

Influência da umidade de compactação na resistência de solo expansivo estabilizado com cal e cinza do bagaço de cana-de-açúcar

João Pedro Camelo Guedes

Doutorando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, joaopguedes99@gmail.com

Carina Silvani

Professor, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, carinasilvani@gmail.com

Jucimara Cardoso da Silva

Doutorando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, jucimara.engenhariacivil@gmail.com

João Vítor Azambuja Carvalho

Doutorando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, carvalho.jv@ufrgs.br

Alexia Cindy Wagner

Doutorando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, alexia-wagner@hotmail.com

RESUMO: Solo expansivos sofrem variação volumétrica quando submetidos à variação na umidade, podendo causar danos às obras da engenharia assentadas sobre a camada expansiva. Consequentemente, a umidade inicial é um dos fatores que interferem diretamente na expansão e na resistência mecânica. Visando controlar a expansão do solo e aumentar sua resistência mecânica, alguns materiais surgem como alternativa para a estabilização: a cal e a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA). A CBCA é um resíduo da indústria sucroalcooleira com alto potencial pozzolânico e, quando disposto de forma inadequada, é prejudicial ao meio ambiente, tornando-se objeto de estudo para fins de sustentabilidade. Portanto, o objetivo do trabalho é avaliar a influência da umidade inicial no comportamento mecânico de um solo expansivo estabilizado com cal e CBCA. O solo foi estabilizado com teores de cal de 3%, 6% e 9% e com 25% de CBCA. As umidades de compactação variaram entre 18,5%, 19,5% e 20,5%, escolhidas com base na curva de compactação Proctor normal e peso específico seco fixo de 14,75 kN/m³. Os resultados da pesquisa mostraram que a resistência à compressão simples aumenta com o acréscimo da umidade. Além disso, a resistência também aumenta quando é acrescentada cal à mistura. Concluiu-se que o uso da CBCA na estabilização do solo expansivo com cal foi viável e o uso de uma metodologia de dosagem permitiu prever a resistência à compressão simples do solo expansivo estabilizado com CBCA e cal estudado.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilização de solos; Porosidade/Teor volumétrico de cal; Resíduo da Indústria Sucroalcooleira.

ABSTRACT: The volumetric changes in swelling soils are due to moisture variation damaging engineering works settled in expansive layers. Hence, the moisture content in swelling soils is one of the key parameters dictating soil swelling and mechanical strength. In order to control the soil swelling and increase its mechanical strength, materials like lime and sugarcane bagasse ash (SCBA) come up as alternatives to soil stabilization. SCBA is a sugarcane industry waste with high pozzolanic potential and, when disposed of improperly, it can endanger the global environment, becoming an object of study for sustainability purposes. Therefore, the main

target of this work is to evaluate the influence of moisture content on the mechanical behavior of a swelling soil stabilized with SCBA and lime. The soil was stabilized with 3%, 6% and 9% of lime content and 25% of SCBA. The moisture content ranged from 18,5%, 19,5% and 20,5% based on the standard Proctor compaction curve and a dry unit weight of 14,75 kN/m³ was established. The results showed that the unconfined compressive strength increases when moisture content. Furthermore, the unconfined compressive strength increases when lime is added to the blend. Thus, some conclusions can be drawn: the use of SCBA in soil swelling soil stabilization with lime was feasible and a dosage methodology allowed to forecast unconfined compressive strength of swelling soil stabilized with SCBA and lime studied in this work.

KEYWORDS: Soil stabilization; Porosity/lime volumetric content; Sugarcane industry waste.

1 INTRODUÇÃO

O solo serve de suporte para todas as obras da engenharia civil. As características desse solo podem mudar dependendo da sua rocha origem, tipo e clima de formação. Em vista disso, é possível que determinados solos não atendam às necessidades de projeto, podendo ser tratados com técnicas de melhoramento de solo. Solos expansivos, em geral, não atendem aos requisitos de projeto, por apresentar variação volumétrica, quando submetidos a mudanças na umidade, podendo acarretar diversas patologias através de recalques diferenciais nas obras de engenharia como canais, rodovias e edifícios. Para esse tipo de solo, a técnica de melhoramento de solo mais utilizada é a estabilização química com cal. A cal tem potencial para reduzir a expansão e aumentar a resistência mecânica (KUMAR; KUMAR, 2019).

