

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/600

## Avaliação da Resistência à Compressão Simples de Solo Expansivo Estabilizado com Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar e Cimento Portland

Hanna Gabrielly dos Santos Gomes

Graduada em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, hannagabrielly383@gmail.com

Carina Silvani

Professora na Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, carinasilvani@gmail.com

Vitor Braga de Azevedo

Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, vitorba.eng@gmail.com

Juliette Macena de Souza

Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, juliette-souza@hotmail.com

**RESUMO:** Visando controlar a expansão e aumentar a resistência mecânica de solos expansivos, estudos anteriores já apontaram a estabilização química com cimento Portland como uma opção viável. Ademais, estudos recentes mostram que a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) apresenta potencial pozolânico e relatam seu uso satisfatório em concretos e argamassas, porém poucos trabalhos analisam o uso desse material para estabilização de solo. Diante disso, o objetivo do trabalho é avaliar a influência da CBCA na estabilização de um solo expansivo com cimento. O solo expansivo utilizado na pesquisa foi uma mistura de areia/bentonita na proporção 75/25. O solo foi estabilizado com 6% de cimento Portland CP V ARI e, em conjunto, foram adicionados os teores de CBCA de 0%, 12,5% e 25,0%. A resistência à compressão simples foi analisada para os tempos de cura de 7 e 14 dias, sendo analisado, também, com 28 dias para o teor médio de CBCA. Os resultados da pesquisa mostraram o efeito positivo que o aumento do teor de CBCA e do tempo de cura exercem sobre a resistência à compressão simples das mistura solo-cimento-CBCA. Para a amostra com 7 dias de cura, os incrementos de 12,5% e 25% de CBCA no solo, desencadearam, respectivamente, um aumento de 156% e 238% na resistência à compressão simples, em relação ao solo sem adição da CBCA. Para a amostra com 12,5% de CBCA, o aumento do tempo de cura de 14 para 28 dias representou um ganho de resistência de 56%. Assim, conclui-se que a CBCA tem potencial para uma estabilização sustentável de solos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Melhoramento de Solo, Reações Pozolânicas, Bentonita, Tempo de Cura, Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar.

**ABSTRACT:** In order to control swelling and increase the mechanical strength of expansive soils, previous studies have already pointed out chemical stabilization with Portland cement as a viable option. Furthermore, recent studies show that sugarcane bagasse ash (SCBA) presents pozzolanic potential and report its satisfactory use in concretes and mortars, although few works analyze the use of this material for soil stabilization. Therefore, the objective of this study is to evaluate the influence of sugarcane bagasse ash on the stabilization of an expansive soil with cement. The expansive soil used in the research was a sand/bentonite mixture in a 75/25 proportion. The soil was stabilized with 6% Portland cement CP V ARI and SCBA contents of 0%, 12.5%, and 25.0% were added. The unconfined compressive strength was analyzed for curing times of 7 and 14 days, also analyzed at 28 days for the average SCBA content. The research results showed the positive effect that increasing the CBCA content and curing time have on the unconfined compressive strength of the soil-cement-CBCA mixture. For the sample with 7 days of curing, increases of 12.5% and 25% of CBCA in

the soil triggered, respectively, an increase of 156% and 238% in unconfined compressive strength, compared to the soil without ash addition. For the sample with 12.5% of CBCA, increasing the curing time from 7 to 14 days represented a strength gain of 3%, while from 14 to 28 days the gain was 56%. Thus, it is concluded that CBCA has the potential for sustainable soil stabilization.

**KEYWORDS:** Soil Improvement, Pozzolanic Reactions, Bentonite, Curing Time, Sugarcane Bagasse Ash.

## 1 INTRODUÇÃO

O material mais utilizado na Engenharia Geotécnica é o solo e este apresenta características muito complexas e variáveis (DALLA ROSA, 2009). Apesar de ser um material de extrema abundância, ocasionalmente não possui propriedades mecânicas adequadas para ser empregado diretamente em projetos de engenharia. Nesse contexto, técnicas de melhoramento do solo podem ser utilizadas para viabilizar sua utilização (VERMA et al., 2021).

