seja atingido, podendo deste modo estabelecer diferentes teores de cal e cinza, bem como distintos pesos específicos aparentes secos, com base nos critérios de projeto.

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise de variância da pesquisa.

Tabela 3. Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de resistência

Fonte	Graus de Liberdade	Soma Quadrática	Média Quadrática	Valor F	Valor p
A – Teor de Cal	3	7768944	2589648	161,86	0,000
B – Peso Esp. Apa. Seco	1	1926684	1926684	599,79	0,000
C – Teor de Cinza	2	12138109	6069055	426,84	0,000
A*B	3	24973	8324	1,37	0,263
A*C	6	275414	45902	7,57	0,000
B*C	2	393741	196870	32,45	0,000
A*B*C	6	58917	9820	1,62	0,163
Erro	48	291217	6067		
Total	71	22877998			

Fundamentado na análise estatística é possível distinguir que os fatores: teor de cal (A), peso específico aparente seco (B), teor de cinza volante (C), assim como a interações entre o teor de cal e o teor cinza (A*C) e entre o peso específico aparente seco e o teor de cinza (B*C), são estatisticamente significantes (Valor de $p < 0,05$), como pode ser facilmente visualizado na Figura 5 pelo gráfico de Pareto.

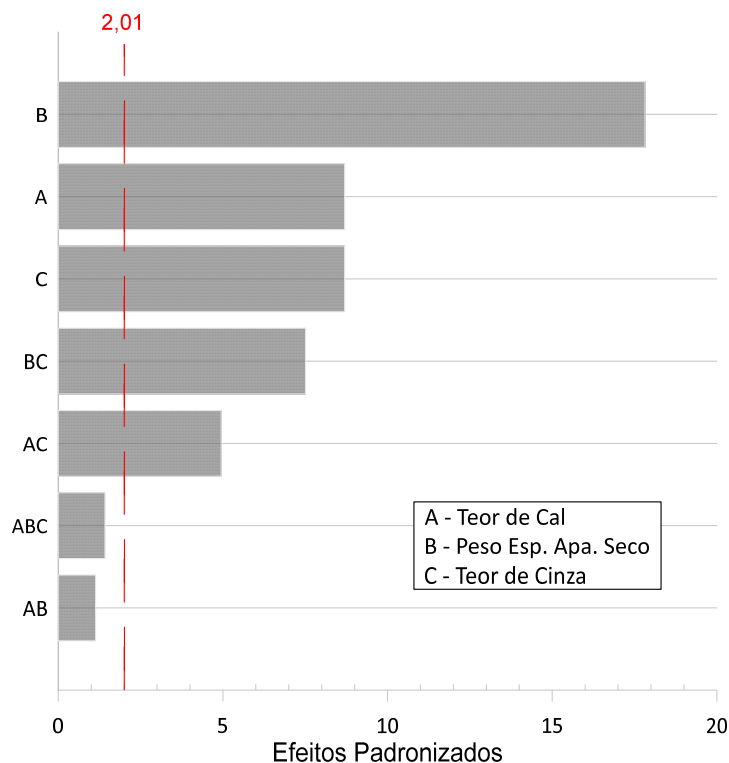


Figura 5. Gráfico de Pareto

Como já visto em estudos de solos artificialmente cimentados com cimento Portland (DIAMBRA *et al.*, 2018; FESTUGATO *et al.*, 2018), com cal dolomítica (BALDOVINO *et al.*, 2018), com cal de carbureto e resíduo de vidro (CONSOLI *et al.*, 2018) e com cal hidratada e cinza volante (CONSOLI *et al.*, 2020), o peso específico aparente seco tem grande influência na variável resposta. Quanto maior a redução da porosidade (aumento do peso específico aparente seco) maior a resistência, devido ao maior contato entre os grãos que ocorre com a redução da quantidade de vazios.

O efeito dos teores de cal e cinza volante se mostraram semelhantes no gráfico de Pareto, no entanto, como pode ser observado na Tabela 3, o Valor de F do teor de cinza foi maior que o Valor de F do teor de cal, o que indica que o teor de cinza volante tem maior influência na variável resposta.

