



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL

JUCIMARA CARDOSO DA SILVA

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS COM CINZA DO  
BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Campina Grande-PB, agosto de 2022

JUCIMARA CARDOSO DA SILVA

ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS COM CINZA  
DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Mestre.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Professora. Dr<sup>a</sup>. Carina Silvani

Campina Grande-PB, agosto de 2022

S586e

Silva, Jucimara Cardoso da.

Estabilização de solos expansivos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar / Jucimara Cardoso da Silva. – Campina Grande, 2022.

104 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2022.

"Orientação: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Carina Silvani".

Referências.

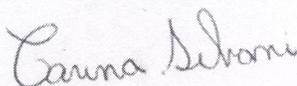
1. Resíduo Industrial. 2. Expansão Unidirecional.
3. Melhoramento de Solo. 4. Sustentabilidade. I. Silvani, Carina.
- II. Título.

CDU 624.13(043)

# Estabilização de Solos Expansivos com Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 29/08/2022

BANCA EXAMINADORA



---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Carina Silvani  
(Orientadora)



Documento assinado digitalmente

ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LU

Data: 29/09/2022 10:30:14-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena  
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG  
(Examinador interno)



---

Prof. Dr. Nilo Cesar Consoli  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS  
(Examinador externo)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL  
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

### REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**
2. **ALUNO: JUCIMARA CARDOSO DA SILVA/ COMISSÃO EXAMINADORA: DR.<sup>a</sup> CARINA SILVANI - PPGECA/UFMG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR. ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA – PPGECA/UFMG – EXAMINADOR INTERNO, DR. NILO CESAR CONSOLI – PPGEC/UFRGS - EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 28/2022). / TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS COM CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 09:00 HORAS / FORMA DA SESSÃO: POR VÍDEO CONFERÊNCIA.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA POR VÍDEO CONFERÊNCIA, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 29 DE AGOSTO DE 2022**
- 5.
- 6.
- 7.
8. **NILO CESAR CONSOLI – PPGEC/UFRGS - EXAMINADOR EXTERNO**



Documento assinado eletronicamente por **CARINA SILVANI, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/08/2022, às 12:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO (A)**, em 29/08/2022, às 12:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Nilo Cesar Consoli, Usuário Externo**, em 29/08/2022, às 14:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, CHEFE (A)**, em 30/08/2022, às 09:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **JUCIMARA CARDOSO DA SILVA, Usuário Externo**, em 30/08/2022, às 12:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **2575971** e o código CRC **7FF1A64B**.

---

*“Faça seu melhor dia após dia, sempre se concentrando na tarefa daquele dia. E o seu SUCESSO maior estará garantido”.*

*Caio Carneiro*

Dedico esse meu trabalho aos meus pais, Lucirleide e Julio por todo apoio, amor e incentivo durante toda a minha trajetória.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela dádiva do meu existir, por cada passo, vitória e aprendizado ao longo desta minha caminhada até aqui. À minha família, pelo amor incondicional, incentivo e apoio, em especial aos meus pais (JULIO e LUCIRLEIDE), aos meus irmãos (JUNIELTON, RONIELSON e RENILSON), a minha irmã (ILMARA) e ao meu pequeno e lindo sobrinho (PAULO HENRIQUE), a todos vocês o meu muito obrigada por tudo que representam na minha vida. EU AMO MUITO VOCÊS!

A minha ilustre orientadora, Professora Carina Silvani pelos ensinamentos, confiança, paciência, disponibilidade, pelas inúmeras horas de orientações para realização desse trabalho de dissertação, pela sua amizade e, ainda mais, pelo prazer de compartilhar momentos contigo. E, sobretudo, por ter ACREDITADO no meu potencial como acadêmica, por ter aberto as portas para essa minha vivência lá em 2018. AGRADEÇO TODOS OS DIAS A DEUS PELA SUA EXISTÊNCIA CARINA SILVANI.

Agradeço imensamente todos os meus amigos, em especial a Anny e Tiago Sena por ser fazer tão presente no início dessa batalha compartilhando horas e horas de estudos e sobretudo, conhecimentos geotécnicos. Agradeço aos meus amigos Geraldo, Jamilson, Ítalo, Alan e Iam, a minha amiga Rayanne, ao meu noivo Nigério e ao meu irmão Renilson por juntos terem me dado força e apoio durante praticamente um ano trancados no prédio durante a pandemia, que foi exatamente o primeiro ano de mestrado.

Minha gratidão a todos os meus amigos do LEP por todo companheirismo, pelas trocas e ajudas infinitas de conhecimentos, em especial ao João Pedro por todo apoio e colaboração no desenvolvimento desta pesquisa. A todos vocês o meu muito obrigado por terem compartilhado seus tempos comigo, foi um prazer enorme estar com vocês durante este período. Aos técnicos de Laboratório, em especial ao Arthur, agradeço a paciência e todo o conhecimento compartilhado.

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) pelo espaço cedido para realização dos ensaios laboratoriais para desenvolvimento desta pesquisa. Ao PPGECA por todo empenho em fazer acontecer, mesmo em meio às adversidades da pandemia.

A CAPES pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos fornecida durante os 2 anos de mestrado.

Agradeço a minha banca examinadora pelo singelo tempo dedicado ao meu trabalho. Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste sonho.

## RESUMO

A cinza do bagaço da Cana de Açúcar (CBCA) é um resíduo industrial abundantemente provenientes das usinas de beneficiamento da cana-de-açúcar, cujo descarte inadequado é prejudicial ao meio ambiente. Nessa pesquisa, a CBCA foi estudada como uma aplicação sustentável na estabilização de solos expansivos, de modo a investigar as vantagens deste resíduo no controle dos elevados índices de expansão de solos. Solos expansivos apresentam instabilidade volumétrica ao sofrer variação de umidade e tem o seu comportamento caracterizado pelo acréscimo de volume (expansão) quando há aumento na umidade e redução de volume (contração) ao perderem umidade, por isso, quando usados como capacidade de suporte em construções, sem antes ser tratado e estabilizado adequadamente, ocasionam problemas diversos em obras de rodovias, canais e edificações. As características física, química e mineralógica do solo expansivo (mistura de bentonita cálcica ativada + areia), da CBCA e das misturas de CBCA/solo desta pesquisa foram investigadas através, dos ensaios de massa específica dos grãos, análise granulométrica, compactação, limites de Atterberg, pH, adsorção de azul de metileno, difração de raio-X (DRX), fluorescência de raio-X (FRX), resistência a compressão simples e expansão unidirecional. Os resultados revelaram que o solo é altamente expansivo apresentando potencial de expansão de até 20%, índice de plasticidade de 37,80%, presença do argilomineral montmorilonita, elevada capacidade de troca catiônica (CTC) e uma atividade coloidal indicando a presença de uma argila ativa a muito ativa. A CBCA apresentou um percentual de aproximadamente 23% de óxidos de magnésio e cálcio em sua composição. Ambos os materiais aqui estudados apresentam pH alcalino e a adição de teores de CBCA ao solo ocasionou um incremento de 4% no pH do solo. A adição de teores a partir de 12,50% de CBCA reduziu em 99% o potencial de expansão e em aproximadamente 67% o valor da CTC do solo estudado. Os resultados dos ensaios de resistência a compressão simples não apresentaram dados consistentes e satisfatórios para adições abaixo de 25%, entretanto, para adições acima de 25%, as amostras ensaiadas indicaram a possibilidade de características potencialmente cimentantes da CBCA. Por fim, pode-se constatar que, a CBCA é um resíduo industrial com grande potencial para novas aplicações na estabilização de solos expansivos.

Palavras Chaves: Resíduo Industrial, Expansão Unidirecional, Melhoramento de solo, Sustentabilidade.

## ABSTRAT

Sugarcane bagasse ash (CBCA) is an industrial residue from sugarcane processing plants, whose improper disposal is harmful to the environment. In this research, CBCA was studied as a sustainable application in the stabilization of expansive soils, to investigate the advantages of this residue in the control of high rates of soil expansion. Expansive soils present volumetric instability when suffering humidity variation and their behavior is characterized by the volume increase (expansion) when there is an increase in humidity and volume reduction (contraction) when they lose moisture, therefore, when used as support capacity in constructions, without being treated and stabilized properly, cause several problems in road works, canals and buildings. The physical, chemical and mineralogical characteristics of the expansive soil (activated calcium bentonite + sand mixture), the SCBA and the SCBA/soil mixtures of this research were investigated through the tests of specific gravity of the grains, granulometric analysis, compaction, Atteberg limits, pH, adsorption of methylene blue, X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), single compressive strength and unidirectional expansion. The results revealed that the soil is highly expansive, with expansion potential of up to 20%, plasticity index of 37,80%, presence of the clay mineral montmorillonite, high cation exchange capacity (CEC) and a colloidal activity indicating the presence of a clay active to very active. The CBCA presented a percentage of approximately 23% of magnesium and calcium oxides in its composition. Both materials studied here present alkaline pH and the addition of BCCA contents to the soil caused a 4% increase in soil pH. The addition of contents from 12,50% of SCBA reduced the expansion potential by 99% and the CEC value of the studied soil by approximately 67%. The results of the simple compressive strength tests did not present consistent and satisfactory data for additions below 25%, however, for additions above 25%, the samples tested indicated the possibility of potentially cementing characteristics of CBCA. Finally, it can be seen that CBCA is an industrial waste with great potential for new applications in the stabilization of expansive soils.

Keywords: Industrial Waste, Unidirectional Expansion, Ground Improvement, Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura dos minerais tetraédricos .....	21
Figura 2: Estrutura dos minerais octaédricos .....	21
Figura 3: Esquema da expansão de uma montmorilonitas .....	23
Figura 4: Ocorrências de solos expansivos em diversas regiões .....	28
Figura 5: Carta de suscetibilidade a expansão dos solos em Pernambuco .....	29
Figura 6: Mecanismo de floculação do solo devido a troca catiônica.....	36
Figura 7: Mecanismo de desenvolvimento de reação pozolânica em solo estabilizado.	37
Figura 8: Contribuição da cana-de-açúcar na matriz energética do Brasil ao longo dos anos.....	42
Figura 9: Fluxograma da pesquisa.....	48
Figura 10: Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBCA).....	49
Figura 11: Solo .....	50
Figura 12: Caldeira (a) Vista Frontal e (b) Vista Lateral .....	52
Figura 13: Medição da temperatura a) interna e b) externa.....	52
Figura 14: Cinza do bagaço da cana de açúcar no fundo da caldeira.....	53
Figura 15: Corpos de prova - (a) Tipo A e (b) Tipo B .....	57
Figura 16: (a) Molde de bronze (b) Prensa para moldagem .....	58
Figura 17: Programa fatorial dos ensaios de expansão em uma dimensão .....	59
Figura 18: Programa fatorial dos ensaios de compressão simples .....	60
Figura 19: Prensa de adensamento utilizada nos ensaios de expansão em uma dimensão - (a) Visão total do equipamento e (b) visão aproximada da célula .....	62
Figura 20: Monitoramento da queima do bagaço de cana-de-açúcar na caldeira .....	65
Figura 21: Processo de requeima da CBCA em mufla.....	67
Figura 22: Distribuição do tamanho das partículas da CBCA.....	68
Figura 23: Difração dos raio-x da CBCA.....	70
Figura 24: Distribuição do tamanho das partículas do solo expansivo .....	71
Figura 25: Curva Proctor do solo expansivo .....	73
Figura 26: Difração dos raio-x do solo expansivo.....	75
Figura 27: Análise do Potencial de Hidrogênio (pH) do solo ao se adicionar teores de CBCA .....	76
Figura 28: CTC do solo ao adicionar diferentes teores de CBCA .....	77
Figura 29: Superfície específica do solo ao adicionar diferentes teores de CBCA.....	78
Figura 30: Curvas Proctor do solo puro e das misturas com adição de CBCA.....	79

Figura 31: Expansão do Solo Puro x Tempo.....	80
Figura 32: Expansão para compactação com 12,75kN/m <sup>3</sup> de peso específico.....	81
Figura 33: Expansão para compactação com 13,75kN/m <sup>3</sup> de peso específico.....	82
Figura 34: Expansão para compactação com 14,75kN/m <sup>3</sup> de peso específico.....	83
Figura 35: Expansão para compactação com 15,75kN/m <sup>3</sup> de peso específico.....	84
Figura 36: Expansão para compactação com 16,75kN/m <sup>3</sup> de peso específico.....	85
Figura 37: Expansão x Teor de CBCA.....	86
Figura 38: Efeito da expansão por teor de CBCA no Peso Especifico.....	87
Figura 39: Efeito da porosidade por teor de CBCA .....	88
Figura 40: Relação entre teor de CBCA, CTC e Expansão.....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Métodos de identificação de solos expansivos .....	25
Tabela 2: Análise Comparativa a partir da Teor dos elementos encontrados pelos autores dos estudos com CBCA.....	43
Tabela 3: Autores e resultados dos estudos realizados em CBCA .....	44
Tabela 4: Estudos e resultados da aplicação de CBCA em concretos e argamassas.....	45
Tabela 5: Ensaio de caracterização dos Materiais .....	54
Tabela 6: Variáveis controláveis .....	55
Tabela 7: Variáveis fixadas .....	55
Tabela 8: Variáveis de ruído.....	55
Tabela 9: Ensaio de resistência mecânica e expansão .....	58
Tabela 10: Rendimento da queima do bagaço da cana-de-açúcar.....	66
Tabela 11: Propriedades físicas da CBCA .....	68
Tabela 12: Espectrometria de Fluorescência de Raio-X da CBCA.....	69
Tabela 13: Propriedades Físicas do Solo Expansivo .....	72
Tabela 14: Espectrometria de Fluorescência de Raio-X do Solo Expansivo .....	74
Tabela 15: Pontos máximos das curvas Proctor .....	79

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	16
2.	OBJETIVOS .....	19
2.1	Objetivo Geral .....	19
2.2	Objetivos Específicos .....	19
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
3.1	Solos Expansivos .....	20
3.1.1	Argilominerais .....	20
3.1.2	Mecanismo de expansão dos solos .....	23
3.1.3	Formas de Identificação dos Solos Expansivos.....	24
3.1.4	Locais de Ocorrência de Solos Expansivos no Brasil e no Mundo .....	27
3.1.5	Fatores de Influência no mecanismo de expansão.....	30
3.2	Estabilização dos Solos Expansivos .....	33
3.2.1	Estabilização física .....	33
3.2.2	Estabilização mecânica .....	33
3.2.3	Estabilização Química .....	34
3.2.3.1	Estabilização com Cal.....	34
3.2.3.2	Estabilização com Cimento .....	37
3.2.3.3	Estabilização de Solo com Materiais Alternativos .....	38
3.2.4	Cinza Do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBCA).....	40
3.2.5	Propriedades da Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar .....	42
3.2.6	Aplicação da Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar como pozolana.....	44
4.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	47
4.1	MATERIAIS.....	49
4.1.1	Água.....	49
4.1.2	Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBCA).....	49
4.1.3	Solo .....	45

4.2	MÉTODOS .....	51
4.2.1.	Monitoramento, coleta e requieima da CBCA.....	51
4.2.2.	Caracterização da CBCA e do Solo.....	53
4.2.3	Planejamento Experimental .....	54
4.2.4	Determinação das Curvas Proctor das misturas solo + CBCA.....	56
4.2.5	Preparação das amostras .....	56
4.2.6	Moldagem e Cura dos Corpos de Provas.....	56
4.2.7	Ensaio Respostas .....	58
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	64
5.1	Acompanhamento do Processo de Produção da CBCA .....	64
5.2	Análise da Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBCA) .....	67
5.2.1	Propriedades Físicas da CBCA.....	67
5.2.2	Análise Química da CBCA.....	69
5.3	Análise do Solo Expansivo .....	71
5.3.1	Propriedades Físicas do Solo Expansivo .....	71
5.3.2	Composição Química do Solo Expansivo .....	73
5.4	Análise das Características das Misturas de SOLO + CBCA.....	76
5.4.1	Análise do Potencial de Hidrogênio .....	76
5.4.2	Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Superfície Específica (S.E).....	77
5.5	Análise da Curva Proctor das Misturas de SOLO + CBCA .....	78
5.6	Análise da Expansão em Solo Puro .....	79
5.7	Efeito da CBCA na Expansão do solo .....	80
5.8	Efeito da Porosidade .....	88
5.9	Análise Comparativa entre teor de CBCA x CTC x Expansão .....	88
5.10	Ensaio de Compressão Simples .....	90
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	91
6.1	Conclusões.....	91
6.2	Sugestões .....	92



## 1. INTRODUÇÃO

O solo é usado como suporte para diversas obras de construção civil, portanto, necessita ter características geotécnicas adequadas as necessidades do projeto. No entanto, existem grandes depósitos de solos problemáticos, como por exemplo os solos expansivos que apresentam instabilidade volumétrica ao sofrer variação de umidade ou sucção. O comportamento dos solos expansivos caracteriza-se pelo acréscimo de volume (expansão) quando há aumento na umidade e redução de volume (contração) ao perderem umidade.