Os solos expansivos possuem grande complexidade de utilização, pois, apresentam instabilidade volumétrica quando submetidos a mudanças na umidade, podendo acarretar no surgimento de tensões de expansão e recalques acentuados (KULANTHAIVEL et al., 2021). No final da década de setenta, nos Estados Unidos, foram gastos cerca de dois bilhões de dólares anuais para resolver problemas ligados à expansibilidade dos solos (COSTA; CRAIZER, 1978). No Brasil, esse problema é de grande importância, pois atinge regiões economicamente ativas, como por exemplo o nordeste brasileiro, distribuídas nos estados do Pernambuco, Rio Grande do Norte, Alagoas e Bahia, onde foi constatada a ocorrência de solos potencialmente expansivos. (FERREIRA, 1995).

A estabilização de solos expansíveis comumente é feita com processos químicos, que consistem na adição de um material que reage com o solo, aumentando sua resistência e diminuindo sua deformabilidade. Como exemplo, tem-se as misturas solos-cimento, que são empregadas na pavimentação rodoviária desde fins da década de 30 (TRINDADE et al., 2004). Segundo Firoozi et al. (2017), o cimento altera as propriedades do solo, como redução do potencial de contração e expansão e o aumento da resistência e do módulo de elasticidade. Porém, a produção do cimento Portland possui elevada demanda energética, bem como, é responsável por significativa emissão de poluentes atmosféricos. Por esse motivo, vem-se ganhando destaque estudos que buscam alternativas mais sustentáveis, como resíduos agrícolas e industriais (ATHIRA et al., 2021).

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) é um resíduo produzido pela indústria sucroalcooleira, a partir da queima do bagaço de cana-de-açúcar para aquecimento de caldeiras de vapor da própria indústria. A destinação da CBCA é um problema, pois, o descarte adequado da CBCA acarreta em um custo ao processo de produção, enquanto que o descarte inadequado pode gerar problemas ambientais, devido altos teores de metais pesados (THOMAS et al., 2021). Com isso, encontrar usos para a CBCA é uma forma de agregar valor ao resíduo e trazer mais sustentabilidade para a indústria sucroalcooleira. (CACURO; WALDMAN, 2015).

A CBCA é um aditivo latente para estabilização de solos. Farias (2005) avaliou que a adição de CBCA aumenta a capacidade de suporte do solo, diminui a sua expansividade, reduz a massa específica aparente seca e deixa a mistura pouco sensível à umidade. Com isso, é possível averiguar que a CBCA pode provocar uma melhoria nas características geotécnicas dos solos expansivos.

Nesse contexto, objetivou-se analisar o impacto da CBCA em um solo expansivo estabilizado com cimento, com vistas a propor uma possível solução para a destinação final da CBCA em obras geotécnicas.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Materiais

#### 2.1.1 Solo Expansivo

O solo expansivo utilizado na pesquisa foi uma mistura de areia/bentonita na proporção em massa de 75%/25%. A areia utilizada foi adquirida no comércio local de Campina Grande - PB e foi passada na peneira #4,8 mm. A bentonita adquirida foi produzida na cidade de Boa Vista - PB, seguindo a norma NBR ISO 9001 (2015).

Na Tabela 1, estão dispostas as informações da caracterização do solo expansivo e da CBCA, realizada por Guedes (2022). Para o solo expansivo, é possível observar nas frações granulométricas o alto teor de areia fina (46,51%) e, em seguida, a fração argila (29,73%). O Índice de plasticidade (IP) de 37,80% indica a alta plasticidade do solo, propriedade comum em solos finos e expansivos. O solo é classificado como uma argila de alta compressibilidade (CH), segundo o Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS). Os altos valores de superfície específica e da capacidade de troca catiônica (CTC) são comuns em solos expansivos e indicam uma maior reatividade do solo, com potencial para reagir com cal e desencadear reações pozolânicas (CERATO; LUTENNEGGER, 2002).