Para que as reações pozolânicas ocorram, são necessárias uma fonte de sílica ou alumina e uma fonte de íons de cálcio, juntamente com água. Além da sílica já presente na composição do solo, uma forma de tornar essas reações mais eficazes é através da adição de materiais pozolânicos, os quais apresentam altos teores de sílica e de alumina em estado amorfo. Juntamente com cal, os materiais pozolânicos conseguem produzir os elementos cimentantes, como o C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado) que possuem elevada resistência mecânica. (BELL, 1996).

Alguns autores, como Cordeiro *et al.* (2009), avaliaram a cinza do bagaço de cana de açúcar (CBCA) como alternativa para material pozolânico. Os resultados das pesquisas mostraram que a CBCA pode ser utilizada como material pozolânico pelo alto teor de sílica (SiO₂) em sua composição. Por se tratar de um resíduo prejudicial ao meio ambiente e à saúde (LE BLONDE *et al.*, 2014), a CBCA também se torna objeto de estudo para fins de sustentabilidade.

Dentre os fatores que influenciam a expansão do solo, Consoli *et al.* (2020) analisaram a influência da umidade inicial em misturas bentonita-caulim-cimento. Os autores relatam que a umidade inicial é um dos fatores que interfere diretamente no comportamento expansivo. Além da umidade, o teor de cal e a porosidade também influenciam na expansão, conforme mostrado por outros autores (SILVANI *et al.*, 2020).

Para obter-se uma curva de dosagem para solos estabilizados, Consoli *et al.* (2007) desenvolveram uma metodologia de dosagem racional através do índice η/C_{iv} (porosidade/teor volumétrico de cimento) para prever a resistência à compressão simples de um solo argiloso estabilizado com cimento. O índice surge como uma alternativa similar ao fator água/cimento utilizado para dosagem de concreto, a fim de prever parâmetros como resistência à compressão simples, objeto de estudo deste trabalho. A fim de analisar outros solos e outro estabilizante, Consoli *et al.* (2011) utilizaram do mesmo índice porosidade/teor volumétrico de aditivo com cal (η/L_{iv}) para estabilizar uma argila arenosa

Em vista do exposto, este estudo visa analisar o uso da cinza do bagaço de cana de açúcar como material pozolânico na estabilização de solos expansivos compactados em diferentes umidades iniciais e teores de cal.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização dos materiais

Os materiais usados na pesquisa foram o solo expansivo, a cal, a CBCA e água destilada. O solo expansivo utilizado na pesquisa foi uma mistura de areia/bentonita na proporção 75/25, chamado de mistura areia e bentonita. A areia utilizada foi adquirida no comércio local de Campina Grande-PB e passada na peneira #4,8 mm. A bentonita é da marca Bentonisa, produzida na cidade de Boa Vista-PB. A CBCA foi calcinada a 700°C, pois é a temperatura ideal para otimizar o potencial pozolânico da cinza (CORDEIRO *et al.*, 2008,

2009). A CBCA foi peneirada em malha de #100 para eliminar as impurezas. A Tabela 1 apresenta a caracterização física do solo e da CBCA estudados, sendo classificados, com base no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), como argila de alta plasticidade (CH) e silte não-plástico (ML), respectivamente.

Tabela 1: Caracterização geotécnica do solo e da CBCA

Ensaio	Propriedades	Solo	CBCA	Norma
Distribuição granulométrica dos grãos	Areia grossa (%)	4,70	-	ABNT NBR 7181/2018
	Areia média (%)	17,00	-	
	Areia fina (%)	46,51	20,12	
	Silte (%)	2,05	50,23	
	Argila (%)	29,73	29,65	
Limites de Atteberg	LL (%)	65,00	-	ABNT NBR 6459/2017
	LP (%)	27,20	-	ABNT NBR 7180/2016
	IP (%)	37,80	NP*	
Massa específica dos grãos do solo	Peso específico dos grãos do solo (kN/m ³)	26,5	25,01	ABNT NBR 6458/2016