Esse tipo de solo ocorre em diversas regiões do mundo, como Canadá, Estados Unidos, China, Turquia, Israel, França, Austrália, Índia, África do Sul, Reino Unido e Brasil, sendo comum em regiões áridas e semiáridas, como o Nordeste brasileiro (CHEN,1975; CHEN,1988; CAMERON, 2014; CONSOLI *et al.*, 2019; FERREIRA *et al.*, 2017; LI, 2019; PAIVA *et al.*, 2016; POONI *et al.*, 2019; REN, 2014; SILVANI *et al.*, 2020). Destaca-se que o fenômeno de expansão ocorre nos solos não saturados, que se originam da decomposição de rochas que permitam o surgimento de argilominerais de estrutura laminar 2:1, como por exemplo as rochas ígneas básicas, basaltos e diabásio. Formações sedimentares e metamórficas, também, são capazes de, por meio do intemperismo, promover o surgimento de solos expansivos (CAMAPUM *et al.*, 2015).

O comportamento expansivo desses solos é responsável por causar diversos problemas na construção civil, sobretudo em obras geotécnicas de rodovias, canais e edifícios (CAMAPUM *et.al.*, 2015; FERREIRA *et.al*, 2017; KULANTHAIVEL *et al.*, 2020; PUPPALA *et.al*, 2013; PHANIKUMAR *et.al*, 2016; TAHER *et al.*, 2020). A Sociedade Americana de Engenheiros Civil estima que uma em cada quatro construções apresenta alguns danos causados por solos expansivos e que, em um ano típico, solos expansivos podem causar maior perda financeira para os proprietários do que danos causados por tremores de terra, inundações, tornados e furacões combinados. (FERREIRA *et.al.*, 2017; JONES *et al.*, 2015; PAIVA *et.al.*,2016;).

Logo, é necessário tratar os solos expansivos de modo, a torná-los adequado às necessidades do projeto e assim, garantir o melhor custo benefício ao evitar gastos com mão de obra, equipamentos, transporte e mobilizações de material para escavação e aterro da camada de solo expansivo existente. Com esta finalidade, técnicas de estabilização podem ser adotadas, dentre elas pode-se citar: estabilização química, física e mecânica, sendo a estabilização química a mais utilizada neste tipo de solo. A

estabilização química consiste em adicionar aditivos químicos visando melhorar as características naturais do solo como por exemplo a expansibilidade através da adição de materiais como: cal, cinza volante, cinza de casca de arroz, resíduo cerâmico e cloretos de cálcio, potássio, ferro e sódio (AMMINEDU; CHAITANYA, 2017; KESHAVAN *et al.*, 2017; POURAKBAR *et al.*, 2015; SILVANI *et al.*, 2020). Com isso, a presente pesquisa, busca avaliar o potencial de estabilização de solos expansivos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA).

A CBCA é um subresíduo resultante da queima do bagaço de cana-de-açúcar, pois, a produção de açúcar, bebidas destiladas e etanol é resultante do processo de moagem da cana-de-açúcar, que tem como resíduo primário o bagaço da cana-de-açúcar. Por ser um material altamente calórico, o bagaço é vastamente utilizado como fonte de calor de caldeiras para produção de energia (CORDEIRO, 2009; DRUMOND, 2019; FAIRBAIRN, 2009b; TOLEDO FILHO, 2009), destaca-se ainda que o bagaço é um dos principais resíduos gerados no mundo, com uma produção estimada de  $5.5 \times 10^6$  toneladas (CORDEIRO; ANDREÃO; TAVARES, 2019). Segundo Bruschi (2020), a quantia de CBCA produzida anualmente no Brasil equivale a aproximadamente 2,5 milhões de toneladas, valor que representa cerca de 7% da produção de cimento Portland no Brasil (CORDEIRO *et al.*, 2009).

A CBCA que é gerada no processo, é, em geral, depositada em locais impróprios e devido à presença do potássio e de metais pesados utilizados no controle do amadurecimento da cana-de-açúcar podem contaminar o solo e o lençol freático (ANDREÃO; CORDEIRO, 2019; FERNANDES FILHO *et al.*, 2012; TAVARES, 2019). Além disso, o estudo feito por Le Blond *et al.* (2014) mostra que a CBCA pode provocar problemas pulmonares. Portanto, a CBCA também se torna objeto de estudo para fins de sustentabilidade.

Autores, como Cordeiro *et al.* (2008), Cordeiro *et al.* (2009 a e b), Chusilp *et al.* (2009) e Fernandes Filho *et al.* (2012) avaliaram a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) como alternativa para material pozolânico em substituições parciais ao cimento Portland na matriz cimentícia de argamassas e concretos. Os resultados das pesquisas mostraram que a cinza pode ser utilizada como material pozolânico pelo alto teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) em sua composição.

E ainda, outros materiais semelhantes a CBCA, foram adicionados ao solo expansivo por outros autores que obtiveram resultados satisfatórios, como por exemplo: Liu et al (2019); Lacerda (2019); Silva (2018); que estudaram a estabilização de solos expansivos por meio, da adição de teores da cinza de casca de arroz, e concluíram que a cinza de casca de arroz apresenta grande eficiência no combate da expansão destes solos.

Portanto, o uso da CBCA na estabilização de solos apresenta elevado potencial na viabilização da construção civil sob depósitos de solos problemáticos, cria uma destinação sustentável a este resíduo abundante no Brasil e no mundo e, ainda, possibilita a geração de uma nova fonte de renda para a indústria sucroalcooleira.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o uso de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) na estabilização de solos expansivos.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Identificar qual o teor de CBCA mais apropriado para controlar a expansão de um solo;
- Avaliar a influência da porosidade na expansão da mistura solo/CBCA;
- Investigar a relação entre a CTC e a expansão de um solo tratado com CBCA;
- Estudar a influência da CBCA na resistência a compressão simples do solo expansivo.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção irá explicar acerca dos três assuntos que compõem o tema central desta pesquisa, sendo estes: solo expansivo, estabilização de solos e a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA). A primeira parte aborda os solos expansivos, bem como suas características e formas de identificação. Na segunda parte é descrito o processo de estabilização de solos, suas propriedades, tipos, aplicações e métodos para estabilização dos solos expansivos. Por fim, a terceira parte discorre sobre a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), relatando a sua origem, processo de produção, características e aplicações usuais.

#### 3.1 Solos Expansivos

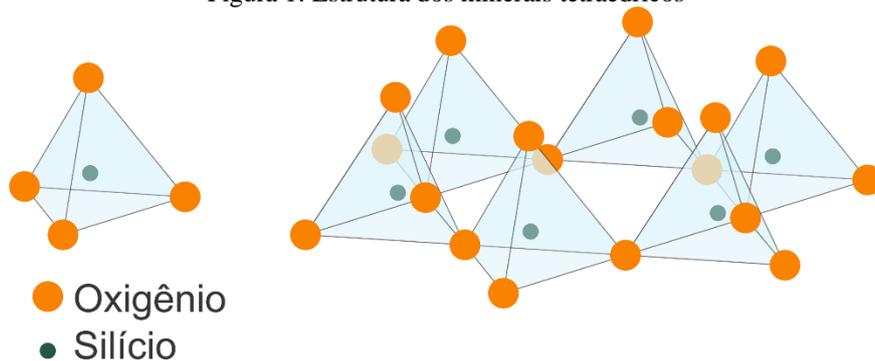
Solos expansivos são solos que apresentam instabilidade volumétrica ao sofrer variação de umidade ou sucção. Para Constantino (2018), um solo é considerado expansivo quando apresenta variação de volume superior a 1%, resultante da mudança de umidade ou sucção, sem qualquer variação nas cargas aplicadas nesse solo, podendo essa variação volumétrica atingir valores superiores a 30% (NUNES, 1978; NUHFER *et al.*, 1993; QI; VANAPALLI, 2015).

De acordo com, Sharma e Sivapullaiah (2015), solos expansivos aumentam de volume quando a umidade cresce e diminuem quando há perda de umidade, geralmente devido à presença de argilominerais expansivos como a montmorilonita e a vermiculita. As mudanças volumétricas na microestrutura dos argilominerais provoca reorganização do esqueleto sólido na macroestrutura do solo, provocando a expansão (FERREIRA *et al.*, 2017; MONROY, 2015; LIU *et al.*, 2015; RIDLEY; ZDRAVKOVIC 2015).

##### 3.1.1 Argilominerais

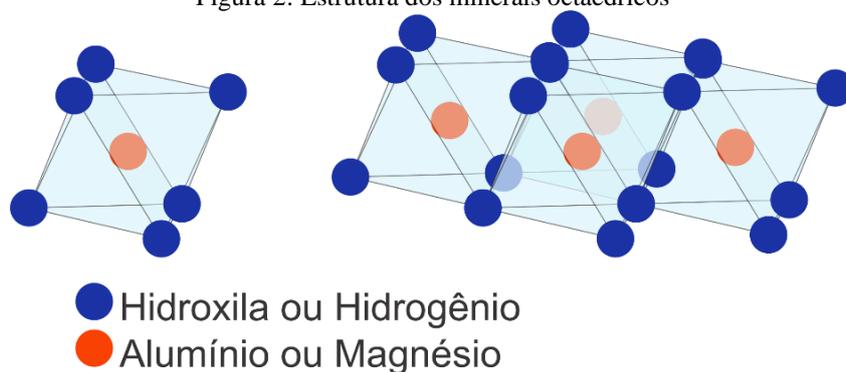
Os argilominerais apresentam duas estruturas básicas, a primeira de tetraedros organizados num plano com o um átomo de silício ligado a quatro átomos de oxigênio, formando o  $\text{SiO}_2$  (Figura 1) e a segunda, de octaedros formados por átomo de alumínio cercados por átomos de oxigênios ou hidroxilas (Figura 2) (PINTO, 2006; GOMES, 1986; PEREIRA, 2004).

Figura 1: Estrutura dos minerais tetraédricos



Fonte: Souza (2021)

Figura 2: Estrutura dos minerais octaédricos



Fonte: Souza (2021)

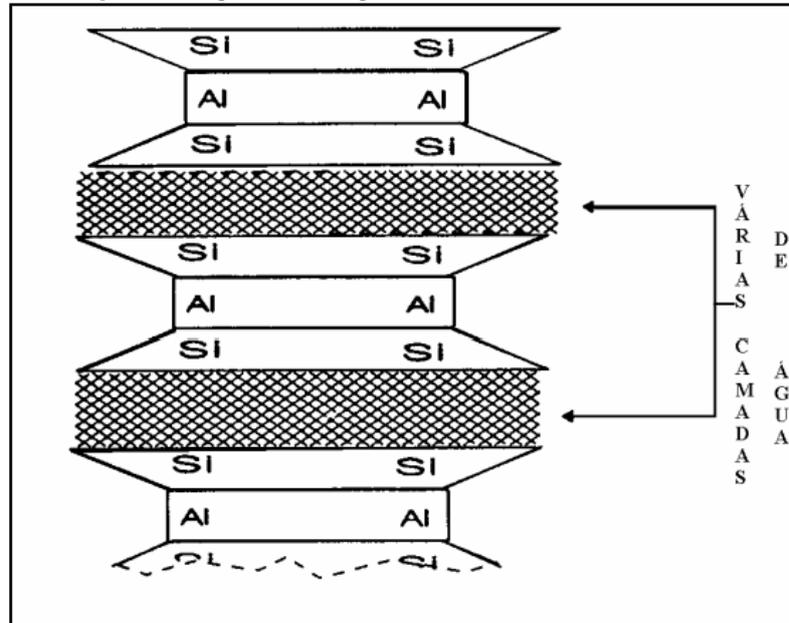
A disposição dessas estruturas em camadas possibilita os arranjos estruturais 1:1 (grupo das caulinitas), 2:1 (grupo das esmectitas, micas e vermiculitas), 2:1:1 (grupo da clorita e interstratificados), referindo-se à quantidade de tetraedros de  $\text{SiO}_2$  e de octaedros de hidróxidos que formam a célula unitária. Os minerais do grupo esmectita, vermiculita e interstratificados podem tornar o solo potencialmente expansivo (PEREIRA, 2004).

O grupo caulinita (1:1), de fórmula estrutural  $(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}$ , resulta da combinação de uma folha tetraédrica (Figura 1) com uma folha octaédrica (Figura 2), superpostas indefinidamente e unidas por ligações do tipo pontes de hidrogênio entre os átomos  $\text{O}^{2-}$  e por grupos  $\text{OH}^-$  entre planos próximos. Os minerais deste grupo apresentam baixa expansividade, pois não ocorre hidratação das camadas pela baixa distância interbasal e pouca adsorção superficial (estrutura eletricamente neutra). A consequência disso é a estabilidade desses minerais na presença da água, contribuindo para a não expansibilidade e ausência de trocas catiônicas entre as camadas desse material (GRIM, 1953; GRIM, 1962; GOMES, 1986; GILLOT, 1987; SOUZA, 2015).

O grupo das esmectitas (2:1) resulta da combinação de uma folha octaédrica (Figura 2) intercalada entre duas folhas tetraédricas (Figura 1) empilhadas e unidas por ligações iônicas entre os íons de silício dos tetraedros com os íons de alumínio dos octaedros. Esses minerais apresentam cargas elétricas negativas nas superfícies, resultantes das substituições isomórficas. Esse grupo apresenta expansibilidade intracristalina pela passagem de água e líquidos orgânicos entre as camadas. A expansibilidade intracristalina é explicada pela hidratação dos cátions, adsorvidos entre as camadas visando estabilidade elétrica, pela ação das moléculas polares da água e pela adsorção superficial de moléculas da água nas camadas contendo oxigênio (DEER; HOWIE, 1963; OLPHEN, 1963; PEREIRA, 2004; SOUZA, 2015). O principal exemplo das esmectitas é a montmorilonita.

A montmorilonita é uma argila que apresenta atividade coloidal e plasticidade altas, além de uma elevada capacidade de expansão e contração, pois as ligações que mantem suas camadas unidas são fracas, permitindo a passagem da água e instabilidade das camadas estruturais (QUIRK, 1954; MUGGLER *et al.*, 2005; NORRISH, 1954). Devido as substituições isomórficas, as montmorilonitas apresentam elevada capacidade de troca catiônica, da ordem de 80 a 180 meq/100 g, além de uma vasta área específica, podendo atingir valores superiores a 1000 m<sup>2</sup>/g, justificando seu comportamento coloidal (MITCHELL, 1976; MITCHELL; SOGA, 2005; SOUZA, 2015). As montmorilonitas são abundantemente conhecidas por suas propriedades expansivas. Pereira (2014) afirma que solos com significativa quantidade deste argilomineral costumam apresentar tensões de expansão elevadas. A Figura 3 apresenta o comportamento expansivo das montmorilonitas.

Figura 3: Esquema da expansão de uma montmorilonitas



Fonte: Pereira (2004)

As vermiculitas são minerais do tipo 2:1 provenientes de alterações das micas. Estruturalmente, apresentam lâminas de mica intercaladas por moléculas de água. Apresentam cargas líquidas negativas, provenientes da substituição do átomo de silício por átomos de alumínio na camada tetraédrica, que são neutralizados pelos cátions presentes junto às moléculas de água entre as camadas. Além disso, é uma argila de alta atividade, com capacidade de troca catiônica da ordem de 100 a 160 meq/100g e com expansão limitada, quando comparada às montmorilonitas, devido a densidade de cargas (MUGGLER *et al.*, 2005; SOUZA, 2015, BARMAN E DASH, 2022).

### 3.1.2 Mecanismo de expansão dos solos

O mecanismo de expansão sofre influência de fatores tais como: tipo de mineral, disponibilidade de água, tipo e quantidade de cátions, além da interação desses cátions com a água do solo (PEREIRA, 2004; SOUZA, 2015).

O mecanismo de expansão dos argilominerais está relacionado à superfície eletricamente carregada com cargas negativas das partículas. Por estarem negativamente carregadas as partículas adsorvem cátions presentes nos fluidos e moléculas de água orientadas para obter o equilíbrio. Como consequência deste processo ocorre uma mudança de carga na superfície da argila. Esta mudança de carga desencadeia um fenômeno conhecido como *diffuse double layer* (dupla camada difusa), o qual tem por consequência o aumento da distância entre os minerais que constituem as argilas. Por

fim, o aumento da distância entre os minerais ocasiona a expansão do solo, conforme ilustrado na Figura 3. (CHRISTOPHER; CHIMOBİ, 2019; İKEAGWUANI; NOWNU, 2019; TENÓRIO, 2019).

Solos expansivos têm uma alta superfície específica em termos de massa, elevada capacidade de troca catiônica (CTC) e baixa permeabilidade (İKEAGWUANI; NOWNU, 2019; MITCHELL; SOGA, 2005). A capacidade de troca catiônica é expressa como a quantidade de cátions necessária para manter a neutralidade na superfície da argila (YADAV; TIWARI, 2017).