Tabela 1. Caracterização do solo expansivo e da CBCA

Ensaio	Propriedade	Solo Expansivo	CBCA	Norma
<b>Distribuição granulométrica</b>	Areia grossa (%)	4,70	-	
	Areia média (%)	17,00	-	
	Areia fina (%)	46,51	20,12	ABNT NBR 7181/2018
	Silte (%)	2,05	50,23	
	Argila (%)	29,73	29,65	
<b>Limites de Atteberg</b>	LL (%)	65,0	-	ABNT NBR 6459/2017
	LP (%)	27,2	-	ABNT NBR 7180/2016
	IP (%)	37,8	Não Plástico	
<b>Peso específico dos grãos</b>	Peso específico dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )	26,5	25,01	ABNT NBR 6458/2016
<b>Adsorção do Azul de Metileno</b>	Capacidade de Troca catiônica (meq/100g)	131,31	15,76	ASTM C837/2009
	Superfície específica (m <sup>2</sup> /g)	1024,78	123,00	
<b>Compactação (Proctor Normal)</b>	Peso específico seco máximo (kN/m <sup>3</sup> )	16,75	-	ABNT NBR 7182/2020
	Umidade ótima (%)	19,50	-	

Fonte: Guedes (2022)

A Figura 1 expõe o resultado do ensaio de difração dos raios-X (DRX) do solo expansivo. É possível observar picos de quartzo, anortita, caulinita, muscovita e montmorilonita, sendo os dois últimos argilominerais expansivos. Os picos de quartzo e montmorilonita são decorrentes da areia e da bentonita, respectivamente, uma vez que são os principais minerais desses materiais.

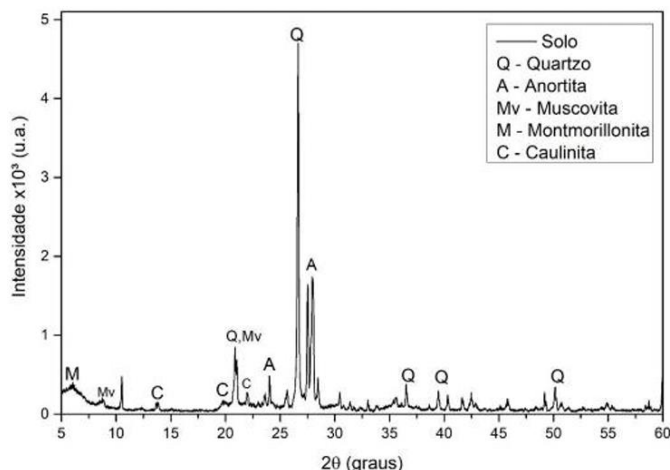


Figura 1. Resultado do ensaio de difração dos raios-X para o solo expansivo

O ensaio de fluorescência de raios-X (FRX) foi realizado por Guedes (2022), de acordo com a ABNT NBR 16137/2016, para o solo expansivo e seu resultado está disposto na Tabela 2. O solo apresenta altos

teores de sílica e alumina, favorecendo a ocorrência das reações pozolânicas juntamente com a cal para gerar compostos cimentante como C-S-H e C-A-H.

Tabela 2. Resultado do ensaio de fluorescência de raios-X para o solo expansivo

Elemento	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Outros
Fração (%)	70,08	20,46	2,74	2,67	1,7	1,48	0,6	0,14	0,13

Fonte: Guedes (2022)

### 2.1.2 Cimento

Neste trabalho foi utilizado o cimento Portland CP V-ARI. A escolha deu-se em função da alta resistência inicial, e também pelo desempenho apresentado conforme estudo de Jonatan et al. (2012). Além dos parâmetros de economia, tempo de execução e componentes químicos conferirem maior coesão aos solos devido à cimentação e aglutinação das partículas, firmando a estrutura e diminuindo o tamanho dos poros.

O desenvolvimento da alta resistência inicial do cimento é dado pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquire elevadas resistências, com maior velocidade. Além disso, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018) de Cimento Portland, o CP V-ARI também não contém adições significativas (pode conter até 10% em massa de material carbonático).