NP* – Não Plástica

O planejamento experimental foi baseado em ensaios de resistência à compressão simples das misturas MAB-CBCA-cimento. O teor de CBCA em relação à massa seca do solo expansivo foi mantido constante em 25% enquanto os teores de cal variaram entre 3%, 6% e 9%. Esses valores da CBCA estão entre os teores usualmente utilizados para estabilização de solos com materiais pozolânicos (Horpibulsuk et al., 2010; Silvani et al., 2023a). Já os teores de cal foram baseados no ensaio de consumo inicial de cal (ICL), o qual consiste em adicionar cal ao solo até obter-se um pH constante (ROGERS; GLEDINNING; ROFF, 1997). O valor de ICL foi de 6% e, portanto, foram adotados dois outros teores: um abaixo (3%) e outro acima (9%).

Os pontos de moldagem (γ_d e w) foram definidos com base na curva de compactação da mistura solo expansivo. Foram escolhidos um ponto de umidade referente à umidade ótima do solo, uma maior e outra menor (19,5%; 20,5%; 18,5%, respectivamente) e o mesmo γ_d da mistura solo expansivo-CBCA (14,75 kN/m³). A Figura 1 apresenta as curvas de compactação, juntamente com os pontos de moldagem adotados, demarcados por um x.

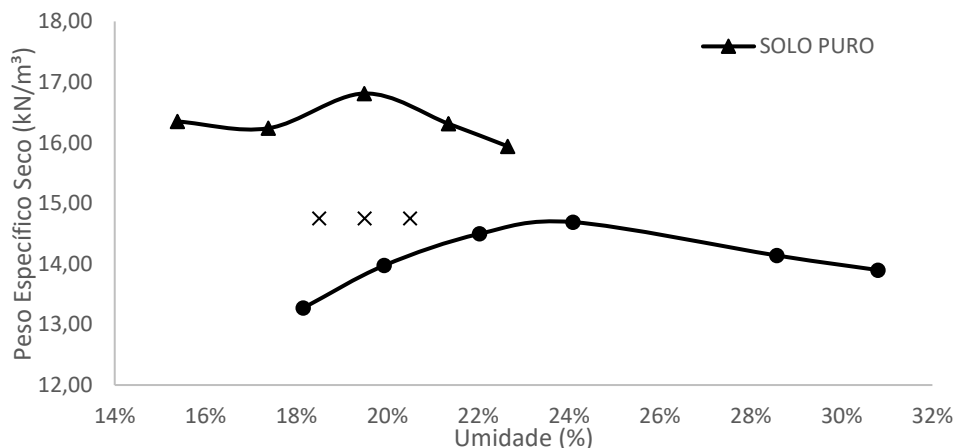


Figura 1 – Curva de compactação para as misturas solo expansivo-CBCA

No que se refere à moldagem dos corpos de prova, inicialmente, a areia e a bentonita, na proporção 75/25, foram misturadas até adquirir uma consistência homogênea. Logo em seguida, adicionou-se a CBCA e, após a homogeneização, a cal. Posteriormente, adicionou-se a água para atingir o teor de umidade inicial

desejada e realizou-se a mistura manual com uma colher. Após obtenção de uma massa homogênea, a mistura foi dividida em três porções de igual massa e seguiu-se para a compactação estática em um molde tripartido, dividida em três camadas com escarificação entre elas. Além disso, foram retiradas três pequenas amostras da mistura para verificar a umidade de moldagem.