O processo de expansão relaciona-se com a capacidade de troca catiônica pois quanto menor a carga elétrica do íon absorvido, maior a distância entre as camadas dos argilominerais, logo maior a expansão do solo. Este mesmo processo pode promover a estabilidade de solos expansivos, contudo para que a troca catiônica contenha expansão, os cátions adsorvidos devem apresentar valência elevada.

Os principais cátions presentes no solo apresentam valência crescente na seguinte ordem Na, K, Ca, Mg, Al, Cr e Fr, sendo que os cátions de menor valência tendem a ser substituídos pelos cátions de maior valência. (PEREIRA, 2004)

### **3.1.3 Formas de Identificação dos Solos Expansivos**

A identificação de solos expansivos é algo extremamente importante para o sucesso de obras da construção civil, sobretudo no contexto geotécnico. No entanto, identificar esse tipo de solo não é algo trivial, e ensaios em campo, como SPT, são incapazes de indicar se um solo é ou não expansivo. No campo, solos argilosos expansivos podem ser reconhecidos em estações secas do ano, através de profundas rachaduras em formas geralmente poligonais, na superfície dos terrenos. (ROGERS et.al., 2014).

O potencial de expansão, parâmetro que visa expressar o quão expansivo é um solo, pode ser avaliado através de métodos indiretos e diretos. Os métodos indiretos são aqueles que se utilizam dos índices físicos e limites de consistência ou parâmetros ligados à textura de simples obtenção em ensaios de laboratório e campo para indicar a potencialidade de expansão. Já os métodos diretos visam medir a expansão real de um solo quando este é sujeito a variação de umidade (CAMAPUM *et al.*, 2015). Os métodos diretos baseiam-se na medida de expansão que é induzida ao solo ou da tensão

fornecida ao solo para impedir a expansão (FERREIRA, 1995). A Tabela 1 apresenta os métodos diretos e indiretos de identificação de solos expansivos.

Os métodos são divididos em dois grandes grupos: métodos diretos e indiretos.

Tabela 1: Métodos de identificação de solos expansivos

Métodos	Subdivisão	Critério	Referência
Indiretos	Identificativos	Difração de raio-X; Microscopia Eletrônica de varredura; Análise termodiferencial; Análise Físico-químicos; Capacidade de troca de Cátions (CTC); Análise por sedimentação Coloidal.	Carcedo <i>et al.</i> (1986); Fink <i>et al.</i> (1971).
	Qualitativos	Granulometria; Geomorfologia; Pedologia; Identificação visual.	Prikloński, (1952); Skempton(1953); Seed <i>et al.</i> (1962); Van Der Merwe (1964); Chen(1965); USBR (1953); Vijayverviya e Ghazzaly (1973); Rodriguez Ortiz (1975); Ranganathan e Satyma(1965).
	Orientativos	Geologia, Pedologia; Geomorfologia; Identificação visual; Baseado no estado do solo (Umidade natural e Saturação); Baseado nas características organolépticas (Aspectos e Estruturas).	Patrick e Snethen (1976); Carcedo <i>et al.</i> (1986); Ferreira (1990 e 1993).
	Avaliativos	Ensaio de expansão de Lambe; Índices endométricos.	Lambe (1960).
Diretos	Quantitativos	Ensaio de expansão livre e pressão de expansão; Ensaio edométricos simples e duplos; Ensaio edométricos com sucção controlada.	Seed <i>et al.</i> (1960); Chen (1965); Vijayverviya e Ghazzaly (1973); Rodriguez Ortiz (1975); Cuellar (1978) Jimenez Salas (1980); Escario (1967 e 1969); Aitchison <i>et al.</i> (1974); Johnson (1978); Mc Keen, (1980).

Dentre os métodos indiretos qualitativos e de fácil mensuração, pode-se evidenciar o critério de Priklonskij (1952) e Critérios de Skempton (1953). Pelos critérios Priklonskij (1952) o solo pode ser classificado, conforme o seu índice de classificação ( $K_d$ ) definido pela equação 1, no qual, o solo pode ser classificado como: solo altamente colapsível ( $K_d < 0$ ); solo não colapsível ( $K_d \leq 0,5$ ) e solo expansível ( $K_d > 1$ ).

$$K_d = \frac{LL - W}{LL - LP} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

W - Umidade

Para os Critérios de Skempton (1953), definiu-se a atividade coloidal de uma argila como o Índice de Atividade ( $I_a$ ), conforme, a Equação 2. Quanto maior a quantidade de argila mais alto é o potencial de expansão.

$$I_a = \frac{IP}{\% < 0,002mm} \quad \text{Eq. (1)}$$

Quando:

$I_a > 2,00$  Muito ativo

$I_a$  entre 1,15 e 2,00 Ativo

$I_a$  entre 0,75 e 1,25 Pouco ativo

$I_a > 0,75$  Inativo

Os métodos diretos quantitativos avaliam a expansão por diferentes ensaios, dentre eles destacam-se o ensaio de expansão livre e a tensão de expansão. A expansão livre consiste na variação volumétrica de um solo ao ser inundado, estando sujeito a uma tensão de carregamento nula ou muito baixa. E, a tensão de expansão consiste na tensão que um solo gera ao expandir. Esses dois ensaios estão intimamente interligados e apresentam formas semelhantes de serem mensurados.

Existem diferentes metodologias para realizar os ensaios de expansão livre e tensão de expansão de um solo, dentre os mais difundidos encontram-se os

procedimentos estabelecidos nas normas da American Society for Testing and Material (ASTM) D4546 (1996) e ASTM D4829 (2011).

### 3.1.2.1 Expansão livre

A expansão livre, potencial de expansão ou índice de expansão consiste na variação de altura que um corpo de prova confinado em um anel rígido sofre ao ser inundado. A norma ASTM D4829 (2011) estabelece como índice de expansão a máxima expansão de um corpo de prova de solo moldado com grau de saturação de 50% e carga de adensamento de 6,9 kPa. O cálculo do índice de expansão dá-se pela Equação 3.

$$IE = \frac{\Delta H}{H_0} * 100 \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

IE: Índice de expansão;

$\Delta H$ : Variação de altura do corpo de prova;

$H_0$ : Altura inicial do corpo de prova;

### 3.1.2.2 Expansão em uma dimensão

O ensaio de expansão em uma dimensão normatizado pela ASTM D4546 (1996) através do método A, é realizado em prensa de compressão edométrica com corpos de prova (CPs) possuindo 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura submetido a uma carga vertical concentrada de 10kPa. Este ensaio pode ser realizado em amostras indeformadas ou reconstituídas. No caso de amostra reconstituída o material constituinte dos CPs deve possuir diâmetro menor igual a 4,95 mm e apresentar propriedades de estado, peso específico seco aparente, umidade e carregamento, iguais às de campo, projeto ou condição que desejasse estudar.

O resultado deste ensaio é a curva de deformação do solo antes e após o umedecimento. Este resultado permite avaliar o comportamento quando submetido ao carregamento sem o umedecimento e posterior expansão após o umedecimento. Este dado pode ser empregado para estudo e projetos de obras geotécnicas.

## 3.1.4 Locais de Ocorrência de Solos Expansivos no Brasil e no Mundo

A registros de ocorrência de solos expansivos em diversas regiões do mundo, sobretudo, em regiões áridas e semiáridas, como pode ser observado na Figura 4, onde a evaporação excede a precipitação pluviométrica. Chen (1975) apresentou em seu estudo

a ocorrência de solos expansivos no México, Marrocos, Cuba e Turquia. Arábia Saudita, Brasil, Chile, China, França, Nigéria e Zimbábue foram citados nos estudos de Mahler (1994). Quispe, *et al* (2014) acrescenta a essa lista países como Nova Zelândia, África Meridional, Estados Unidos, Costa Rica, Canadá, Israel, Colômbia e Equador.

Figura 4: Ocorrências de solos expansivos em diversas regiões

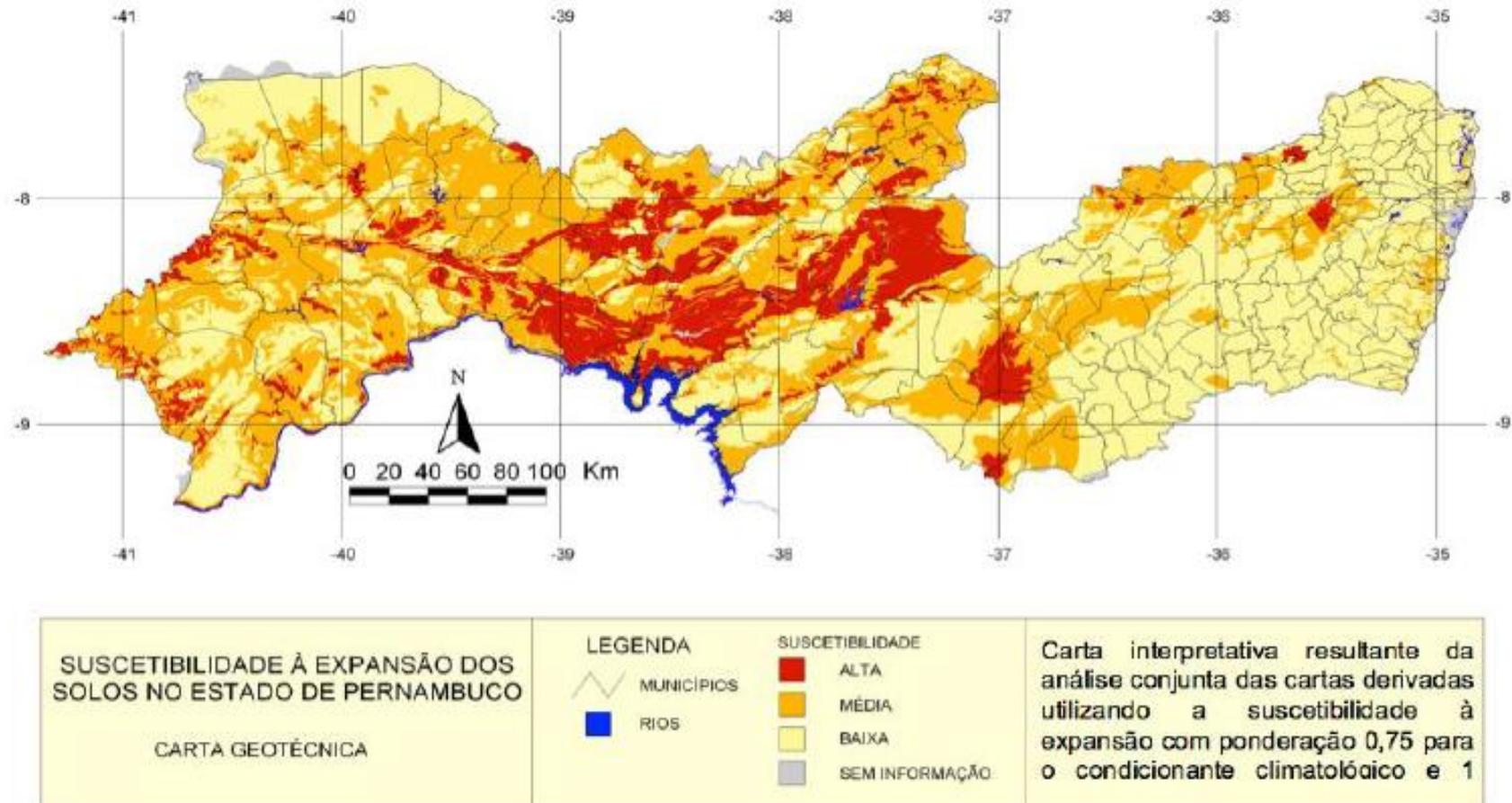


Fonte: Souza (2021)

A ocorrência de solos expansivos no Brasil se dá em diversas regiões. Ferreira (2012) realizou um levantamento da ocorrência de solos expansivos no Brasil e identificou solos expansivos nas regiões Sul-Sudeste, nos Estados do Paraná, São Paulo e Santa Catarina, Região Central, como Mato Grosso e em Estados da região Nordeste, como Pernambuco, Bahia, Sergipe, Ceará e Maranhão.

Pernambuco apresenta solos expansivos localizado em cidades do sertão ao litoral do Estado. Amorim (2004) desenvolveu o mapa de suscetibilidade de solos expansivos em Pernambuco utilizando informações geológicas, pedológicas, climatológicas e o conhecimento geotécnico. Neste mapa (Figura 5) a suscetibilidade de ocorrência de solos expansivo é classificada como alto, médio e baixo. A partir deste, é possível identificar os locais que requerem maior atenção durante a investigação geotécnica preliminar às construções. Cidades como Olinda, Paulista, Recife e Petrolândia, são as que apresentam os maiores valores de potencial de ocorrência de solo expansivo.

Figura 5: Carta de suscetibilidade a expansão dos solos em Pernambuco



Fonte: Amorim (2004)

### 3.1.5 Fatores de Influência no mecanismo de expansão

O mecanismo de expansão é influenciado por diversos fatores, sendo estes agrupados em fatores intrínsecos, intimamente relacionados à natureza e arranjo estrutural, e extrínsecos, relacionados às condições ambientais (SNETHEN *et al.*, 1977; AYALA *et al.*, 1986; SIMÕES, 1987; ATAÍDE, 2017). Dentre estes, pode-se destacar:

- Composição do solo – A mineralogia, especificamente o tipo, teor e arranjo dos argilominerais, além de sua superfície específica, determina a expansibilidade do material. Os argilominerais de maior potencial expansivo são as montmorilonitas, vermiculitas e interestratificados. Os argilominerais illita e caulinita, embora pouco expansivos, podem provocar mudanças de volume quando apresentam partículas extremamente pequenas em sua composição (GRIM, 1968; MITCHELL; SOGA, 2005,1976; SNETHEN *et al.*, 1977; SOUZA, 2015).
- Textura dos grãos – Designa a forma, dimensão e disposição do agrupamento de minerais constituintes da rocha. Logo, a cristalinidade, a forma e dimensão das partículas, a ligação intermineral, a presença e a orientação dos vazios, além da presença de trincas e fissuras são características que podem modificar o comportamento de material potencialmente expansivos, uma vez que se relaciona a cristalização dos minerais. Assim, as argilas com estrutura floclada apresentam ação expansiva maior que as argilas com estrutura dispersa. A estrutura e textura dos grãos podem ser alterados mediante processo de compactação (LUNDGREN; SEED; WOODWARD, 1962; LE ROUX, 1976; JOHNSON E SNETHEN, 1978);
- Química da água dos poros – A variação volumétrica é diretamente proporcional a quantidade de água que ocupa os vazios do solo. A princípio, a variação de volume ocorre pela hidratação e adsorção de moléculas de água na superfície dos argilominerais, a fim de equilibrar as cargas elétricas. A intensidade dessa hidratação é influenciada pela quantidade, tipo e valência dos íons nos fluidos que preenchem os poros do solo. (MITCHELL; SOGA, 2005; SOUZA, 2015);

- Sucção – Trata-se de uma variável independente da tensão efetiva, referindo-se como pressão negativa em solos não saturados. Uma maior sucção pode condicionar uma maior expansão, pela relação dessa variável com o grau de saturação, tamanho e forma dos poros, tensão superficial e propriedades eletroquímicas das partículas e da água (AITCHISON, 1965; FREDLUND, 1977; LANGFELDER, 1965; MORGENSTERN, 1977; MILLER, 1992; OLSON, 1992; SNETHEN, 1980);
- Plasticidade – O índice de plasticidade é um indicativo do potencial de expansão do solo. Comumente, solos com comportamento plástico apresentam elevados limites de liquidez e significativo potencial de expansão e contração (NELSON; MILER, 1992);
- Peso específico seco – A expansão ou pressão de expansão do solo aumenta como consequência do aumento do peso específico seco com umidade constante. Isso se explica pelo fato de elevadas densidades gerarem menores espaçamentos entre partículas, propiciando o aparecimento de forças repulsivas e elevado potencial de expansão (CHEN, 1975; CONSOLI *et al.* 2020; SILVANI *et al.* 2021; SOUZA, 2015).
- Permeabilidade – É um fator dependente do teor de umidade inicial, densidade seca e arranjo estrutural dos grãos de solo. A ocorrência de fissuras, fendas ou trincas nos materiais, sobretudo em materiais de alta permeabilidade, proporciona um maior fluxo de água e, conseqüentemente, acelerado processo de expansão (WISE; HUDSON, 1971; SOUZA, 2015);
- Temperatura – Para temperaturas elevadas, a água da dupla camada tende a ser comprimida, enquanto, para baixas temperaturas, água tende a expandir na dupla camada. A temperatura influencia no deslocamento da umidade (líquido e vapor) como consequência dos gradientes térmicos no interior do solo. Essa umidade difusa é capaz de deslocar-se para regiões mais frias, por exemplo áreas localizadas abaixo de edificações e pavimentos, na tentativa de equilibrar a energia térmica do sistema (HAMILTON, 1969; SOUZA, 2015);

- **Clima e vegetação** – A variação da precipitação e evapotranspiração ao longo do ano é capaz de modificar o teor de umidade e, conseqüentemente, ocasionar a expansão ou contração do solo. No caso das precipitações, sua ocorrência favorece a recarga do lençol freático, influenciando na contribuição do teor de umidade nas camadas próximas. Com relação a vegetação, esta atua na absorção da umidade, provocando um diferencial no teor de umidade quando comparadas com áreas não cobertas (BUCKLEY, 1974; HOLLAND; LAWRENCE, 1980; MILLER, 1992);
  
- **Cimentação** – Refere-se à agregação das partículas pela ação do cimento mineral. A existência desse agente cimentante natural tem dois feitos: a formação de conexões nos pontos de contato, diminuindo os deslocamentos das partículas adjacentes; e o revestimento de partículas como forma de reduzir a capacidade de absorver água dos minerais. Quanto maior a resistência da cimentação entre as partículas, menor a ocorrência de expansão do solo (SIMÕES, 1987; SOUZA, 2015);
  
- **Efeitos diagenéticos** – Consistem nas alterações físicas e termo físicas de materiais como consequência de variações nas condições de carregamento. A consequência desses efeitos pode ser observada na ligação interpartículas, devido a recristalização dos contatos entre argilominerais sob altas solicitações de carregamento ou pela cimentação das partículas em consequência da atuação de agentes cimentantes. Em tese, a presença de ligações diagenéticas explica a diferença no comportamento de solos expansivos deformados e indeformados (SOUZA, 2015);
  
- **Carregamento e histórico de tensões** – A ação do carregamento sob o solo provoca mudança de volume para determinados valores de umidade e densidade seca. Com relação ao carregamento ao longo do tempo, quando um solo é pré-adensado, apresenta comportamento mais expansivo que o solo de mesmo índice de vazios, porém normalmente adensado (JONES; HOLTZ, 1959; MITCHELL; SOGA, 2005).