### 2.1.3 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA)

A CBCA foi obtida numa indústria sucroalcooleira de pequeno porte, localizado no distrito de Galante na Paraíba. A CBCA foi peneirada na peneira #15mm para eliminar as impurezas, tais como prego, pedaços de madeira e de vidro. A caracterização da CBCA, realizada por Guedes (2022), está disposta na Tabela 1. É possível observar a presença majoritária da fração granulométrica silte. A CBCA foi classificada como um silte de baixa compressibilidade (ML).

O ensaio de difração dos raios-X (DRX) também foi realizado para a CBCA, com seu resultado disposto na Figura 2. O difratograma indicou picos de quartzo, silvita, calcita, dolomita e periclásio. Além disso, é possível ver a característica de um material amorfo, ou seja, com potencial para reagir com a cal e desenvolver reações pozolânicas.

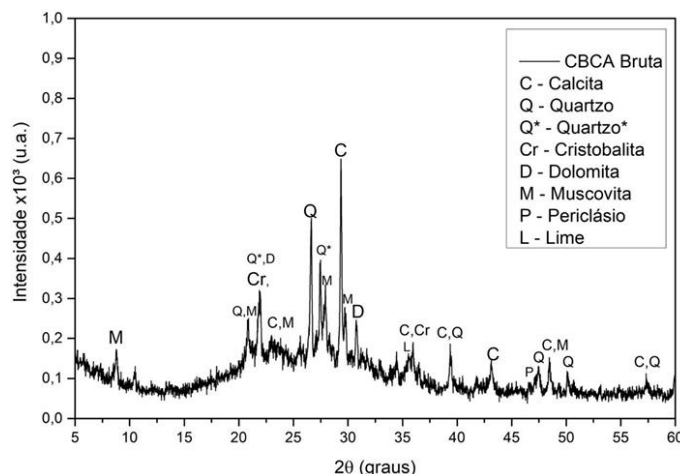


Figura 2. Resultado do ensaio de difração dos raios-X para a CBCA

O ensaio de fluorescência de raios-X (FRX) da CBCA, realizado por Guedes (2022), de acordo com a NBR 16137 (ABNT, 2016), tem seu resultado disposto na Tabela 3. Foi observada uma elevada presença de sílica, que sugere que o material apresente propriedades pozolânicas. Além disso, destaca-se o alto teor de magnésio que pode contribuir para a diminuição da expansão do solo, através das trocas catiônicas do íon de Na<sup>+</sup> presente na montmorilonita pelo íon Mg<sup>2+</sup>.

Tabela 3. Resultado do ensaio de fluorescência de raios-X para a CBCA

Elemento	SiO <sub>2</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl	TiO <sub>2</sub>	MnO	Outros
Fração (%)	57,3	11,49	8,81	7,75	6,89	5,08	2,68	2,46	1,98	0,34	0,18	0,18

Fonte: Guedes (2022)

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Planejamento Experimental

Visando planejar os ensaios, foram definidas as variáveis independentes (teor de CBCA e tempo de cura), que tiveram seus níveis variados a fim de avaliar seu impacto sobre a variável dependente (resistência à compressão simples). Os níveis adotados para o teor de CBCA foram de 0%, 12,5% e 25%, definidos com base nos valores adotados para estudos similares com cinza volante (CONSOLI et al., 2015; CONSOLI et al., 2019). Os períodos adotados para o tempo de cura foram de 7, 14 e 28 dias, definidos com base na demora para desenvolvimento das reações pozolânicas.

As variáveis fixadas (teor de cimento, umidade de compactação e peso específico seco) são mantidas iguais para todas as amostras ensaiadas. Nesse sentido, o teor de cimento utilizado foi de 6%, baseado no teor de cal utilizado no estudo semelhante de Guedes (2022). A umidade de compactação foi de 19% e o peso específico seco foi de 13,75 kN/m<sup>3</sup>, ambos escolhidos visando a viabilidade de moldagem dos corpos de prova, então, foram definidos como um ponto no ramo seco da curva de compactação da mistura solo-CBCA (25% de CBCA), com energia Proctor Normal. A Tabela 4 expõe o programa experimental adotado para realização dos ensaios de resistência à compressão simples.