Após o desmolde, os corpos de prova foram pesados em uma balança na precisão de 0,01 g e medido com paquímetro com precisão de 0,01 mm. Em seguida, foram embalados em sacos plásticos e mantidos em câmara úmida a temperatura constante de 25°C. Os corpos de prova que apresentaram γ_d e w fora do intervalo entre 99% e 101% foram descartados. A porosidade (η) das amostras foi calculada pela Equação 1 e o teor volumétrico de cal (L_{iv}) das amostras pela Equação 2. (SILVANI et al., 2023a).

$$\eta = 100 - \frac{100 \left\{ \frac{\frac{\gamma_d V_s \left(\frac{S}{100} \right)}{1 + \frac{L}{100}}}{\gamma_{sS}} + \frac{\frac{\gamma_d V_s \left(\frac{CBCA}{100} \right)}{1 + \frac{L}{100}}}{\gamma_{sCBCA}} + \frac{\frac{\gamma_d V_s \left(\frac{L}{100} \right)}{1 + \frac{L}{100}}}{\gamma_{sL}} \right\}}{V_s} \quad (1)$$

$$L_{iv} = \frac{V_c}{V} = \frac{m_c / \gamma_{sL}}{V} \quad (2)$$

Sendo, m_L o peso da cal, V o volume da mistura, L o teor de cal; γ_{ss} e γ_{sL} o peso específico solo e da cal, respectivamente. Após o período de cura de seis dias, os corpos de prova foram imersos em água por 24 horas para reduzir os efeitos da sucção (CONSOLI et al., 2007). Após as 24 horas, completaram-se os sete dias de cura, e os corpos de prova foram submetidos à ruptura, em uma prensa hidráulica, em uma velocidade constante de 1,14 mm/min.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados com base nos ensaios de resistência à compressão simples serão apresentados nessa seção, juntamente com as discussões.

3.1 Efeito do teor de cal

A Figura 2 apresenta as curvas da variação da resistência à compressão simples (q_u) em função do teor de cal para as umidades (w) de 18,5%, 19,5% e 20,5%. As três curvas seguem a mesma tendência de crescimento linear da resistência à compressão simples quando ocorre o aumento do teor de cal da mistura.

As equações das retas de ajuste para os teores de 18,5%, 19,5% e 20,5% de umidade estão apresentadas abaixo nas Equações (3), (4) e (5), respectivamente.

$$q_u = 104,11L + 1142,50 \quad (3)$$

$$q_u = 95,31L + 1310,30 \quad (4)$$

$$q_u = 104,72L + 1438,80 \quad (5)$$

A taxa de crescimento das três curvas, representada pelo coeficiente angular, é constante para uma mesma curva e é similar para os três teores de umidade, próximo a 100. Isso indica que as retas da resistência à compressão simples pelo teor de cal de cada umidade são praticamente paralelas. Ao analisar a segunda parcela da equação, o coeficiente linear, percebe-se um aumento da resistência à compressão simples quando aumenta a umidade.

Ainda em relação às curvas da Figura 2, pode-se analisar o acréscimo percentual da resistência, ao aumentar o teor de cal de 3% para 9%. Os valores encontrados foram de 43,30%, 36,36% e 36,40%, em média, para os teores de 18,5%, 19,5% e 20,5% de umidade, respectivamente, reiterando o comportamento paralelo das retas de ajuste.