## **3.2 Estabilização dos Solos Expansivos**

A estabilização de solos consiste em técnicas que permitem melhorar as propriedades mecânicas, hidráulicas e de deformabilidade de um solo, de forma a tornar este material adequado a um emprego específico. As propriedades físicas e químicas do solo, assim como as solicitações do empreendimento são fatores decisivos na escolha do método de estabilização (SILVANI *et. al*, 2020). Consoli *et.al* (2016) afirma que, uma alternativa viável em muitos projetos geotécnicos, são as técnicas de estabilização de solos, no intuito de aumentar a massa específica por compactação, reduzir o adensamento através de sistemas de drenagem ou adicionar aditivos químicos ou biológicos para aprimorar o comportamento mecânico.

A estabilização do solo é uma das técnicas mais utilizadas para controlar o comportamento de solos expansivos em estruturas (PETRY; LITTLE, 2002; IKIZLER *et al.*, 2009). Anoop *et. al* (2017) afirma que, este processo é uma solução economicamente mais viável que alterações do projeto de fundação ou retirada da camada expansiva. A estabilização pode ser física, mecânica e química.

### **3.2.1 Estabilização física**

A estabilização física consiste em melhorar as propriedades a partir da alteração da compacidade do solo, modificando sua textura, ou alterando a granulometria do material, por meio de adições inertes, tornando o contato entre partículas mais efetivo. Dentre as técnicas de estabilização física do solo, têm-se, por exemplo, a mistura em quantidades compatíveis de frações pré-estabelecidas de solos, agregados ou resíduos industriais e adição de fibras (PINTO, 2006; SILVA, 2016).

### **3.2.2 Estabilização mecânica**

A estabilização mecânica consiste em alterar o estado do solo por meio de esforços mecânicos, compactação ou vibração, visando reduzir o índice de vazios. O intuito da compactação é aumentar a densidade do solo, propiciando um ganho de resistência. Para favorecer essa melhoria, solos com granulometria variada e pequena quantidade de material fino são preferíveis (CARVALHO, 2011). No entanto, no caso de solos expansivos a compactação deve ser avaliada com cautela, visto que quanto

maior a densidade do solo maior será a expansão (CONSOLI et. al.,2020; SILVANI et. al., 2021).

### **3.2.3 Estabilização Química**

A estabilização química é uma prática comumente utilizada para melhorar as propriedades naturais do solo (KUMAR; KUMAR, 2019). Refere-se às mudanças do solo ao inserir uma quantidade suficiente de aditivo químico, buscando melhorar a estabilidade volumétrica, resistência mecânica e as propriedades tensão-deformação. Essa adição ocasiona reações química do aditivo com os minerais do solo e com a água (SANTOS *et al.*, 1995; FRANÇA, 2003; SOLIZ, 2007; CHAO-LUNG *et al.*, 2011; DIAS, 2012; HUAT *et al.*, 2017).

Dentre os métodos de estabilização química de solos destaca-se o uso da cal e do cimento. Outros aditivos menos usuais como o pó de mármore, a cinza da casca do arroz, cinza volante, pó de brita, materiais fibrosos, cloretos (cálcio, potássio, ferro e sódio), entre outros veem sendo estudados no controle da expansibilidade do solo (ALI, 2014; AMMINEDU; CHAITANYA, 2017; FERREIRA *et al.*, 2017; KHAN; KHEMISSA, 2014; KESHAVAN *et al.*, 2017; MAHAMEDI, 2014; POURAKBAR *et al.*, 2015; SHAH, 2014).

#### **3.2.3.1 Estabilização com Cal**

A cal consiste em um produto químico resultante da calcinação de diversos tipos de rochas carbonáticas (aragonitas, cálcicas, dolomitas, etc) em temperaturas entre 900 °C e 1200 °C. E, trata-se de um dos mais antigos aglomerantes utilizados pelo homem, há registros do seu emprego em obras ao redor do globo como a via de Àpia, sul da Itália, construída em 312 a.C e em trechos da muralha da china construídos em 228 a.C (OLIVEIRA, 2010; SILVANI, 2017).

Denomina-se estabilização com cal o processo químico que busca melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos solos, pela inserção de uma quantidade suficiente do aditivo cal, possibilitando seu uso para fins de projeto (FRANÇA, 2003). Dimond e Kinter (1965) dizem que, várias reações químicas ocorrem quando a cal é misturada com solos de granulometria fina. Estas reações podem ser classificadas em dois estágios relativamente bem definidos: um processo rápido (minutos - dias), na qual há uma melhora na plasticidade do material, diminuição do potencial de expansão e

desenvolvimento de pouca resistência permanente; e um processo lento (semanas - anos) de desenvolvimento de resistência, com a formação de produtos cimentantes através das reações pozolânicas.

As reações solo/cal necessitam de água para que tenham início. O primeiro evento é a dissociação da molécula de hidróxido de cálcio segundo as seguintes reações:

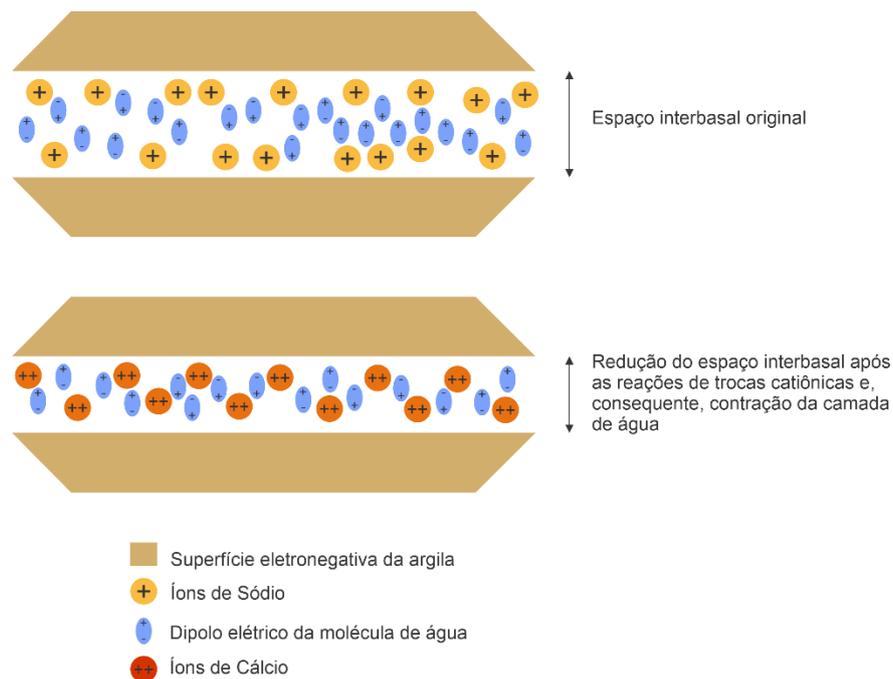


Após a dissolução da cal, o meio fica com uma grande quantidade  $\text{Ca}^{2+}$  e  $(\text{OH})^-$  livre, o que desencadeia o processo de troca catiônica. A troca catiônica é a permutação dos cátions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  existentes na superfície das partículas do solo, pelo  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  da cal.

Segundo Grim (1953), assumindo igual concentração, a ordem de adsorção preferencial de cátions comuns associados é dada pela seguinte série:  $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Ca}^{++} < \text{Mg}^{++}$ . Cátions da direita tendem a substituir cátions da esquerda e cátions monovalentes são geralmente substituídos por cátions multivalentes. A adsorção de cátions adicionais resulta da aglomeração das partículas de argilas (floculação). O efeito dessas duas reações pode ser observado inclusive visualmente, pois solos argilosos tornam-se mais friáveis e é capaz de diminuir o potencial de expansão do solo (HERRIN; MITCHELL, 1961; SILVANI et.al, 2021).

A Figura 6 ilustra o processo de floculação do solo, este processo ocorre rapidamente, porém somente melhora as características de trabalhabilidade e expansão do solo.

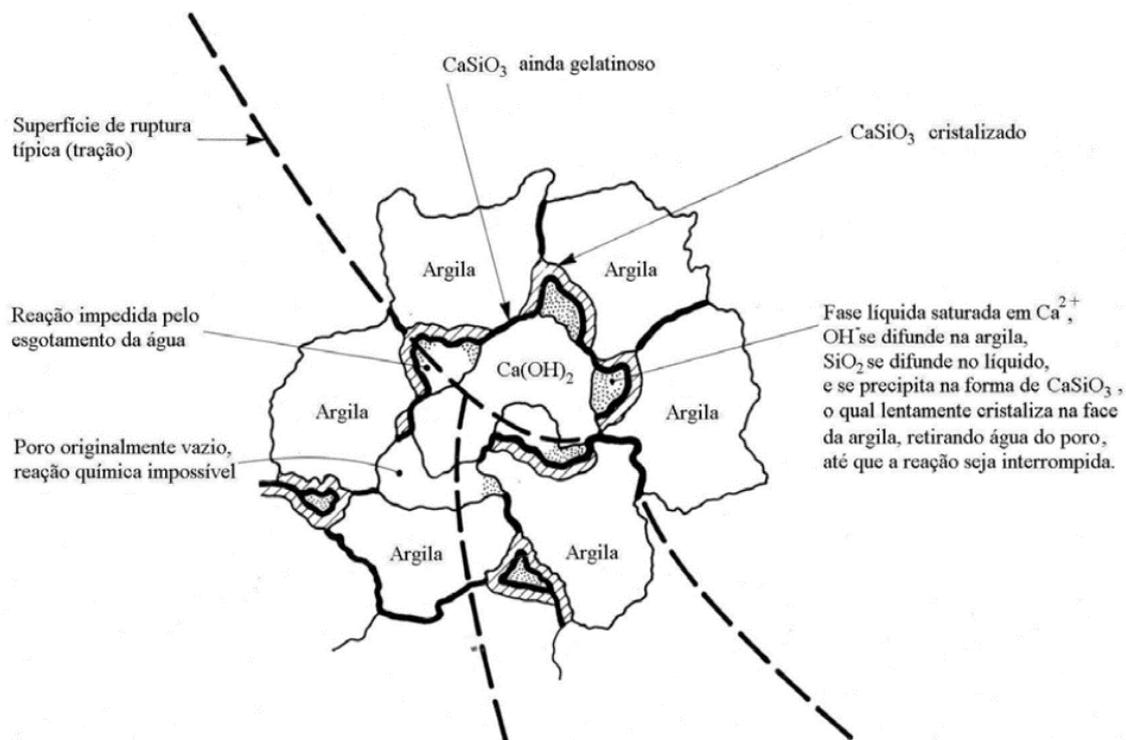
Figura 6: Mecanismo de flocculação do solo devido a troca catiônica



Fonte: Souza (2021)

As reações pozolânicas ocorrem no solo estabilizado com a cal originando substâncias cimentantes que aumentam a resistência mecânica do solo. A Figura 7 ilustra o mecanismo de reação pozolânica em um solo estabilizado com cal. Este mecanismo deve-se a reação da cal com água e sílica, ferro silicatos e alumínio silicatos amorfos presentes no solo. A cal eleva o pH do solo fazendo com que os silicatos sejam dissolvidos da argila. Este processo origina um gel de silicatos de cálcio hidratados que envolverá as partículas de argila e endurecerá no decorrer do tempo. Como resultado tem-se um solo menos permeável, com um índice de vazios menor e maior resistência mecânica (VILLALBA, 2015, SILVANI et al., 2022).

Figura 7: Mecanismo de desenvolvimento de reação pozolânica em solo estabilizado



Fonte: Adaptado Samaniego, (2015)

A aplicação da cal como estabilizante está intimamente ligada ao tipo do solo. Para desencadear a reação pozolânica faz-se necessário a presença de sílica ou ferro silicato ou alumínio silicato. Estes elementos são comuns em solos argilosos, fazendo com que a cal seja utilizada preferencialmente em solos finos ou em combinação com alguma fonte de pozolana amorfa como: cinza volante, cinza da casca de arroz, cinza do bagaço de cana-de-açúcar (SAMANIEGO, 2015).

Silvani *et al* (2021) avaliou a influência da relação porosidade/teor volumétrico de cal sobre a expansão de uma argila expansiva. A análise foi realizada através dos ensaios de expansão em uma dimensão, executados com amostras resultantes da mistura de solo com adições de 2, 4, 6 e 8% de cal e peso específico seco variando em 14 kN/m<sup>3</sup>, 15 kN/m<sup>3</sup> e 16 kN/m<sup>3</sup>. Os autores, constataram que o aumento do teor de cal e a diminuição do peso específico seco ocasionam uma diminuição da expansão unidirecional e que a relação porosidade/teor volumétrico de cal ajustada por um expoente pode ser usada na previsão da expansão deste material.

### 3.2.3.2 Estabilização com Cimento

O cimento é um dos agentes cimentantes mais utilizados para estabilizar solos de baixa resistência, por gerar aumento na durabilidade e na resistência mecânica

(FESTUGATO et al., 2018; CONSOLI et al., 2019b). 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. O processo de hidratação do cimento origina fortes ligações entre as partículas de solo dificultando o movimento entre as partículas. Desta forma o solo tratado adquire resistência ao cisalhamento e redução da plasticidade (ALMEIDA, 2016).

Gonçalves (2016) afirma que, o cimento pode ser usado no processo de estabilização de qualquer tipo de solo visto que, esse estabilizante é independente dos minerais presentes no solo. Entretanto, recomenda-se o uso do cimento com solos granulares pois estes demandam menor teor de cimento que os solos finos, os quais ainda apresentam dificuldade para homogeneizar a mistura solo-cimento (ALMEIDA, 2016). Para solos argilosos, a ação cimentante se dá principalmente por reações secundárias: 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 cimento também é utilizado para combater o inchamento de solos expansivos. 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 sob solo expansivo por um comprimento de 340 km (GONG, 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).

Consoli *et al.* (2020) avaliaram o comportamento expansivo de misturas bentonita-caulim estabilizadas com cimento através da variação de fatores (teor de bentonita, peso específico do solo, teor de cimento e teor de umidade). Os autores verificaram que, os fatores de influência predominante no controle da expansão foram o teor de bentonita e o peso específico do solo. Entretanto, também enfatizaram o fato de que, quanto maior a umidade inicial do solo e a interação entre o teor de cimento e a umidade, menor é a expansão do solo.

### **3.2.3.3 Estabilização de Solo com Materiais Alternativos**

Estabilização de solos com uso da cal e do cimento é uma prática comum e bastante utilizada em obras de engenharia. No entanto, o uso desses materiais provoca impactos ambientais e ocasionam elevados custos aos empreendimentos. Diante disso, os estabilizantes alternativos podem ser uma alternativa aos custos e impactos ambientais (AMMINEDU; CHAITANYA, 2017; HUAT et al., 2017; IZZATI NORAZAM et al., 2017; LATIFI et al., 2017; POURAKBAR et al., 2015). Aditivos alternativos como magnésio, hidróxido de sódio, resíduo de mármore e cinzas estão sendo amplamente estudados (AKINWUMI; BOOTH, 2015; ADHIKARY et al., 2016; HUAT et al., 2017; POURAKBAR et al.2015; SECO et al., 2017; SILVA, 2018; TENÓRIO,2019).