A Figura 6 traz os principais efeitos da variável resposta. As Figuras 6a, 6b e 6c revelam, respectivamente, o efeito do teor de cal, do peso específico seco e do teor de cinza volante.

Posto isto, amparado pelos gráficos dos fatores mencionados, constatou-se que esses fatores influenciam o aumento da resistência à compressão não confinada linearmente de maneira semelhante, em maior ou menor amplitude.

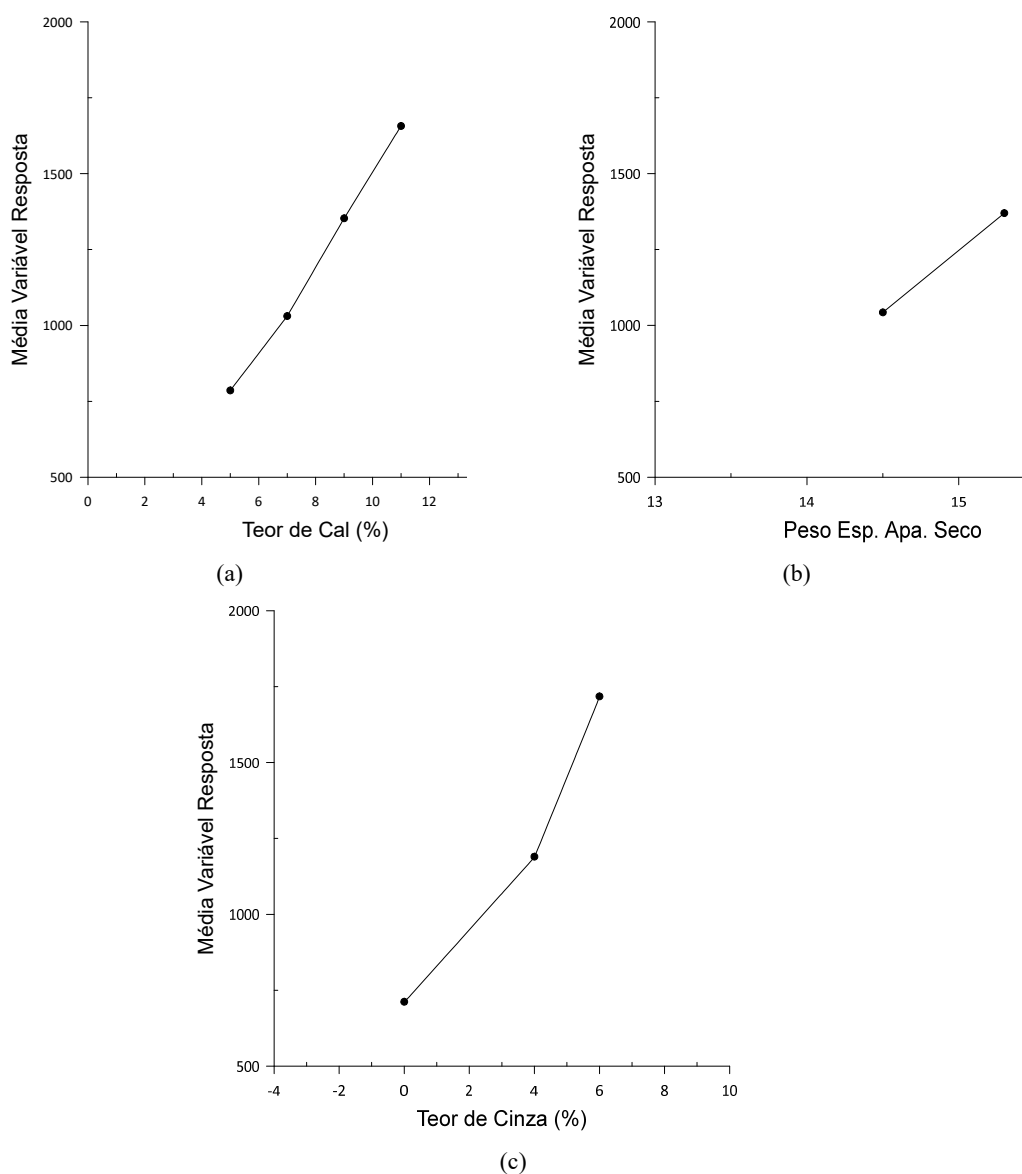


Figura 6. Efeitos principais da Variável Resposta

O teor de cinza volante se mostrou muito eficaz para o melhoramento do solo estudado, aumentando linearmente a resistência à compressão não confinada. O mesmo ocorreu com a cal, mas com valores ligeiramente menores. Ainda, dentro das faixas estudadas, o teor de cinza volante acresceu a resistência em até 1,4 MPa e o teor de cal em até 1 MPa.