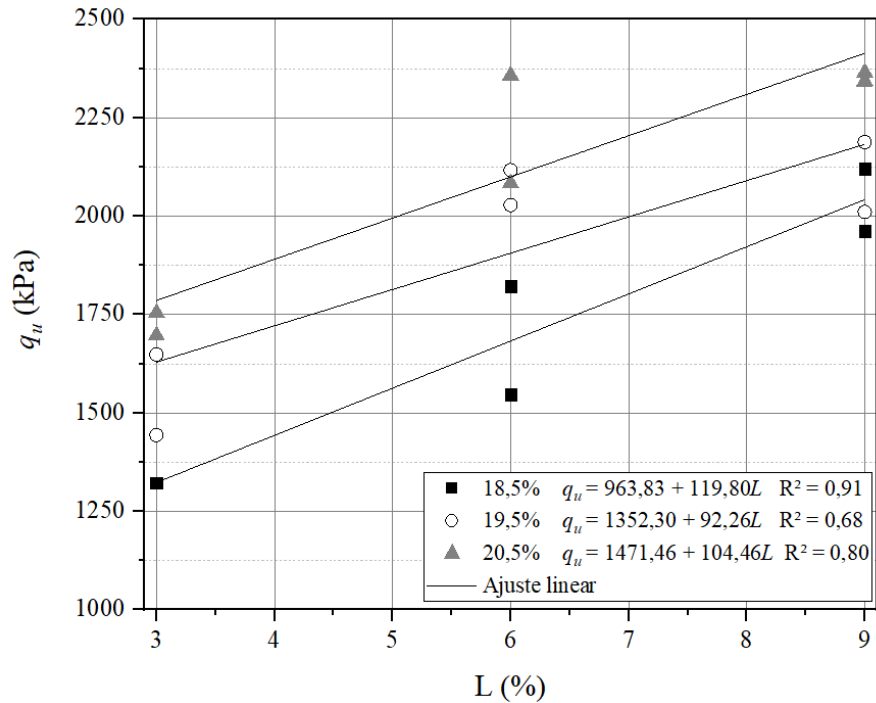


Figura 2 – Influência do teor de cal na resistência à compressão simples do solo expansivo

3.2 Efeito da umidade inicial

A Figura 3 apresenta os resultados da resistência à compressão simples pelo teor de umidade das misturas para os teores de cal de 3%, 6% e 9%. Assim como no efeito do teor de cal, pode ser observado que as três curvas seguem a mesma tendência linear, independente do teor de cal das amostras.

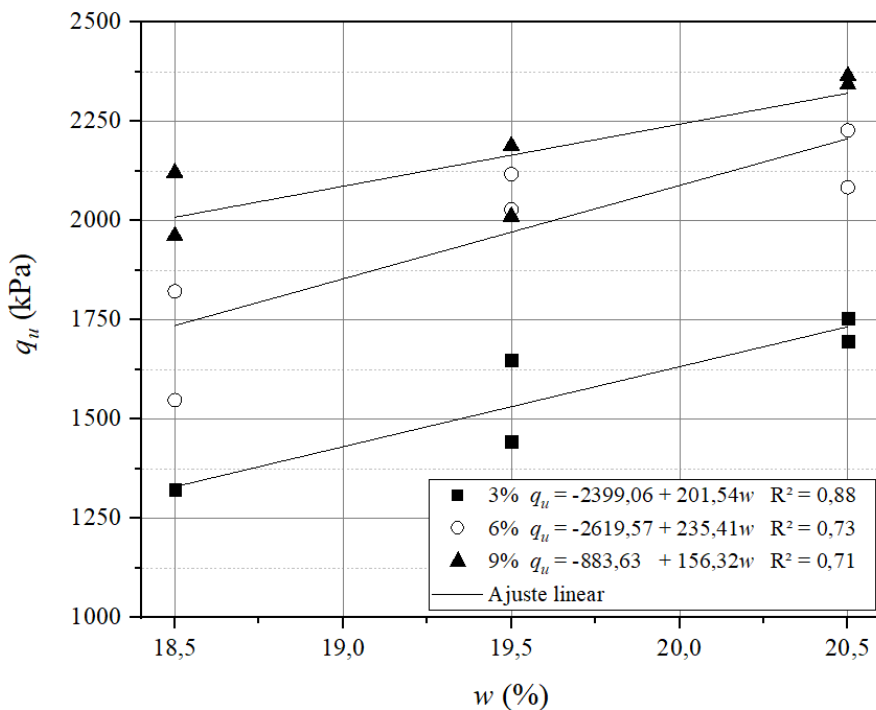


Figura 3 – Influência da umidade de compactação na resistência à compressão simples do solo expansivo

As equações das retas de ajuste para os teores de cal de 3%, 6% e 9% estão dispostas nas equações (6), (7) e (8), respectivamente.

$$qu = 141,99w - 1213,60 \quad (8)$$

$$qu = 140,20w - 731,27 \quad (10)$$

$$qu = 143,82w - 599,21 \quad (11)$$

Seguindo o mesmo comportamento da análise do teor de cal, a taxa de crescimento das três retas, representadas pelo coeficiente angular, é constante para uma mesma reta, quando se observa o aumento do teor de umidade. Além disso, esse coeficiente é similar entre as retas, resultando em um valor médio de 142,00. Ao analisar o coeficiente linear, é possível perceber que ele aumenta com o teor de cal, indicando que a resistência à compressão simples aumenta, quando o teor de cal também aumenta.