Chao-lung et al. (2011) estudaram o comportamento de um solo expansivo tratado com cinza da casca de arroz e resíduo de mármore nos teores de 5% a 20% e 0% a 30%, respectivamente com incrementos de 5%. Os autores verificaram que houve uma redução da expansão do solo à medida que o teor de resíduo de mármore aumentava, e que as misturas com 25% de pó de mármore reduziram a pressão de expansão de 120KPa para 0KPa. E ainda, os autores constataram que a proporção ideal de solo: cinza da casca de arroz: pó de mármore é de 70:10:20 para melhor efeito da estabilização e que, portanto, a cinza de casca de arroz mostra-se um resíduo com potencialidade para tratar solos expansivos.

Tenório (2019) avaliou a influência da relação porosidade/teor volumétrico de resíduo de mármore sobre a expansão e resistência mecânica de uma argila expansiva. A análise foi realizada através dos ensaios de expansão em uma dimensão e compressão triaxial consolidado não drenado executados com amostras resultantes da mistura de solo com adições de 30%, 40% e 50% de mármore e peso específico seco dos corpos de prova variando em 14 kN/m<sup>3</sup>, 15 kN/m<sup>3</sup> e 16 kN/m<sup>3</sup>. O autor, constatou que, o resíduo de mármore é capaz de conter a expansão do solo, contudo este comporta-se como um aditivo inerte, sem desencadear reação químicas e que maiores pesos específicos secos resultam em maiores expansões unidirecionais quando a umidade inicial é mantida constante.

Seco *et al.* (2017) estabilizou cinco diferentes tipos de solo com teores de 4% e 8% do produto comercial chamado PC-8m, que tem como princípio ativo o magnésio. Os solos estabilizados foram estudados por difração de Raio-X, expansão livre e compressão simples. Os autores constataram que o teor de 4% apresentou resistência mecânica de 3 MPa enquanto, o de 8% apresentou 5 MPa. O teor de 8% apresentou os melhores resultados de expansão livre, alcançando redução da expansão livre de 11,31% para 1,11%.

Huat *et al.* (2017) avaliaram o uso da olivina ( $Mg_2SiO_4$ ) como aditivo para estabilizar um solo de alta plasticidade. Os autores promoveram a ativação alcalina da olivina por meio, do uso da base hidróxido de sódio (NaOH) originando hidróxidos de magnésio ( $Mg(OH)_2$ ). O solo foi estabilizado com teores de 5%, 10%, 15% e 20% de olivina e foram analisadas por ensaios de compressão simples, microscopia eletrônica de varredura e espectrometria de Raio-X. Os autores constaram que, o solo puro apresentou resistência de 100 kPa, enquanto, para a mistura com 5% e 20% de olivina a resistência variou de 300 kPa a 800 kPa, respectivamente.

### **3.2.4 Cinza Do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBCA)**

A cana-de-açúcar é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao grande potencial na produção de etanol e seus respectivos subprodutos. A estimativa divulgada pela Conab (2022), indica que o Brasil deve produzir 596,1 milhões de toneladas na safra 2022/2023, um aumento de 1,9% em relação à safra 2021/2022. De acordo com o Instituto de Economia Agrícola – IEA (2022), o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e, na safra 2021/2022, foi responsável pela produção de 585,2 milhões de toneladas.

O complexo sucroenergético, açúcar e etanol, ocupa papel de destaque na pauta de exportação, e em 2020 o setor teve participação nacional de 9,9% (US\$9,9 bilhões), quarto setor mais representativo do país. Do valor total nacional exportado, o açúcar representou 87,8%, e foi o setor mais representativo no Estado de São Paulo, com participação de 37,1% (US\$6,4 bilhões). O Estado de São Paulo, que lidera a produção no país, respondeu por 54,1% da quantidade produzida na safra 2020/2021, e foi responsável pela produção de 48,4% de etanol (14,3 bilhões de litros) e 63,2% do açúcar (26,0 milhões de toneladas) (IEA,2022).

No estado da Paraíba, as condições climáticas ao longo do ciclo 2021/2022 foram determinantes para a produção da safra. As chuvas ficaram abaixo da média histórica em diversas regiões produtoras, impactando no potencial produtivo da cultura, bem como na sua qualidade. No geral, a produção total ficou em 6.081,3 mil toneladas de cana-de-açúcar, 2,6% inferior ao resultado da temporada 2021/2022, onde 1.064,7 mil toneladas foram destinadas à produção de açúcar e 5.016,6 mil toneladas a produção de etanol. E assim, elevando o estado da Paraíba, atualmente a terceira e quarta posição, respectivamente como maior produtor de etanol e açúcar no Nordeste, conforme o levantamento de dados da safra 2021/2022. (CONAB,2022).

Durante a moagem da cana-de-açúcar para a extração do caldo, há geração do bagaço. Esse subproduto é normalmente queimado como combustível em caldeiras que geram o vapor d'água utilizado na produção de açúcar e álcool e em processos de cogeração de energia (CORDEIRO et.al., 2009). Durante a extração do caldo de cana, 30% da cana-de-açúcar moída vira bagaço. Ainda, cerca de 95% de todo bagaço gerado no Brasil é queimado em caldeiras para geração de energia motriz e tem como resíduo a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) (FERNANDES, TASHIMA, *et al.*, 2015).

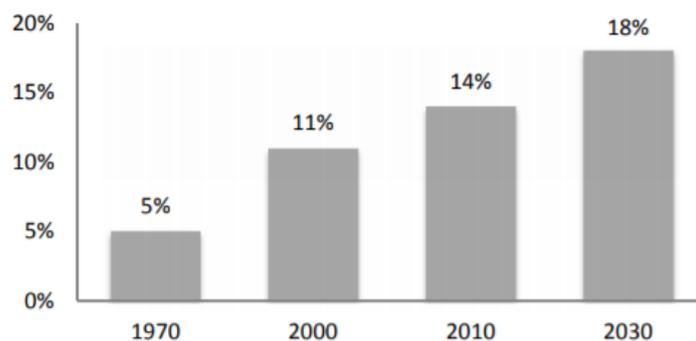
A CBCA proveniente da indústria sucroalcooleira, é, em geral, depositada em locais inadequados e necessita de atenção especial em relação a presença do potássio e de metais pesados utilizados no controle do amadurecimento da cana-de-açúcar, que podem contaminar o solo e o lençol freático (FERNANDES FILHO et al., 2012; CORDEIRO; ANDREÃO; TAVARES, 2019). Além disso, o estudo feito por Le Blond et al. (2014) mostra que a CBCA pode provocar problemas pulmonares nas populações próximas as áreas de depósito. Portanto, a destinação dos resíduos gerados pelo processo de produção dos derivados da cana-de-açúcar é um crescente problema. O descarte adequado de CBCA acarreta um custo adicional ao processo, logo encontrar aplicações agregando valor a este resíduo torna o processo produtivo mais sustentável. (CACURO E WALDMAN, 2015).

Tomando como base os dados divulgados pela Conab (2022), tem-se que, no estado da Paraíba para a produção dos insumos resultantes da cana-de-açúcar foi produzido 1824,39 mil toneladas de bagaço de cana-de-açúcar. Visto que, 21% do bagaço queimado é transformado em cinzas (*idem* para o item 5.1), é possível estimar que a produção de cinza chega em torno de 383,12 mil toneladas por ano. Com o emprego destas cinzas como estabilizante do solo seria possível construir 458 km de rodovia utilizando o resíduo em base de pavimentação (nas dimensões 0,20m x 7m x 1000m), considerando o teor de 30% de cinza em peso. A nível nacional, a cinza possibilitaria em torno de 43050 km de rodovias, pois o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e precisa dar correta destinação aos resíduos desse importante produção.

Por fim, pode-se concluir que, a cana-de-açúcar apresenta-se como um produto de alto poder de desenvolvimento socioeconômico para o país através de notório crescimento no cenário energético do país, conforme, mostra a Figura 8. Santos (2021) afirma que, a produção de cana-de-açúcar é de extrema importância na economia

brasileira, pois, além de produzir açúcar e cachaça, ela é a primeira fonte de energia renovável do país, responsável por 17,5% da matriz nacional atualmente, através do etanol (Figura 8).

Figura 8: Contribuição da cana-de-açúcar na matriz energética do Brasil ao longo dos anos



Fonte: Fernandes Filho et al. (2012)

### 3.2.5 Propriedades da Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar

No geral, cinza do bagaço-da-cana-de-açúcar apresentam uma concentração elevada de sílica, normalmente em quantidade acima de 60% em massa, além da presença de alumínio, ferro, óxidos alcalinos e alcalino-terrosos em menores quantidades (DRUMOND, 2019; SOUZA, 2011; CORDEIRO et.al., 2009; CORDEIRO et.al., 2008). Em função de sua composição química, este material apresenta-se potencialmente como aditivo mineral para pastas, argamassas e concretos (PAYA *et al.*, 2002), pois, quando adicionadas ao cimento, combinam-se e/ou são ativadas pelo hidróxido de cálcio liberado nas reações de hidratação do clínquer, originando compostos com propriedades ligantes.

A queima do bagaço de cana-de-açúcar, assim como a produção do cimento Portland pela calcinação da rocha calcária, também produz substancial liberação de CO<sub>2</sub>, entretanto esse composto liberado no processo de queima do bagaço de cana-de-açúcar foi absorvido do ar pela cana-de-açúcar, através da fotossíntese, durante seu ciclo de vida (CORDEIRO et. al, 2009).

Um ponto interessante no processo de produção das cinzas se refere a temperatura de queima do bagaço, pois, o surgimento das distintas fases da sílica (amorfas ou cristalinas) dependem das variações das temperaturas de queima. A presença de material cristalino nas cinzas é devida às altas temperaturas de combustão nas caldeiras, podendo influenciar tanto na cor, na forma e na quantidade da sílica. (OLIVEIRA et. al., 2017). A reatividade da cinza do bagaço da cana-de-açúcar depende

diretamente das condições de queima do bagaço. Reatividade máxima pode ser alcançada pela queima do bagaço a cerca de 500°C. (ALMEIDA *et al.*, 2015)

A Tabela 2 apresenta, em forma de análise comparativa o teor de sílica, alumina, óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO) presente em algumas cinzas estudadas por diversos autores. Os resultados apresentam um alto teor de sílica e teores consideráveis de alumina e CaO, para todas as CBCA analisadas.

Tabela 2: Análise Comparativa a partir da Teor dos elementos encontrados pelos autores dos estudos com CBCA

<b>Autores</b>	<b>Teor de Sílica (%)</b>	<b>Teor de Alumina (%)</b>	<b>Teor de CaO (%)</b>	<b>Teor de MgO (%)</b>
Cordeiro et al. (2012)	78,30	8,55	3,61	0,00
Chusilp, Jaturapitakkul, Kiattikomol (2009)	64,88	6,40	10,69	1,55
Mello et al. (2020), Souza et al. (2021)	75,58	2,50	1,79	2,82
Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009a e b)	60,96	0,09	5,97	8,65
Cordeiro, Andreão e Tavares (2019)	63,30	8,10	4,60	3,80
Cordeiro, Barroso, Toledo Filho (2017)	69,60	15,70	1,30	0,00
Fernandes Filho et al. (2012)	75,54	6,10	8,87	1,88
Santos (2021)	60,65	5,76	1,40	1,97
Cordeiro e Kurtis (2017)	80,80	5,10	3,10	0,00

Para diversos autores, dentre eles: (MARTINERA et al., 1998; SINGH; SINGH; RAI, 2000; GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2007; CORDEIRO *et al.*, 2009), a CBCA pode ser usada como um material pozolânico devido ao alto teor de sílica na sua composição. Segundo Farias (2005) a adição de cinza ao solo aumenta o valor da capacidade de suporte do solo, diminui a sua expansividade, reduz a massa específica aparente seca e deixa a mistura pouco sensível à umidade, ou seja, ele reage diferente com a umidade. Com isso, é possível averiguar que as cinzas provocam uma melhoria nas características geotécnicas de solos problemáticos, como o solo expansivo.

De maneira resumida, a Tabela 3 apresenta alguns dos autores e os respectivos estudos relacionados ao comportamento, características e propriedades da CBCA e seus resultados, que se apresentam como de extrema relevância acerca do assunto.

Tabela 3: Autores e resultados dos estudos realizados em CBCA

<b>Autores</b>	<b>Estudos sobre a CBCA</b>	<b>Resultados</b>
Martirena et al. (1998), Singh, Singh e Rai (2000), Ganesa, Rjagopal, Thangavel (2007), Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009a)	Caracterização da CBCA como pozolana em materiais cimentícios	CBCA apresenta-se como matéria-prima com potencial para produção de pozolana, e desenvolvimento de altas resistências com menores tempos de cura
Cordeiro et al. (2009); Cordeiro e Kurtis (2017); Fernandes Filho et al., (2014)	Moagem	CBCA com grãos mais finos e maior superfície específica são mais adequados para atuar como material pozolânico
Cordeiro, Andreão e Tavares (2019); Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009b)	Efeito da temperatura de calcinação na atividade pozolânica	CBCA calcinadas a temperaturas acima de 600 °C são classificadas como cinza pozolânica de acordo com a NBR 12653/92
Cordeiro, Barroso, Toledo Filho (2017)	Controle da recalcação para melhoramento das propriedades da CBCA	A recalcação é eficaz para aumentar a reatividade da CBCA e diminuir a perda por combustão
Fernandes Filho et al. (2012)	Solubilidade da sílica da CBCA em soluções alcalinas	A solubilidade depende da quantidade de sílica cristalina na CBCA. Quanto mais cristais, mais solúvel é a cinza

### 3.2.6 Aplicação da Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar como pozolana

Pozolana é o material inorgânico, natural ou artificial, silicoso ou alumino-silicoso, que pode apresentar propriedades aglomerantes quando finamente moído e em presença de água e hidróxido de cálcio. O emprego de pozolana como material cimentício remota à antiguidade. Registros históricos indicam que, há cerca de 2000 anos, os romanos já utilizavam em suas construções uma cinza de origem vulcânica proveniente da localidade de Pozzuoli (antiga Puteoli do Império Romano), Itália, o que conferiu a denominação “pozolana” ao material (CORDEIRO et. al., 2009).

Para Cordeiro (2009) a aplicação das pozolanas como materiais cimentante, deve-se à presença de fases ativas em sua constituição química. A sílica amorfa é a principal fase ativa das pozolanas e, em contato com água e à temperatura ambiente, solubiliza em meio alcalino e reage com íons  $\text{Ca}^{+2}$  para formar silicatos de cálcio hidratados (C-S-H, de acordo com notação utilizada na química do cimento: C-CaO; S-SiO<sub>2</sub>; H-H<sub>2</sub>O), conforme ilustra a Equação 6. O C-S-H formado nestas reações pozolânicas é similar ao C-S-H produzido nas reações de hidratação do cimento Portland.



A aplicação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como pozolana foi estudada por diversos autores, dentre eles: Andreão e Tavares (2019); Bruschi et. al., (2021); Cordeiro e Kurtis (2017); Cordeiro et. al., (2009); Drumond (2019); Fernandes Filho et. al., (2014); Santos (2021) e etc. Os autores, em suas respectivas pesquisas, buscaram analisar o mecanismo de atuação deste resíduo e suas características pertinentes quando usado em substituição de cimento ou agregado miúdo em concretos ou na estabilização de rejeitos de mineração.

A fim de aprofundar os estudos da CBCA, alguns autores estudaram a possibilidade de aplicação dessa cinza em misturas de concreto e argamassas. A Tabela 4 apresenta os estudos realizados pelos autores e os respectivos resultados.

Tabela 4: Estudos e resultados da aplicação de CBCA em concretos e argamassas

<b>Autores</b>	<b>Estudos sobre a CBCA em concretos, argamassas e rejeitos</b>	<b>Resultados</b>
Cordeiro et al. (2008), Cordeiro et al. (2012)	Atividade pozolânica da CBCA em concretos e argamassas de cimento Portland	CBCA apresenta propriedades físico-químicas e resistência apropriadas para concretos e argamassas, dependendo da sua granulometria.
Chusilp, Jaturapitakkul, Kiattikomol (2009), Cordeiro et al. (2012)	Uso da CBCA como material pozolânico no concreto	CBCA aumenta a resistência à compressão simples e diminui a permeabilidade do concreto para idades de 28 e 90 dias.
Mello et al. (2020)	Comportamento de um concreto autoadensável em altas temperaturas com CBCA substituindo o cimento	Uso da CBCA reduz a deterioração do concreto em altas temperaturas.
Sales e Lima (2010)	Substituição da areia pela CBCA em concretos	CBCA pode ser usada como substituto parcial da areia em concretos com resistência de projeto até 30 Mpa.
Jiménez-Quero et al. (2013)	Influência da CBCA no comportamento reológico de pastas de cimento e argamassas	CBCA em argamassas aumenta a resistência e a viscosidade, o que gera maior consumo de superplastificantes em relação às argamassas simples.
Souza et al. (2021)	Uso da CBCA para produção de agregados leves	É possível executar agregados leves com um alto teor de CBCA (90%).