3.2. Análise da sucção matricial

Na Figura 7 apresenta-se os resultados do ensaio de sucção, pelo método do papel filtro, das amostras rompidas à compressão não confinada.

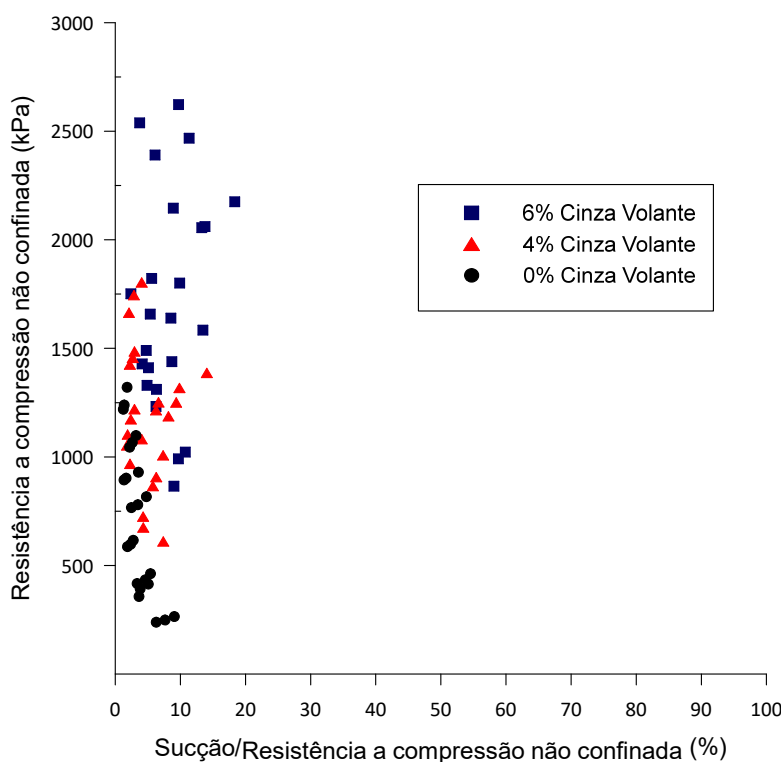


Figura 7. Resultados do ensaio para medição da sucção

Como pôde ser observado na Figura 7 as amostras majoritariamente não apresentaram valores de sucção maiores que 10% da resistência à compressão não confinada, resultados semelhantes aos encontrados por Consoli *et al.* (2007, 2011) que obtiveram valores de 3 a 8%, principalmente. Ainda, os corpos de prova que apresentaram sucção superior a esse valor são poucos e não ultrapassaram os 20%, o que é esperado quando há a imersão dos corpos de prova 24h antes do ensaio.

Logo, como grandes variações não foram constatadas, comprovando a saturação dos corpos de prova, pôde-se descartar a sucção como um fator de influência na variável reposta.

4. Considerações finais

A partir dos resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

A redução da porosidade revelou-se o fator de maior influência na variável resposta (resistência), devido ao maior contato entre os grãos que advém do menor número de poros.

O teor de cinza volante provou-se significativo para o melhoramento do solo, com pequenos teores já se mostrando eficazes, elevando a resistência à compressão não confinada, linearmente.

A adição de cal, mesmo em pequenas quantidades, para solos argilosos aumentou de modo linear a resistência dentro do limite estudado.

O índice porosidade/teor volumétrico de ligante, dado em função do peso específico aparente seco, da massa de solo, da quantidade de pozolana e da fração de cal, bem como do teor volumétrico do ligante (pozolana + cal) ajustado por um expoente (0,28 – para o



solo e materiais da pesquisa), provou-se um parâmetro apropriado para avaliar a resistência do solo melhorado com os ligantes estudados e um eficaz método de dosagem.