Tabela 4 Programa experimental para os ensaios de resistência à compressão simples

Peso Específico Seco	Teor de CBCA	Tempo de Cura	Número de repetições	Total de ensaio
13,75 kN/m <sup>3</sup>	0%	7 dias	2	17 amostras
		14 dias	2	
	12,5%	7 dias	3	
		14 dias	3	
		28 dias	3	
	25%	7 dias	2	
		14 dias	2	

### 2.2.2 Preparação de Amostras

Visando a confecção dos corpos de prova para o ensaio de resistência, inicialmente foi feita a mistura do solo expansivo com a CBCA conforme teores definidos no planejamento experimental. Seguido da adição de água para correção da umidade e as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos por três dias, para a bentonita entrar em equilíbrio com os demais componentes. Então, foi feita a adição do cimento Portland e procedeu-se com a compactação estática de corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm.

### 2.2.3 Ensaio de Resistência

O ensaio realizado para mensurar a resistência mecânica dos corpos de prova foi o de compressão simples seguindo o método da NBR 12025 (ABNT, 2012). No penúltimo dia de cura, os corpos de prova foram submersos em água, por 24 horas, para minimizar os efeitos da sucção na resistência final. Posteriormente, os corpos de prova foram rompidos com auxílio de uma prensa hidráulica Shimadzu, com velocidade de carregamento de 1,14 mm/minuto. A resistência à compressão simples é definida como a máxima tensão axial suportada pela amostra, até sua ruptura.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES



A Figura 3 apresenta as curvas de ajuste e as respectivas equações da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função do teor de CBCA, para cada um dos tempos de cura analisados. Assim, pode-se observar que o incremento da CBCA gerou aumento da resistência à compressão simples das amostras, para 7 e 14 dias de cura. Não foi possível obter o comportamento para 28 dias de cura, pois somente o teor médio de CBCA foi estudado.

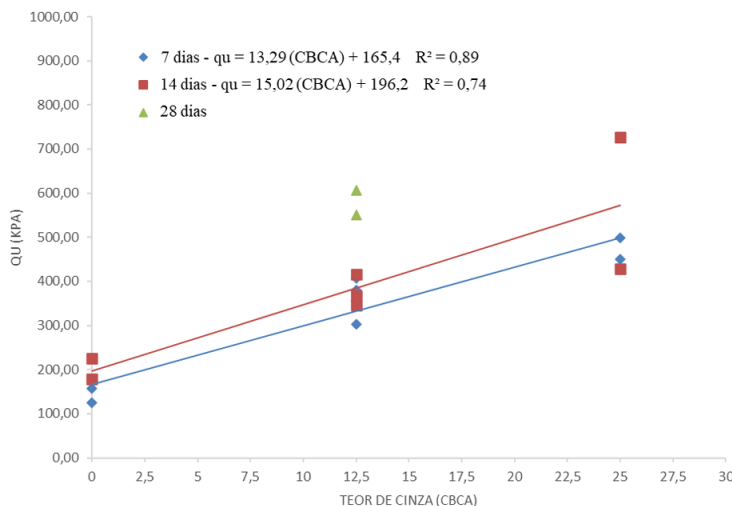


Figura 3. Resistência à compressão simples em função do teor de CBCA

No presente trabalho, foram utilizados três de teores de CBCA (0%, 12,5% e 25,0%) e quanto maior o teor de CBCA maior a resistência encontrada. Analogamente, Dang et al. (2021) obtiveram uma melhora significativa na resistência à compressão simples de um solo expansivo tratado com CBCA e cal. Eles utilizaram os teores de CBCA de 6%, 10%, 18% e 25% e observaram que, quanto maior o incremento, maior a resistência à compressão simples obtida. Essa mesma observação foi feita por Dalla Rosa (2009), em seu estudo com solo estabilizado com cal e cinza volante nos teores de 0% a 25%. Como justificativa, a CBCA é uma fonte de sílica amorfa e, portanto, vai servir como componente para reagir com a cal, desencadeando as reações pozolânicas, que formam compostos cimentantes entre os grãos de solo, melhorando sua resistência.