Trabalhos utilizando CBCA em aplicações geotécnicas não apresentam números expressivos. Santos *et.al.*, (2022) estudaram a viabilidade de se utilizar um cimento álcali-ativado com hidróxido de sódio a base de cal de carbureto e cinza do bagaço de cana-de-açúcar para estabilização de um rejeito de mineração de ouro, por meio de ensaios de resistência, rigidez, durabilidade e lixiviação. Os resultados evidenciaram que o ligante álcali-ativado é uma satisfatória alternativa para estabilização do rejeito de mineração de ouro. Além disso, o índice porosidade/teor volumétrico de aglomerante mostrou-se adequado como metodologia de dosagem para previsão do comportamento mecânico do rejeito álcali-ativado.

Bruschi *et. al* (2021) estudaram a viabilidade técnica do processo de álcali-ativação na estabilização do rejeito de mineração de bauxita, que é resultante do processo de obtenção do alumínio, por meio de ensaios de resistência, rigidez e durabilidade. Os resultados demonstraram que o ligante álcali-ativado se apresenta como uma opção adequada para o melhoramento do comportamento mecânico do rejeito de mineração de bauxita. Além disso, o índice porosidade/teor volumétrico de ligante foi um parâmetro adequado para a avaliação da estabilização dos materiais, onde a redução da porosidade e aumento do teor de ligante levaram à uma melhora no comportamento mecânico das misturas.

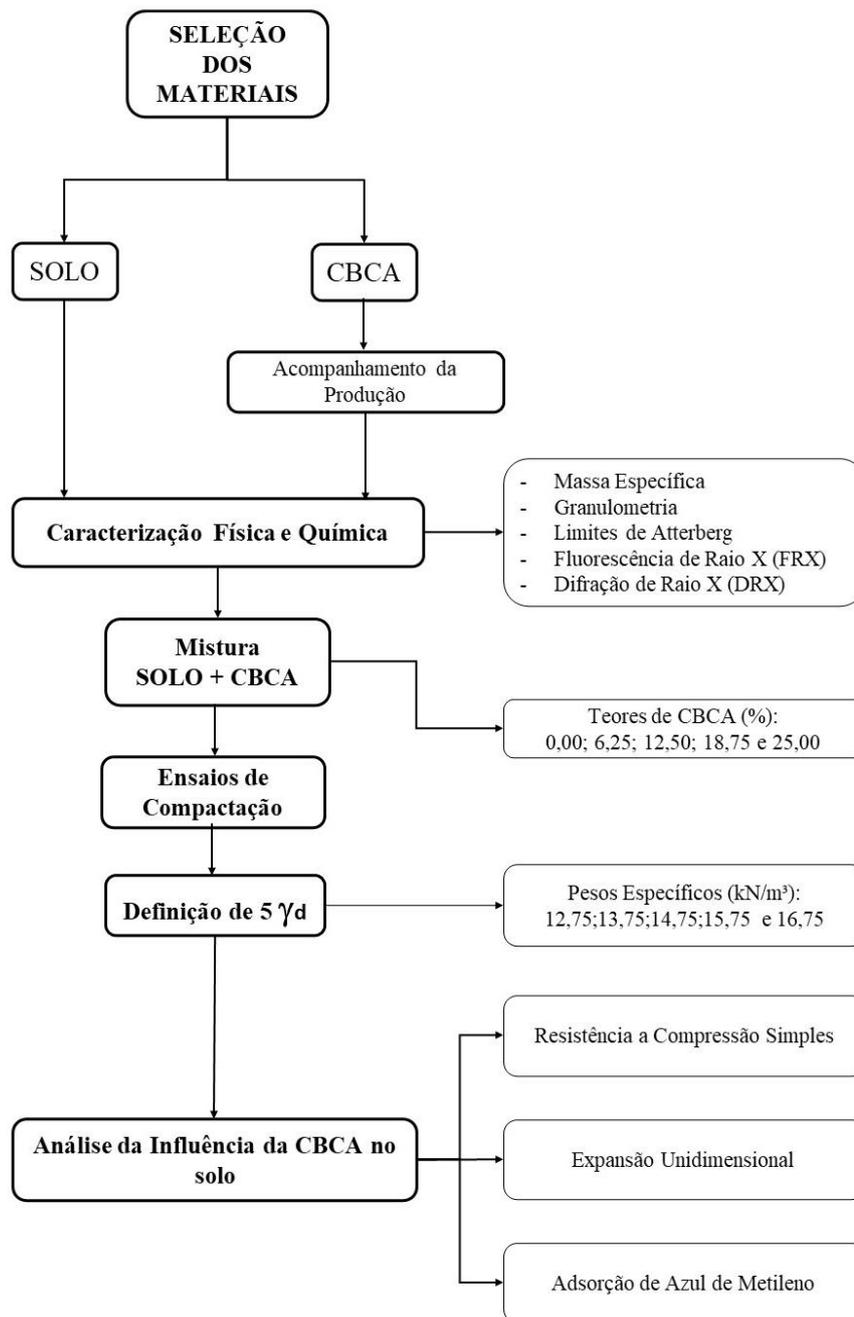
Dang *et. al* (2021) avaliaram o uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na estabilização de solos expansivos. Os autores analisaram os efeitos em separado da CBCA, da cal e em seguida, da combinação de CBCA+ cal. Os resultados revelaram que teor de adição de 25% de CBCA foi capaz de diminuir a expansão livre de 10% para 0%, aumentar o CBR em 53% e a resistência a compressão simples não aturada em 73%. Entretanto os autores consideram o melhor desempenho foi a combinação de CBCA+cal, pois essa mistura promoveu uma melhora de 815% na resistência a compressão simples não submersa, aumento de 9,2 vezes no CBR, redução de 100% da expansão e diminuição de 83% da compressibilidade.

#### **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados nessa pesquisa. Para desenvolvimento deste programa de investigação geotécnica utilizou-se: solo expansivo (mistura de bentonita cálcica ativada + areia), cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) e água destilada. As metodologias empregadas serão apresentadas nesta seção, bem como as normas e métodos utilizados na condução dos ensaios de caracterização química, física e mineralógica dos materiais utilizados, e, sobretudo a metodologia de controle e análise do comportamento de um solo expansivo tratado com CBCA.

Sucintamente pode-se apresentar a metodologia deste trabalho como a estabilização de um solo expansivo com adições de CBCA. O solo estabilizado foi analisado em cinco diferentes pesos específicos secos para cinco diferentes teores de CBCA, através dos ensaios de expansão unidimensional, onde os corpos de provas ensaiadas foram compactados com base na energia de Proctor normal e na umidade ótima das misturas. A sequência das atividades utilizadas na pesquisa é apresentada no fluxograma da Figura 9.

Figura 9: Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autoria Própria (2022)

## 4.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para desenvolvimento desta pesquisa foram: água destilada, cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) e solo expansivo.

### 4.1.1 Água

A água é um reagente utilizado na maioria dos testes laboratoriais e, por isso, deve seguir um padrão de controle de qualidade rigoroso. O fornecimento urbano de água apresenta moléculas orgânicas, íons inorgânicos, partículas, coloides, gases, bactérias e seus produtos, que podem alterar os resultados dos exames laboratoriais e causar eventuais erros e falhas mecânicas em equipamentos analíticos (MENDES *et al.* 2011). Desse modo, foi escolhido utilizar na realização da presente pesquisa a água destilada.

### 4.1.2 Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBCA)

A cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBCA), apresentada na Figura 10, utilizada neste estudo foi coletado em uma indústria sucroalcooleira de pequeno porte, localizada na Fazenda Floresta, BR 230, KM 134, zona rural, distrito de Galante, Município de Campina Grande-PB. A indústria utiliza o bagaço da cana-de-açúcar, resíduo da extração de melação, como combustível para a caldeira, gerando um subresíduo desse processo, que é a CBCA.

Figura 10: Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBCA)



Fonte: Autoria Própria

### 4.1.3 Solo

O solo utilizado nesta pesquisa foi o solo expansivo resultante da mistura de bentonita cálcica ativada e areia na proporção 25/75 (Figura 11) com a finalidade de eliminar a variabilidade de dados dos solos expansivos coletados in loco (BEZERRA, 2019; CONSTATINO, 2018; PAIVA et. al, 2016; TENÓRIO, 2019). A areia utilizada na composição do solo tem natureza quartzosa e origem fluvial sendo passada na peneira #4,8 mm, de modo a eliminar sujeiras e eventuais materiais orgânicos. A bentonita utilizada é do tipo bentonita cálcica ativada, da marca Bentonisa, produzida na cidade de Boa Vista-PB, seguindo a norma NBR ISO 9001 (2015).

Figura 11: Solo



Fonte: Autorial Própria (2022)

Para definição da proporção de bentonita/areia a ser utilizada, ensaios de expansão unidimensional foram realizados inicialmente para diferentes misturas de bentonita/areia, e assim, a partir destes resultados pode-se adotar a mistura de 25/75 de bentonita e areia como sendo o solo puro desta pesquisa, por essa apresentar expansões da ordem de 20%. (BEZERRA, 2019; LIU et. al, 2019; NALBANTOğLU, 2004)

De acordo com Braz (2002) as bentonitas são argilominerais do grupo da montmorilonita, podendo ocorrer em duas composições básicas: sódica, que possui a capacidade de expandir de 15 a 20 vezes seu volume original quando em contato com a água, e cálcica, que não se expande naturalmente. Como a bentonita que ocorre no Brasil é cálcica, ela passa por um processo denominado de ativação, que consiste na troca de cátions de cálcio por sódio, mediante a adição de carbonato de sódio (barrilha).

As bentonitas, em geral, caracterizam-se por apresentar: (1) partículas muito finas; (2) elevada carga superficial; (3) alta capacidade de troca catiônica; (4) elevada área superficial e (5) inchamento (afastamento das camadas) quando em presença de água. Nessas argilas, as superfícies das camadas estão disponíveis para hidratação e troca de cátions (BALTAR *et al*, 2003).

Após a escolha da composição do solo, objeto de estudo desta pesquisa este foi submetido a ensaios de caracterização física e química, conforme, explanado no fluxograma da pesquisa (Figura 9).

## 4.2 MÉTODOS

A metodologia empregada neste trabalho, de maneira sucinta foi dividida em oito etapas, sendo estas:

- Monitoramento, coleta e requeima da cinza do bagaço da cana-de-açúcar;
- Caracterização da CBCA e do solo;
- Planejamento experimental;
- Determinação das Curvas Proctor das misturas solo + CBCA
- Preparação das amostras;
- Moldagem e cura dos corpos de prova;
- Realização dos ensaios respostas; e,
- Processamento dos dados.

### 4.2.1. Monitoramento, coleta e requeima da CBCA

Antes da coleta da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na indústria, foi realizado um acompanhamento do processo de aquecimento e queima do bagaço da cana-de-açúcar na caldeira, com a finalidade de identificar a qual temperatura a CBCA foi produzida. Esta indústria utiliza o bagaço de cana-de-açúcar, resíduo da extração de melaço, como material combustível para sua caldeira, do tipo Flamotubular de categoria B (Figura 12), com capacidade nominal de 800Kg vapor/hora. O calor proveniente da caldeira é utilizado no processo de destilação mosto de cana-de-açúcar, visando a produção de etanol e cachaça. Destaca-se que o modelo de caldeira utilizado nesta indústria é comum nas fabricas do nordeste brasileiro.

Figura 12: Caldeira (a) Vista Frontal e (b) Vista Lateral



Fonte: Autoria Própria (2022)

Conforme, pode-se observar na Figura 13, a temperatura durante a queima foi medida com um termômetro a laser, a cada 5 minutos, durante um intervalo de tempo de 0 a 160 minutos. Registrou-se a temperatura no interior da caldeira (temperatura interna) (Figura 3(a)) e a temperatura externa com o laser centralizado no meio da porta da caldeira (temperatura externa) (Figura 13 (a) e (b)).

Figura 13: Medição da temperatura a) interna e b) externa



Fonte: Autoria Própria (2022)

A massa de CBCA foi obtida através da pesagem do resíduo coletado no interior da caldeira (Figura 14) após o resfriamento da caldeira.

Figura 14: Cinza do bagaço da cana de açúcar no fundo da caldeira



Fonte: Aatoria Própria (2022)

Em seguida, o material foi coletado, de uma única vez, visando minimizar os efeitos das variáveis temporais, que porventura possam interferir na qualidade do material, e em seguida, transportado para o Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), onde foi devidamente, armazenado e usado no desenvolvimento da presente pesquisa.

A partir dos resultados apresentados no item 5.1 (Figura 20), observou-se uma não uniformidade das temperaturas de queima do bagaço da cana-de-açúcar e, por consequente, na produção da CBCA. A partir disso, optou-se por realizar uma nova queima do material em forno de alta capacidade (mufla), objetivando uniformizar a temperatura de produção da CBCA.

A partir da análise de estudos de autores como: Almeida *et.al* (2015); Cordeiro *et.al* (2008); Cordeiro *et.al* (2009); Cordeiro *et.al* (2017); Cordeiro *et.al* (2019); Chusilp *et.al* (2009) e Mello *et.al* (2020); adotou-se uma temperatura de 700°C durante um tempo de 90 minutos, como sendo a ideal para requeimar a cinza de forma a manter a homogeneidade do material, bem como preservar as suas propriedades químicas.

#### **4.2.2. Caracterização da CBCA e do Solo**

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar e o solo expansivo (mistura de bentonita cálcica ativada + areia) utilizados nessa pesquisa foram caracterizados através dos ensaios citados na Tabela 5.

Tabela 5: Ensaio de caracterização dos Materiais

<b>Ensaio</b>	<b>Método</b>
Análise granulométrica	ABNT NBR 7181
Limites de Atterberg	ABNT NBR 6459 ABNT NBR 7180
Fluorescência de Raios X	ABNT NBR 16137
Difração de Raios X	-
Ensaio de Proctor	ABNT NBR 7182
Massa específica dos grãos do solo	ABNT NBR 6508
Adsorção de Azul de Metileno	ASTM C837/2009

Para o ensaio de massa específica real dos grãos do solo expansivo, fez-se necessário seguir as recomendações de Lukiantchuki (2007) e Morandini (2014): utilização de 10 a 15g de solo e não as 50g recomendadas por ABNT NBR 6458/2016 e imersão em água destilada por um período de 5 dias, visto que as 12 horas recomendadas por norma não são suficientes para hidratar completamente o material.

### 4.2.3 Planejamento Experimental

A Tabela 6 apresenta as variáveis controláveis do programa experimental. O teor máximo de CBCA foi predefinido com base em pesquisas da literatura com finalidade similar (DALLA ROSA, 2009; CONSOLI *et. al*, 2012; LIU *et.al*, 2019; LACERDA, 2019; SILVA, 2018). E, em seguida, a partir da experiência de trabalhabilidade do material em laboratório, por meio, do ensaio mecânico de compactação da mistura com solo expansivo para o teor máximo de CBCA, definiu-se os 5 pontos de análise igualmente equidistantes (0,00%; 6,25%; 12,50%; 18,75% e 25,00%) de CBCA a ser usado na pesquisa.

Em seguida, os pesos específicos secos foram adotados com base na curva de compactação do ensaio de Proctor com energia normal, mostrada no item 5.4, Figura 30 e Tabela 15. Optou-se por valores abaixo do peso específico máximo e na umidade ótima do solo puro, visando a exequibilidade dos corpos de prova com os diferentes teores de CBCA.

Para os ensaios de expansão unidimensional, os pontos avaliados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Variáveis controláveis

Variáveis	Unidade	Níveis
Teor de CBCA	%	0,00; 6,25;12,5; 18,75 e 25,00
Peso específico seco aparente	kN/m <sup>3</sup>	5 níveis com base nas curvas Proctor Normal das misturas

A Tabela 7 apresenta as variáveis fixadas neste estudo. A umidade foi definida com base na curva de compactação.

Tabela 7: Variáveis fixadas

Variáveis	Unidade	Níveis
Tipo de Aditivo	-	Cinza do Bagaço de cana-de-açúcar
Tipo de solo	-	Solo Expansivo
Tempo de cura para ensaio de expansão	dias	0
Umidade	%	Baseada na curva Proctor Normal.