Referências

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: Solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016a.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180: Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016b.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016c.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12024: Solo-cimento — moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos — procedimento. Rio de Janeiro, 2012a.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12253: Solo-cimento - dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, 2012b.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16605: Cimento portland e outros materiais em pó — determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 52: Agregado miúdo - determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- Al-swaidani, A.; Hammoud, I.; Meziab, A. (2016). Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 8, n. 5, p. 714-725.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. C618: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. Philadelphia, 2019.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. D2487-17: Standard classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). West Conshohocken, pa, 2017.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. D5102: Standard test method for unconfined compressive strength of compacted soil-lime mixtures. Philadelphia, 2009.
- Baldovino, J. A.; Moreira, E. B.; Teixeira, W.; Izzo, R. L. S; Rose, J. L. (2018). Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil. *Journal Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 10, n. 1, p. 188-194.



- Chandler, R. J.; Crilly, M. S.; Montgomery-Smith, G. (1992). A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, v. 92, n. 1, p. 82-89.
- Consoli, N. C.; Prietto, P. D. M.; Carraro, J. A. H.; Heineck K. S. (2001). Behavior of compacted soil-fly ash-carbide lime mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 127, n. 9, p. 774-782.
- Consoli, N. C.; Foppa, D.; Festugato, L.; Heineck, K. S. (2007). Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 133, n. 2, p. 197-205.
- Consoli, N. C.; Winter, D.; Leon, H. B.; Scheuermann Filho, H. C. (2018). Durability, strength, and stiffness of green stabilized sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 144, n. 9, p. 04018057.
- Consoli, N. C.; Marin, E. J. B.; Samaniego, R. A. Q.; Heineck, K. S.; Dalla Rosa Johann, A. (2019). Use of sustainable binders in soil stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 31, n. 2, p. 1-7.
- Consoli, N. C.; Festugato, L.; Scheuermann Filho, H. C.; Miguel, G. D.; Tebechrani Neto, A.; Andreghetto, D. (2020). Durability assessment of soil-pozzolan-lime blends through ultrasonic-pulse velocity test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 32, n. 8, p. 04020223.
- Consoli, N. C.; Dalla Rosa, A.; Saldanha, R. B. (2011). Parameters controlling strength of industrial waste-lime amended soil. *Soils and Foundations*, v. 51, n. 2, p. 265-273, 2011.
- Diambra, A.; Festugato, L.; Ibraim, E.; Peccin da Silva, A.; Consoli, N. C. (2018). Modelling tensile/compressive strength ratio of artificially cemented clean sand. *Soils and Foundations*, v. 58, n. 1, p. 199-211.
- Eades, J. L.; Grim, R. E. (1960). Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. *Highway Research Board*, v. 262, n. 1, p. 51-63.
- Festugato, L.; Peccin da Silva, A.; Diambra, A.; Consoli, N. C. (2018). Modelling tensile/compressive strength ratio of fibre reinforced cemented soils. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 46, n. 2, p. 155-165.
- Lambe, T. W.; Whitman, R. V. (1979). *Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons.
- Marinho, F. A. (1994). "Medição de sucção com o método do papel filtro". In: Anais X congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia de fundações. v. 2, 515-522.
- Pacheco-Torgal, F.; Castro-Gomes, J.; Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: a review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*, v. 22, p. 1305-1314.



Rios, S.; Viana da Fonseca, A.; Consoli, N. C.; Floss, M.; Cristelo, N. (2013). Influence of grain size and mineralogy on the porosity/cement ratio. *Geotechnique Letters*, v. 1, n. 3, p. 130-136.

Rogers, C. D. F.; Glendinning, S.; Roff, T. E. J. (1997). Lime modification of clay soils for construction expediency. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, v. 125, n. 4, p. 242-249.

Sakr, M. A.; Shahin, M. A.; Metwally, Y. M. (2009). Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 27, p. 105-113.

Saldanha, R.; Reddy, K. R.; Consoli, N. C. (2019). Influence of sodium chloride on leaching behavior of fly ash stabilized with carbide lime. *Construction and Building Materials*, v. 227, p. 116571.