Analisando a Figura 3, pode-se verificar o acréscimo percentual médio de resistência à compressão simples ao aumentar a umidade de 18,5% para 20,5%. Os acréscimos na resistência a partir da variação da umidade de 18,5% para 20,5% foram de 19,70%, 16,50% e 14,00% para 3%, 6% e 9% de cal, respectivamente, indicando um comportamento paralelo das retas de ajuste.

Alguns autores como Consoli *et al.* (2007, 2011) relataram que a resistência à compressão simples da mistura caulim-cal e solo-cimento, respectivamente, aumenta com o aumento da umidade até o um valor ótimo (umidade ótima). Além disso, Zhang *et al.* (2018) relataram que para os solos argilosos estudados, a resistência à compressão simples diminui acima do grau de saturação de 80%. Esse grau de saturação elevado indica que o solo está próximo da sua umidade ótima. No caso desta pesquisa, as saturações médias para as umidades de 18,5%, 19,5% e 20,5% foram de 45,35%, 47,70% e 50,95%, respectivamente, indicando que os corpos de prova foram moldados no ramo seco da curva de compactação.

Esse comportamento linear e diretamente proporcional é esperado até certo grau de saturação, pelo fato de a água agir como elemento fundamental para o processo de reações pozolânicas da mistura, carregando os íons cálcio e hidroxilas da cal para a superfície da argila (INGLES; METCALF, 1972). Porém ultrapassando o teor ótimo de umidade, como mostrado por Zhang *et al.* (2018), a água torna-se um elemento indesejável, uma vez que altas quantidades do material implicam na redução da resistência mecânica da mistura. O mesmo comportamento relatado pelos autores, após a umidade ótima (no ramo úmido da curva de compactação), não foi visto na mistura solo expansivo-CBCA-cal, pois os teores de umidade escolhidos (18,5%, 19,5% e 20,5%) foram baseados na umidade ótima do solo puro. É possível que o mesmo comportamento observado pelos autores seja visto ao analisar as umidades de 23%, 24% e 25%, uma vez que 24% é a umidade ótima da mistura solo expansivo-CBCA-cal.

3.3 Efeito da metodologia de dosagem η/L_{iv}

Visando analisar a metodologia de dosagem η/L_{iv} desenvolvida por Consoli *et al.* (2007), foram traçadas as curvas de dosagem para cada umidade estudada (Figura 4). Para manter uma mesma taxa de influência da porosidade e do teor volumétrico de cal, foi aplicado o expoente 0,26 no teor volumétrico de cal para contabilizar essas variáveis na análise. O valor de 0,26 foi adotado, seguindo os estudos de Silvani *et al.* (2023), Guedes *et al.* (2021) e Silvani *et al.* (2020), estudando solos expansivos estabilizados com cimento Portland e cal. Diambra *et al.* (2017) mostraram que esse expoente é dependente da matriz de solo através de uma derivação teórica, considerando o comportamento da matriz cimentada descrita pelo modelo Drucker-Prager e a matriz do solo considerando a teoria do estado crítico. Em relação a umidade de compactação, Consoli *et al.* (2011) apresentaram um estudo para um solo silte arenoso estabilizado com cimento Portland, indicando que diferentes curvas de dosagem η/C_{iv} para cada teor de umidade estudada, visto que, ao aplicar uma curva única de dosagem para diferentes umidades, iria estar descartando a influência dessa variável.

Nesse sentido, como todas as curvas de dosagem apresentam o mesmo índice $(\eta/L_{iv}^{0,26})^{-1,3}$ é possível isolar essa variável e analisar o valor constante em todas elas, sendo o único fator variante. A Figura 5 apresenta a variação da compressão simples normalizada $q_u/(\eta/L_{iv}^{0,26})^{-1,3}$, em função da umidade de moldagem. Para esse caso, obteve-se uma função linear, indicando que a resistência normalizada tende a aumentar com o aumento da umidade. Porém, como visto anteriormente, esse comportamento é visto até um certo valor de umidade, e, após isso, a resistência tende a reduzir, obtendo uma relação parabólica. Para o intervalo analisado,

apenas o crescimento linear foi verificado, associando q_u , porosidade (η), teor volumétrico de cal (L_{iv}) e a umidade de compactação ($R^2=0,99$). Possivelmente, em maiores umidades, essa relação parabólica poderia ser evidenciada.