A Tabela 8 apresenta as variáveis de ruído e medidas mitigadoras empregadas. As variáveis de ruído não são controláveis. Visando minimizar os efeitos destas foram aplicadas medidas mitigadoras.

Tabela 8: Variáveis de ruído

Variável	Medida de Controle
Equipamento e operador	Utilização de único equipamento com único operador
Homogeneidade do resíduo (CBCA)	Uso de amostra única, colhida de uma única vez
Homogeneidade da umidade.	A areia e a bentonita eram misturadas com no mínimo 48 horas antes da moldagem dos corpos de provas, mistura realizada por um único operador.
Homogeneidade do solo	Mistura de Bentonita cálcica ativada com areia quartzosa passante na peneira #4.8mm.

As variáveis resposta obtidas com os ensaios são: Expansão em uma dimensão com sobrecarga de 10 kPa, onde foi avaliado o percentual de expansão de acordo com o teor de aditivo adicionado ao solo e a densidade de moldagem, e, a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) onde analisou a capacidade de troca catiônica do solo expansivo à medida que se adiciona teores de CBCA. Estas variáveis são função das variáveis fixadas e controláveis. Por meio do planejamento fatorial foi possível verificar a influência das variáveis controláveis na variável resposta.

E por fim, visando avaliar a capacidade da CBCA desenvolver reações pozolânicas, haja vista, o percentual considerável de óxido de magnésio e cálcio encontrados na composição química da CBCA fornecidos pelos ensaios de DRX e FRX (apresentados no item 5.2.2), decidiu-se por realizar ensaios de resistência a compressão simples normatizado pela ABNT NBR 12025 (2012). Os corpos de prova usados no

ensaio de resistência a compressão simples foram moldados no peso específico médio de (14,75kN/m<sup>3</sup>) com adição dos 5 teores de CBCA utilizados (0,00; 6,25; 12,50; 18,75 e 25,00) %, submetidos a 90 dias de cura.

#### **4.2.4 Determinação das Curvas Proctor das misturas solo + CBCA**

Após a caracterização em separado dos materiais: solo expansivo (mistura de bentonita cálcica ativada + areia) e CBCA, a definição do planejamento experimental prosseguiu-se com a avaliação da influência da CBCA sobre o solo puro caracterizado. E assim, inicialmente, realizou-se os ensaios de compactação na energia do proctor normal, de modo, a definir os pesos específicos máximo e a umidade ótima de cada uma das misturas analisadas.

Para a realização dos ensaios de compactação, deixou-se o solo puro (mistura de bentonita cálcica ativada + areia) e a mistura de solo puro/CBCA hidratando por 48 horas, com a finalidade de uma total homogeneidade do material, haja vista a presença majoritária do argilomineral montmorilonita no solo expansivo utilizado. A nota 5.1.3<sup>a</sup> da NBR 7182/2020 recomenda um mínimo tempo mínimo de hidratação de 24 horas e esse procedimento também utilizado por Consoli *et al* (2020) na realização do seu estudo de expansão de solo rico em montmorilonita. Destaca-se que neste estudo adotou-se 48 horas visando minimizar a dispersão dos resultados da umidade.

#### **4.2.5 Preparação das amostras**

A preparação das amostras dos materiais da presente pesquisa (secagem, destorroamento e peneiramento) para os ensaios de caracterização e para moldagem dos corpos de prova foi realizada conforme preconizado pela (ABNT, 2016a).

#### **4.2.6 Moldagem e Cura dos Corpos de Provas**

Para o desenvolvimento deste trabalho foram moldados dois tipos de corpos de prova, denominados por tipo A e B (Figura 15). Os corpos de prova do tipo A possuíam formato cilíndrico, altura de 20mm e diâmetro de 50mm, e foram empregados nos ensaios de expansão em uma dimensão. Os corpos de prova do tipo B possuíam altura de 100mm e diâmetro de 50 mm e foram empregados nos ensaios de resistência a compressão simples. Para os corpos de provas moldados com a adição da CBCA, inicialmente foram misturados os materiais secos (SOLO + CBCA) até total

destorroamento e homogeneização. Em seguida, adicionou-se água até a formação de uma mistura completamente homogênea.

Figura 15: Corpos de prova - (a) Tipo A e (b) Tipo B

(a)



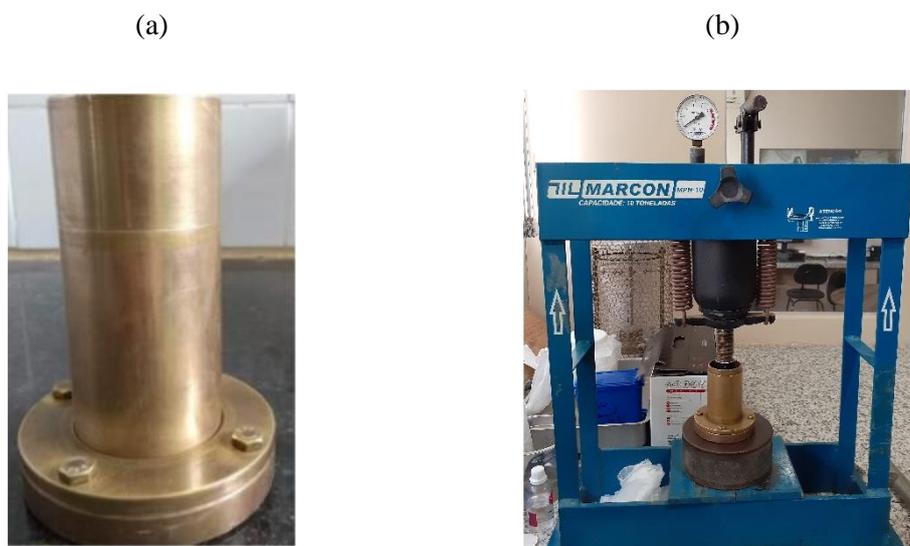
(b)



Fonte: Autoria Própria (2022)

Os dois tipos de corpos de prova eram compactados estaticamente por meio do molde (Figura 16 (a)), e da prensa (Figura 16 (b)). O tipo A foi compactado em apenas 1 camada, devido a pequena altura dos corpos de provas. Já os corpos de prova do tipo B, foram compactados em 3 camadas com escarificação entre as camadas. O procedimento de compactação consistia em montar o molde, inserir papel filtro no fundo do molde, inserir o solo no molde e por fim compactá-lo na prensa.

Figura 16: (a) Molde de bronze (b) Prensa para moldagem



Fonte: Autoria Própria (2022)

Após a moldagem os corpos de prova que demandavam cura eram envelopados em filme plástico, etiquetados, acondicionados em um saco plástico e guardados em caixa térmica. Os que não demandavam cura eram ensaiados no mesmo dia da moldagem.

#### 4.2.7 Ensaios Respostas

Os ensaios utilizados para mensurar as variáveis resposta são apresentados na Tabela 9. Estes seguiram as normas da ABNT e ASTM.

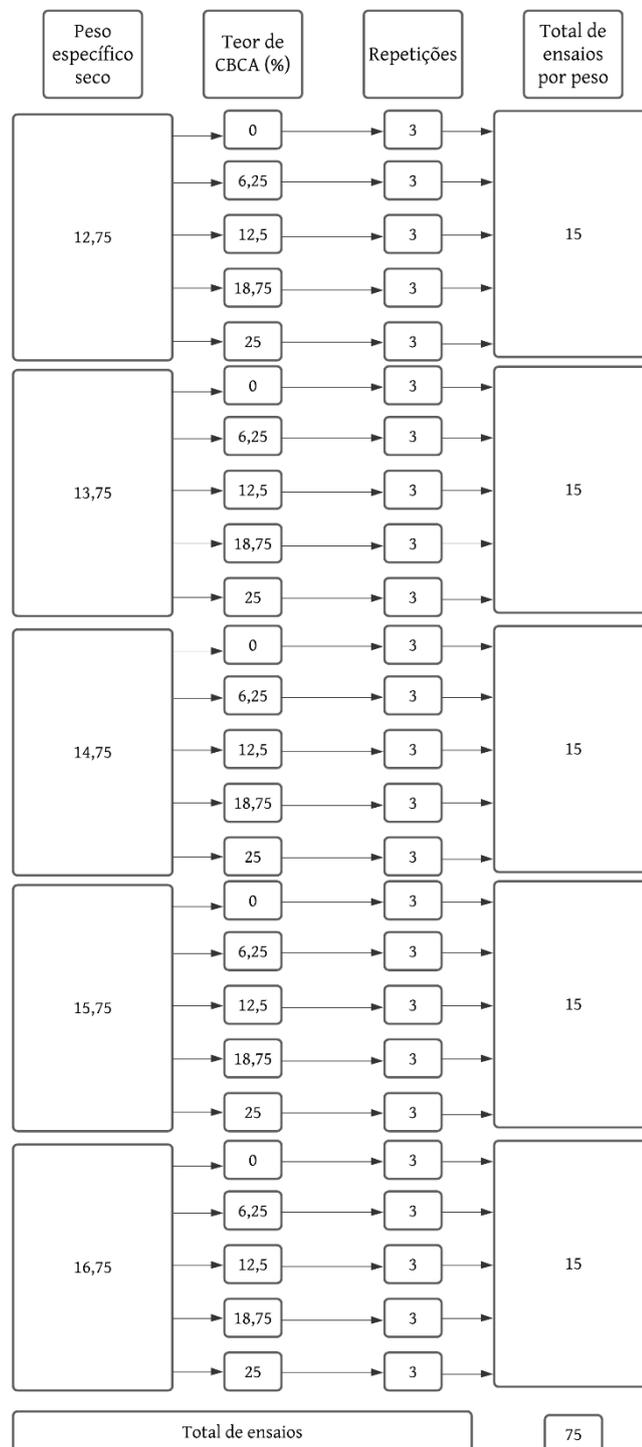
Tabela 9: Ensaios de resistência mecânica e expansão

Ensaio	Método
Expansão em uma dimensão	ASTM D4546/1996
Compressão Simples	ABNT NBR 12025/2012
Adsorção de azul de metileno	ASTM C837/2009
Potencial Hidrogeniônico (pH)	Metodologia proposta por Donagema et al., (2011) no Manual de Métodos de Análise de Solos da Embrapa

Os ensaios foram realizados nos Laboratórios de Engenharia de Pavimentos (LEP) e Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Ensaios Especiais em Solos (LMPSE), ambos da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil (UAEC) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O programa experimental dos ensaios de expansão em uma dimensão e, de compressão simples são apresentados,

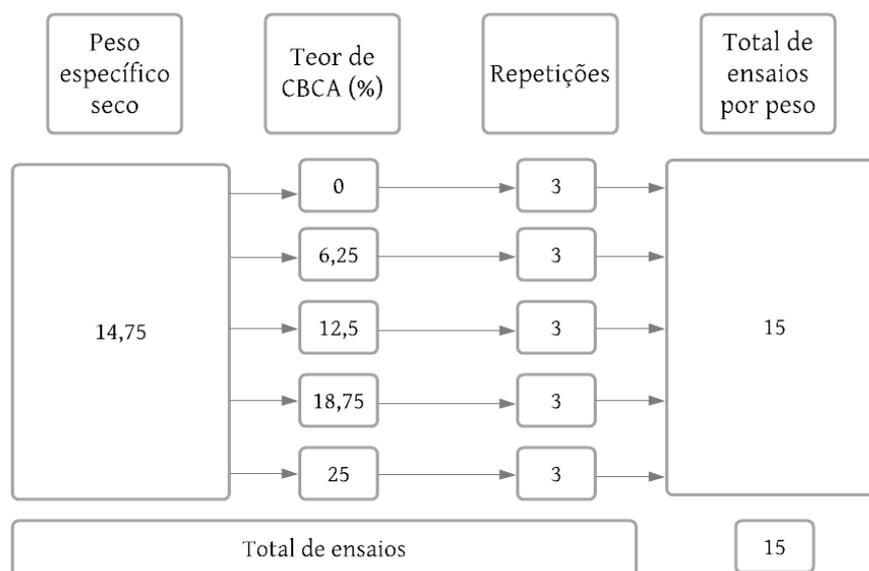
respectivamente nas Figuras 17 e 18. Vale salientar que, todos os ensaios foram feitos em triplicata.

Figura 17: Programa experimental dos ensaios de expansão em uma dimensão



Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 18: Programa experimental dos ensaios de compressão simples



Fonte: Autoria Própria (2022)

No total foram realizados 75 ensaios de expansão em uma dimensão sendo: 15 ensaios de solo puro; 15 ensaios para cada teor de CBCA (6,25%; 12,50%; 18,75% e 25,00%). Quanto aos ensaios de compressão simples foram realizados 15 ensaios, com peso específico médio de 14,75kN/m<sup>3</sup>, sendo 3 ensaios repetidos para cada teor de CBCA utilizado nessa pesquisa. Para os ensaios de adsorção de azul de metileno e potencial hidrogeniônico (pH) foram realizados 10 experimentos cada, com 2 repetições para cada teor de CBCA analisado.

#### 4.2.5.1 Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno

O ensaio de adsorção de azul de metileno foi realizado seguindo as recomendações normativa da ASTM C837/2009. Para o ensaio utilizou-se uma solução de azul de metileno com concentração molar de 10g/L, uma bureta graduada, 1g do material a ser ensaiado, 300mL de água destilada e um béquer de capacidade nominal de 1 litro. De posse da quantidade, medida em mL, da solução utilizada para adsorver o material (misturas solo/CBCA) e fazendo uso das equações (7 e 8) foi calculada a capacidade de troca catiônica (CTC) seguindo os procedimentos normativos da ASTM C837/2009 e a superfície específica, respectivamente, para o solo expansivo natural e para os quatro teores de CBCA analisados na pesquisa.

$$CTC = \frac{C \times V}{m} \times 100 \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde:

CTC: Capacidade de Troca Catiônica (meq/100g);

C: Concentração (em normalidade)

V: Volume (mL)

m: massa da amostra seca (g)

Para Hang *et al.* (1970), a definição da Superfície Específica dá-se pela equação 8, abaixo:

$$S.E = CTC \times 7,8043^* \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

S.E: Superfície Específica (m<sup>2</sup>/g)

CTC: Capacidade de Troca Catiônica (meq/100g);

#### 4.2.5.2 Ensaio de Potencial Hidrogeniônico (pH)

Com um pHmetro digital procedeu-se à determinação do pH de uma amostra sem CBCA e amostras de solo dosadas com percentuais de 6,25%; 12,50%; 18,75% e 25,00% de CBCA. Para cada experimento utilizou-se 10g de solo com e sem adição de aditivo dissolvido em 50g de água destilada homogeneizado durante 2 minutos antes do início do ensaio, seguindo os procedimentos da metodologia proposta por Donagema *et al.*, (2011) no Manual de Métodos de Análise de Solos da Embrapa.

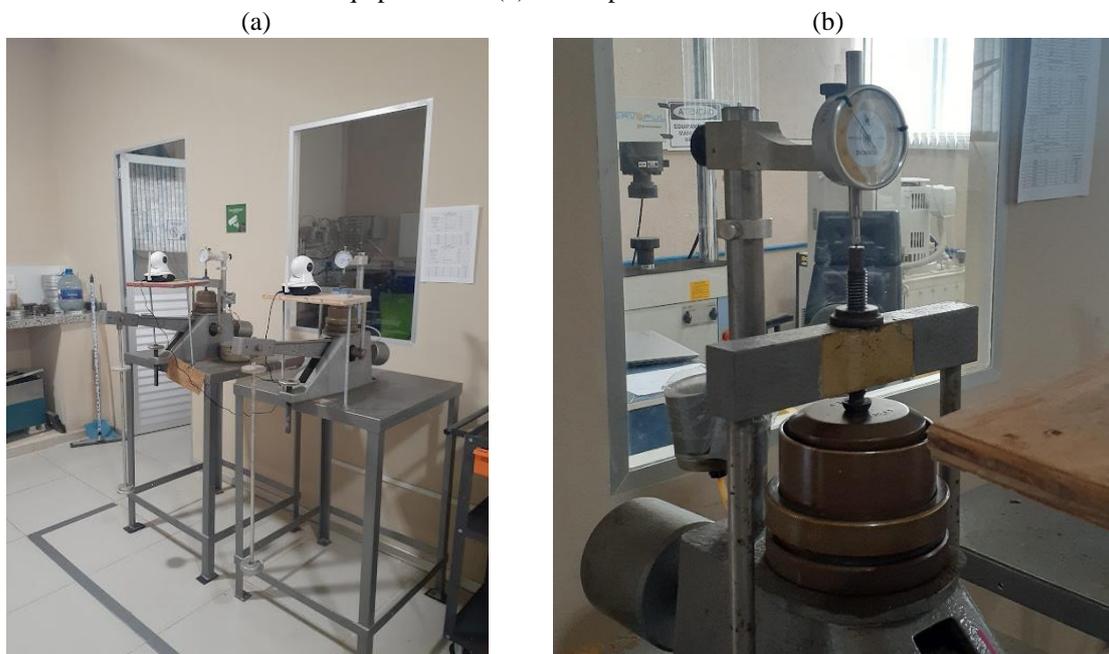
#### 4.2.5.3 Ensaio de Expansão em uma dimensão

O ensaio de expansão em uma dimensão seguiu o método A apresentado pela ASTM D4546 (1996) adotando-se uma sobrecarga de 10 kPa. Este valor para sobrecarga foi escolhido por ser preconizado por Vijayvergiya e Ghazzaly (1973) e amplamente utilizado por pesquisadores brasileiros (FERREIRA; FERREIRA, 2009; BARBOSA, 2013; FERREIRA *et al.*, 2017; SILVANI *et al.*, 2021 ). Os ensaios foram realizados em equipamento edométrico, o mesmo usado nos ensaios de adensamento

(Figura 19 (a)). O relógio (Figura 19 (b)) comparador utilizado era digital com precisão de centésimo de milímetro.