A taxa de crescimento das duas curvas, representadas pelo coeficiente angular, foram de 13,29 e 15,02 para 7 e 14 dias de cura, respectivamente. Então, é possível observar uma tendência de aumento da taxa de crescimento conforme aumenta-se o tempo de cura, indicando que o efeito da CBCA é ligeiramente mais relevante para maiores tempos de cura. Isso se deve a uma maior demanda de tempo para que ocorreram as reações pozolânicas que foram induzidas pelo incremento de CBCA. A Figura 4 apresenta as curvas de ajuste da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função do tempo de cura, para cada teor de CBCA analisado. Ademais, as três curvas seguem uma tendência crescente e proporcional, independente do teor de CBCA.

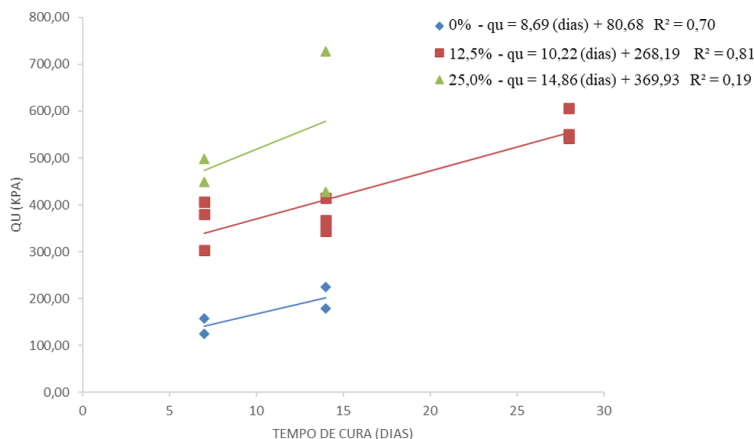


Figura 4. Resistência à compressão simples em função do tempo de cura

É possível observar que, para as condições estudadas, a taxa de crescimento (coeficiente angular) das retas é maior conforme o teor de CBCA cresce, logo, observa-se que o tempo de cura é mais impactante no ganho de resistência conforme se incrementa CBCA no solo. Isso se dá pois, quanto maior o teor de CBCA, mais sílica em estado amorfo está disponível para reagir com a cal proveniente da reação de hidratação do cimento, assim, as reações pozolânicas irão acontecer em maior intensidade e, conseqüentemente, a cimentação entre partículas será maior. Ao analisar o coeficiente linear, é possível perceber que ele aumenta com o teor de CBCA, indicando que a resistência à compressão simples aumenta, quando o teor de CBCA também aumenta. Cabe destacar que, essas observações acerca do ganho de resistência são válidas para os teores de CBCA e tempos de cura estudados.

Assim, pode-se afirmar que quanto maior o teor de CBCA e quanto maior for o tempo de cura, maior será a resistência à compressão simples do solo. Em termos comparativos, Alvaréz-Ramírez et al. (2012) realizou ensaios de compressão simples para blocos de solos compactados, com tempo de 7, 14 e 28 dias para avaliação a adição de cal e CBCA. Foi indicado que blocos sem a aplicação da CBCA obtiveram menores valores de resistência, e os que possuíam maior tempo tiveram uma maior resistência, que é atribuível a progressiva densificação da matriz como resultado da hidratação e das reações pozolânicas.