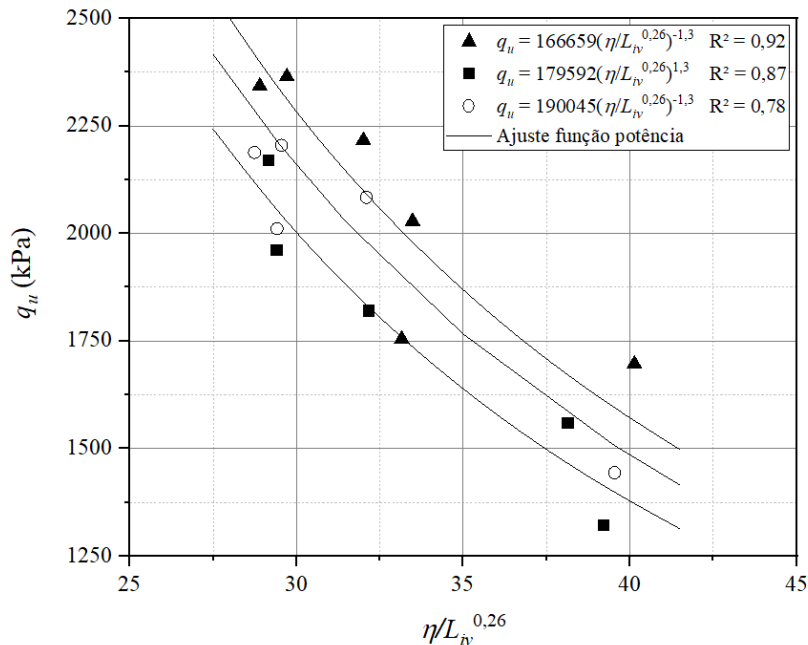


Figura 4 – Curvas de dosagem $\eta/L_{iv}^{0,26}$ para o solo expansivo

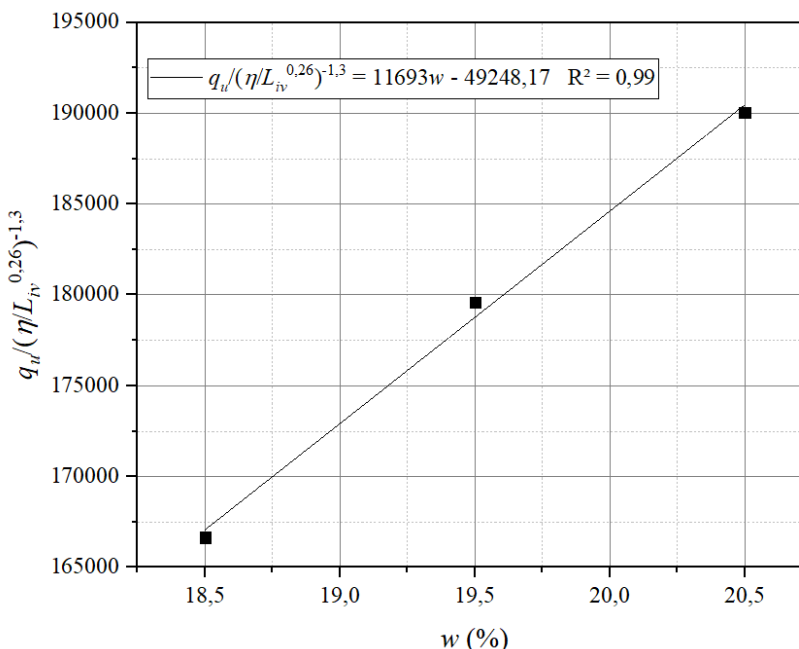


Figura 5 – Resistência à compressão simples normalizada do solo expansivo

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos na pesquisa, foi verificado que a adição de cal aumenta consideravelmente a resistência à compressão simples em todas as umidades estudadas, devido à ação das reações pozolânicas entre os elementos da cal, do solo expansivo e da CBCA. Diante disto, a estabilização de