#### 4 CONCLUSÕES

Os ensaios de compressão simples permitiram observar que o solo expansivo estabilizado com CBCA e cimento apresentou resistência crescente com o aumento do teor de CBCA adicionado. Obteve-se, com 7 dias de cura, que o incremento de 12,5% e 25% de CBCA geraram em relação a amostra sem o aditivo, respectivamente, um aumento de 156,74% e 238,84% na resistência à compressão simples. Para a amostra com 12,5% de CBCA, o aumento do tempo de cura de 7 para 14 dias representou um ganho de resistência de 3%, enquanto, de 14 para 28 dias o ganho foi de 56%. Esse comportamento deve-se provavelmente à constituição química do solo expansivo e da CBCA, ricos em sílica no estado amorfo e alta superfície específica, facilitando as reações pozolânicas. O tempo de cura também influenciou positivamente a resistência a compressão simples da mistura solo expansivo/cimento/CBCA, pois as reações pozolânicas acontecem de maneira lenta. Além disso, a utilização da CBCA é uma alternativa promissora para uma estabilização sustentável de solos.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Laboratório de Engenharia de Pavimentos e Universidade de Federal de Campina Grande pela disponibilização dos laboratórios e equipamentos.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvaréz-Ramírez, R., Montes-García, P., Martínez-Reyes, J., Altamirano-Juárez, D. C., & Gochi-Ponce, Y. (2012) The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. *Construction and building materials*, 34, 296-305.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2012). NBR 12025. *Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2015). NBR ISO 9001. *Sistema de Gestão de Qualidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2016). NBR 16137. *Ensaaios não destrutivos - Identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por fluorescência de raios X e espectrometria por emissão óptica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2018). NBR 16697. *Cimento Portland – Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Athira, V. S., Charitha V., Athira G., Bahurudeen A. (2021) Agro-waste ash based alkali-activated binder: Cleaner production of zero cement concrete for construction. *Journal of Clean Production*, 286, 125429.

- Cacuro, T. A., & Waldman, W. R. (2015). Cinzas da queima de biomassa: aplicações e potencialidades. *Revista virtual de Química*, 7(6), 2154-2165.
- Cerato, A., Luttenegger, A. (2002). Determination of surface area of fine-grained soils by the ethylene glycol monoethyl ether (EGME) method, *Geotechnical Testing Journal*, 25 (2), 315-321
- Consoli, N. C., Bittar Marin, E. J., Quiñónez Samaniego, R. A., Heineck, K. S., & Johann, A. D. R. (2019). Use of sustainable binders in soil stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2), 06018023.
- Consoli, N. C., Festugato, L., Consoli, B. S., & da Silva Lopes, L. (2015). Assessing Failure Envelopes of Soil–Fly Ash–Lime Blends. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(5), 04014174. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001134
- Costa, N., & Craizer, W. (1978) Micro-ancoragens e Fundações em solos Expansivos. In: 1º Seminário de mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Salvador. *Anais...* 16-192p.
- Dalla Rosa, A. (2009) *Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 200 p.
- Dang, L. C., Khabbaz, H., & Ni, B. J. (2021) Improving engineering characteristics of expansive soils using industry waste as a sustainable application for reuse of bagasse ash. *Transportation Geotechnics*, 31, 100637.
- Farias, E. R. D. (2005) *A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação: análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 107 p.
- Ferreira, S. R. M. (1995) Colapso e expansão de solos naturais não saturados devidos à inundação, Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Engenharias, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 379p.
- Firoozzi, A. A., Guney Olgun, C., Firoozzi, A. A., & Baghini, M. S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8, 1-16.
- Guedes, J. P. (2022) *Influência da umidade de compactação na resistência de solo expansivo estabilizado com cal e cinza do bagaço da cana-de-açúcar*. Trabalho de Conclusão de Curso, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, 58 p.
- Jonatan, J., Stracke, F., Korf, E., & Consoli, N. (2012) A influência do tipo de cimento na resistência à compressão simples de uma areia artificialmente cimentada. *Geotecnia*, (125), 87-94.
- Kulanthaivel, P., Soundara, B., Velmurugan, S., & Naveenraj, V. (2021) Experimental investigation on stabilization of clay soil using nano-materials and white cement. *Materials Today: Proceedings*, 45, 507-511.
- Thomas B., Yang J., Bahurudeen A., Abdalla J., Hawileh R., Hamada H., Nazar S., Jittin V., Ashish D (2021) Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in concrete – a review. *Materials Today Sustainability*, 15, 100086.
- Trindade, T. P. D., Iasbik, I., Lima, D. C. D., Silva, C. H. C., & Barbosa, P. S. D. A. (2004). Latossolo vermelho-amarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória: estudo em laboratório. *Rem: Revista Escola de Minas*, 57, 53-58.
- Verma, H., Ray, A., Rai, R., Gupta, T., & Mehta, N. (2021) Ground improvement using chemical methods: A review. *Heliyon*, 7(7).