solos expansivos com cal se torna uma alternativa bastante satisfatória e segura no quesito resistência do material. Outras análises mecânicas referentes à durabilidade, rigidez, e outros aspectos são necessárias para validar o seu uso real na prática, além de análises ambientais como por exemplo de lixiviação para validar de forma efetiva a sua aplicabilidade em obras reais. Além disso, para o intervalo estudado, o aumento da umidade inicial também aumenta a resistência a compressão simples do solo estabilizado com cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) e cal, espera-se que após um certo valor de umidade (correspondente a $S = 80\%$) a resistência tenda a reduzir.

O coeficiente η/L_{iv} definido pela relação entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento ajustado por um expoente (0,26) se mostrou adequado para representar uma curva de dosagem para a resistência a compressão simples de solo estabilizado com cal e CBCA.

Considerando o intervalo das variáveis estudados nesta pesquisa, uma única relação pode ser obtida ligando resistência a compressão simples com porosidade, teor volumétrico de cal e umidade de compactação. A relação de $q_u/[\eta/L_{iv}^{0,26}]^{-1,3}$ com a umidade de compactação se mostrou linear com a resistência crescente com a umidade

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e ao CNPq pelo fornecimento das bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bell, F. G. Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils. *Engineering Geology*, v. 42, p.
- 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. 113, p. 197-205, 2007.
- Consoli, N. C.; Rosa, D. A.; Cruz, R. C.; Johann, A. D. R. Water content, porosity and cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty soil. *Engineering Geology*, v. 112, n. 3, p.328-333, 2011.
- Consoli, N. C.; Araújo, M. T.; Ferrazzo, S. T.; Rodrigues, V. L.; Rocha, C. G. Increasing density and cement content in stabilization of expansive soils: Conflicting or complementary procedures for reducing swelling? *Canadian Geotechnical Journal*, v. 58, n. 6, 2020.
- Cordeiro, G. C.; Toledo Filho, R. D.; Fairbairn, E. M. R. Effect of Calcination Temperature on the Pozzolanic Activity of Sugarcane Bagasse Ash. *Construction and Building Materials*, v. 23, p. 3301-3303, 2009.
- Diambra A.; Ibraim E.; Peccin A.; Consoli, N. C.; Festugato, L. Theoretical Derivation of Artificially Cemented Granular Soil Strength. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143, 04017003, 2017
- Guedes, J. P. C.; Tenório, E. A. G.; Silvani, C.; Braz, R. I. F. Previsão da Resistência à Compressão Simples de um Solo Expansivo Estabilizado com Cimento Através do Índice Porosidade/teor volumétrico de Cimento. *Revista Princípios*, 2021
- 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.
- Le Blond, J.S., Tomatis, M., Horwell, C.J., Dunster, C., Murphy. The surface reactivity and implied toxicity of ash produced from sugarcane burning. *Environmental Toxicology*, 29: 503-516, 2014.
- Rogers, C. D. F.; Glendinning, S.; Roff, T. E. J. Lime modification of clay soils for construction expediency. *Proceedings Geotechnical Engineering*, v. 149 (3), p. 201-202, 1997.
- 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 Geoenvironmental Engineering*, v. 146, n. 9, p. 1–7, 2020
- Silvani, C.; Guedes, J. P. C.; Tenório, E. A. G.; Nascimento, R. C. M. Brackish water in swelling soil stabilization with lime and sugarcane bagasse ash (SCBA). *Soils & Rocks*, v. 46, n. 3, 2023.

Zhang, F. Chui, Y.; Zeng, L.; Robinet, J.C.; Conil, N.; Talandier, J. Effect of degree of saturation on the unconfined compressive strength of natural stiff clays with consideration of air entry value. *Engineering Geology*, v. 237, p. 140-148, 2018