Os corpos de prova do tipo A foram utilizados neste ensaio, estes eram acoplados a célula de adensamento. A célula era instalada no equipamento, ainda sem inundar, e aplicava-se a carga de 10 kPa durante 10 minutos. Após este tempo, realizava-se a leitura no extensômetro e inundava-se a célula de adensamento. Após a inundação leituras foram realizadas nos intervalos de 0,5; 1; 2; 4; 8; 15; 30, 60, 120, 240, 480, 720, 1440, 2880 e 4320 minutos, conforme preconizado pela ASTM D4546 (1996)

Figura 19: Prensa de adensamento utilizada nos ensaios de expansão em uma dimensão - (a) Visão total do equipamento e (b) visão aproximada da célula



Fonte: Autoria Própria (2022)

#### 4.2.5.4 Ensaio de Compressão Simples

Os ensaios de compressão simples foram realizados com corpos de prova do tipo B curados por 90 dias de acordo com o programa apresentado na Figura 18. Antes da ruptura os corpos de prova foram inundados em água por 24 horas, esta prática visou elevar a saturação dos corpos de prova a 90% no mínimo visando minimizar os efeitos da sucção na resistência a compressão simples (SALDANHA; CONSOLI, 2016). O equipamento utilizado na ruptura dos corpos de prova foi a prensa hidráulica *Shimadzu* com velocidade de carregamento de 1% por minuto. A realização dos ensaios de

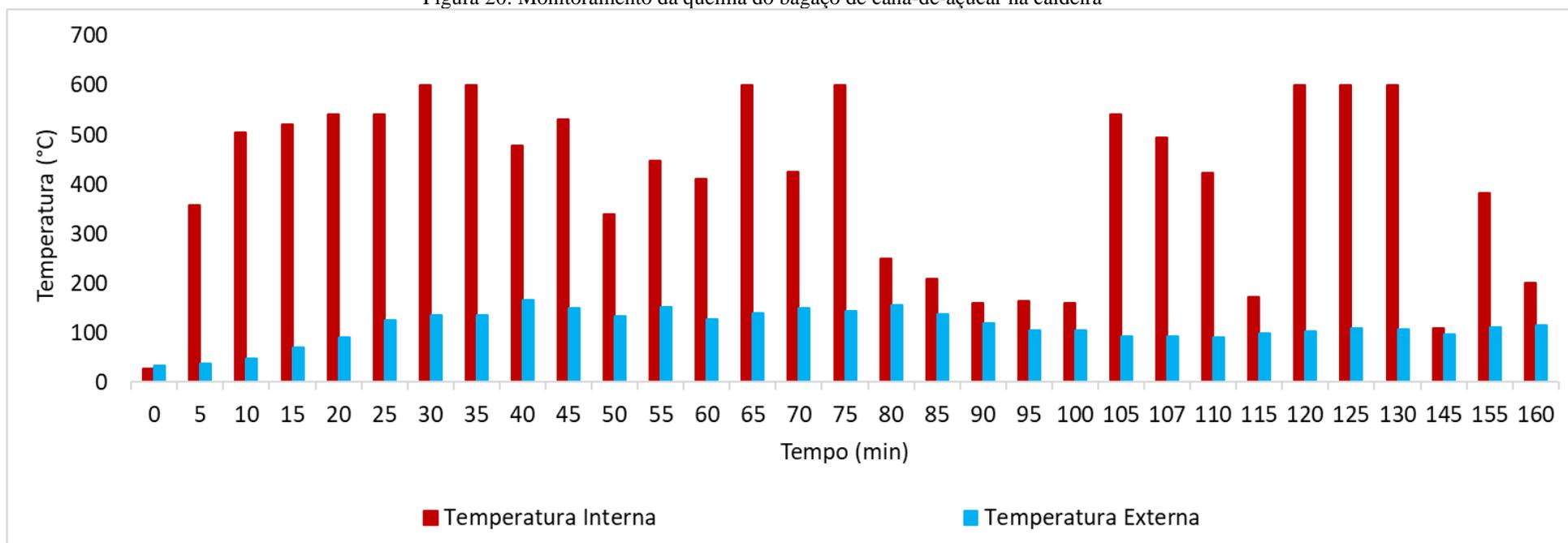
resistência a compressão simples foi motivada a pelo dos resultados explanados no item 5.2.2, especificamente devido ao alto teor de óxidos de magnésio, o que levou a hipótese deste ser responsável pelo desenvolvimento de reações pozolânicas entre o MgOH e a sílica amorfa presente na CBCA e no solo.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1 Acompanhamento do Processo de Produção da CBCA**

A Figura 20 ilustra o registro de monitoramento do processo de produção da CBCA acompanhado durante aproximadamente 160 minutos de produção ativa da caldeira que utiliza bagaço de cana-de-açúcar como fonte de energia.

Figura 20: Monitoramento da queima do bagaço de cana-de-açúcar na caldeira



Fonte: Aatoria Própria (2022)

Observando a Figura 20, pode-se constatar que, a temperatura interna da caldeira não ultrapassa 600°C. Tem-se que, a pressão máxima suportada pela caldeira analisada é de 5kgf/cm<sup>2</sup>, e em geral, essa pressão é atingida quando a temperatura de queima alcança 600°C, e por isso, o processo é controlado para impedir que a caldeira ultrapasse a sua pressão de trabalho. Possivelmente, a não uniformidade nas temperaturas de queima registradas seja consequência dos distintos teores de umidade do fardo de bagaço da cana-de-açúcar utilizados no processo e do fato, da adição na caldeira ser realizada de forma manual e sem intervalos definidos.

O controle da temperatura de queima da CBCA é de suma importância, pois segundo Bahuruden e Santhanan (2015) e Mohan *et al.* (2021) cinza do bagaço de cana-de-açúcar apresenta maior atividade pozolânica quando queimada a temperaturas menores que 700°C, o que potencializa a qualidade desse material para o estudo.

Durante o monitoramento foi também, realizado uma medição da quantidade de fardos de bagaço adicionados durante o processo de produção da CBCA, com a finalidade de obter uma estimativa de rendimento produtivo da caldeira, conforme indica a Tabela 10.

Tabela 10: Rendimento da queima do bagaço da cana-de-açúcar

Item	Unidade	Quantidade
Fardos de bagaço da cana-de-açúcar *	um	24
Bagaço da cana-de-açúcar	Kg	384
Cinza Bruta Produzida	Kg	82,5
Rendimento	%	21%

\* Um fardo do bagaço da cana pesa 16kg e é armazenado em temperatura ambiente.

O bagaço de cana-de-açúcar gerado durante o processo de fabricação de cachaça e etanol é utilizado na sua própria cadeia de produtividade como combustível gerador de energia para a caldeira. E assim, estima-se que durante o processo de combustão foram queimados aproximadamente 384Kg de bagaço de cana-de-açúcar que resultaram em 82,5Kg de CBCA, portanto, o rendimento em massa de produção de CBCA dessa caldeira é de aproximadamente 21%. Drumond (2019) em seus estudos com CBCA concluiu que de todo o material queimado, gera-se em torno de 30% de CBCA, ou seja, na queima de 1 tonelada de bagaço é gerado 300 kg de CBCA.

Após a coleta e armazenamento da CBCA bruta prosseguiu-se para a etapa de requeima do material em mufla, fazendo uso de cápsulas de porcelanato. Na mufla o material previamente peneirado e passante na peneira #100 foi queimado em

temperatura de 700°C durante 90 minutos (Figura 21), objetivando a uniformidade da temperatura de queima. E assim, obteve-se uma CBCA pura, homogênea e uniforme.

Figura 21: Processo de requeima da CBCA em mufla



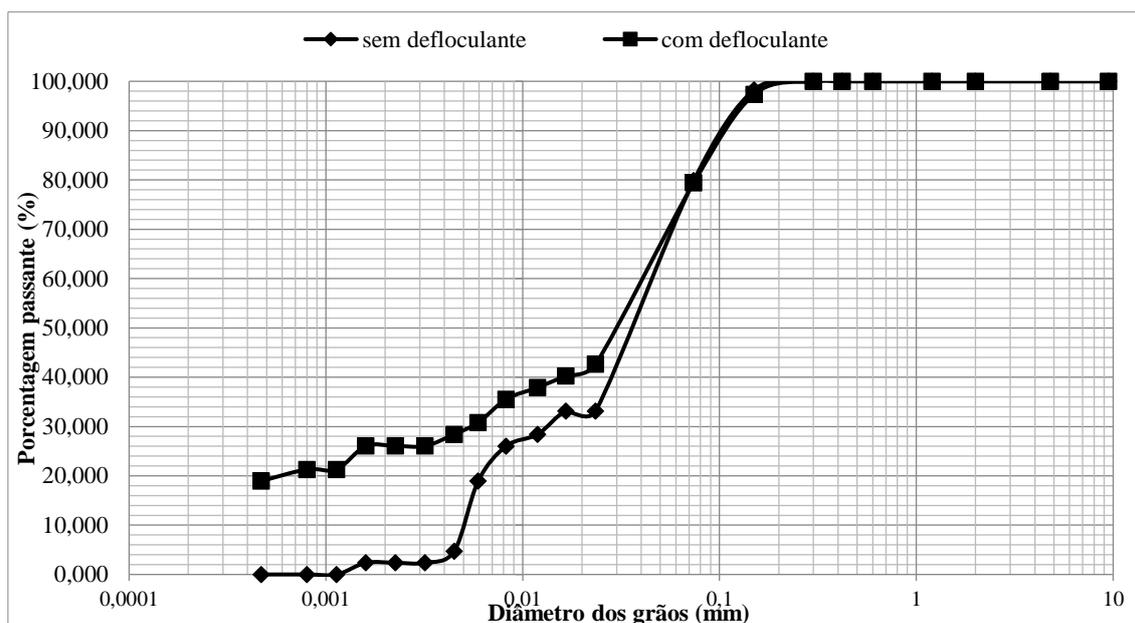
Fonte: Autoria Própria (2022)

## 5.2 Análise da Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBCA)

### 5.2.1 Propriedades Físicas da CBCA

Na Figura 22 é apresentada a curva granulométrica da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) com e sem defloculante por sedimentação e peneiramento e na Tabela 11 são apresentadas as propriedades físicas da CBCA.

Figura 22: Distribuição do tamanho das partículas da CBCA



Fonte: Autoria Própria (2022)

Além dos resultados da análise granulométrica da CBCA analisada, a Tabela 11 apresenta os resultados da massa específica, superfície específica e pH da CBCA.

Tabela 11: Propriedades físicas da CBCA

Propriedades	Valores		Norma Técnica
	S/defloculante	C/defloculante	
Areia grossa (%) $0,6 \leq d < 2$ mm	0,00	0,00	D 2487 (ASTM, 2017)
Areia média (%) $0,2 \leq d < 0,6$ mm	0,00	0,00	
Areia fina (%) $0,06 \leq d < 0,2$ mm	20,12	20,54	
Silte (%) $0,002 \leq d < 0,06$ mm	79,89	79,46	
Argila (%) $- d < 0,002$ mm	2,37	26,06	
Classificação SUCS	ML		
Umidade Higroscópica	0,40%		
Limite de liquidez	-		ABNT NBR 6459/2017
Limite de plasticidade	-		ABNT NBR 7180/2016
Índice de plasticidade	NP*		
Peso específico das partículas do solo	25,01 kN/m <sup>3</sup>		ABNT NBR 6458/2016
Superfície Específica	121,98m <sup>2</sup> /g		
pH	11,90		

NP\* – Não Plástica; ML – Silte de baixa compressibilidade

Observa-se uma variação significativa na curva com e sem defloculante, onde tem-se para proporção de silte e argila presente na amostra de CBCA uma variação da ordem de 77,51% e 2,37%, respectivamente, para 53,40% e 26,06%. E assim, mais uma vez fica comprovado a importância e eficiência do defloculante hexametáfosfato de sódio usado na realização do ensaio.

De acordo com a aferição do índice de plasticidade, a CBCA foi classificada como uma cinza não plástica (NP), propriedade comum as cinzas resultantes do processo de queima de matéria orgânica como bagaços e cascas (SILVANI et al, 2022; SHARMA, PHANIKUMAR e VARAPRASADA, 2008, DANG; HADI; Ni, 2021. Por fim, tomando como base o Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS), a CBCA é classificada como um silte de baixa compressibilidade (ML).

## 5.2.2 Análise Química da CBCA

### 5.2.2.1 Difração de Raio-X e Espectrometria de Fluorescência de Raio-X

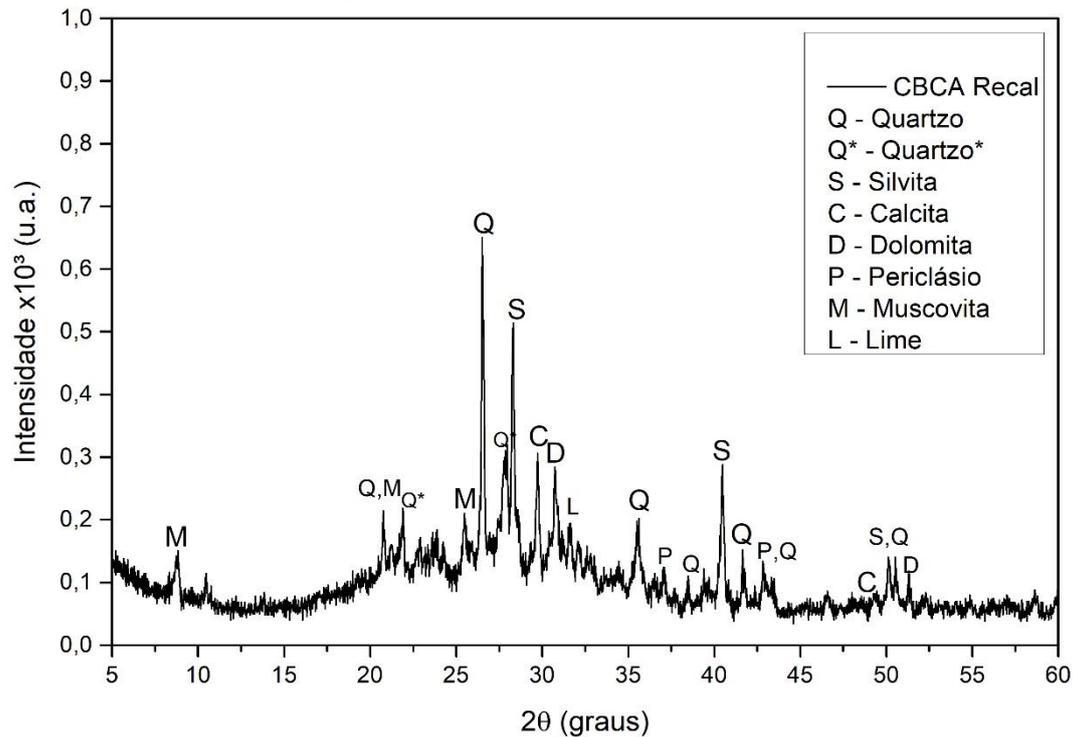
A Tabela 12 exibe os principais elementos químicos da análise da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) através da espectrometria de Fluorescência de Raio-X (FRX). Esse ensaio foi realizado de acordo com a ABNT NBR 16137/2016 com atmosfera a vácuo e cátodos de cobre.

Tabela 12: Espectrometria de Fluorescência de Raio-X da CBCA

Elemento Químico	Fração (%)
SiO <sub>2</sub>	47,53
MgO	16,12
K <sub>2</sub> O	8,81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,75
CaO	6,89
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5,08
SO <sub>3</sub>	2,68
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,46
Cl	1,98

Os resultados obtidos por meio da difratometria de Raio-X (DRX) são demonstrados na Figura 23. O DRX foi executado com amplitude de 5° a 60° com uma velocidade de varredura de 2° por minuto em equipamento com cátodo de cobre.

Figura 23: Difração dos raio-x da CBCA



Fonte: Autoria Própria (2022)

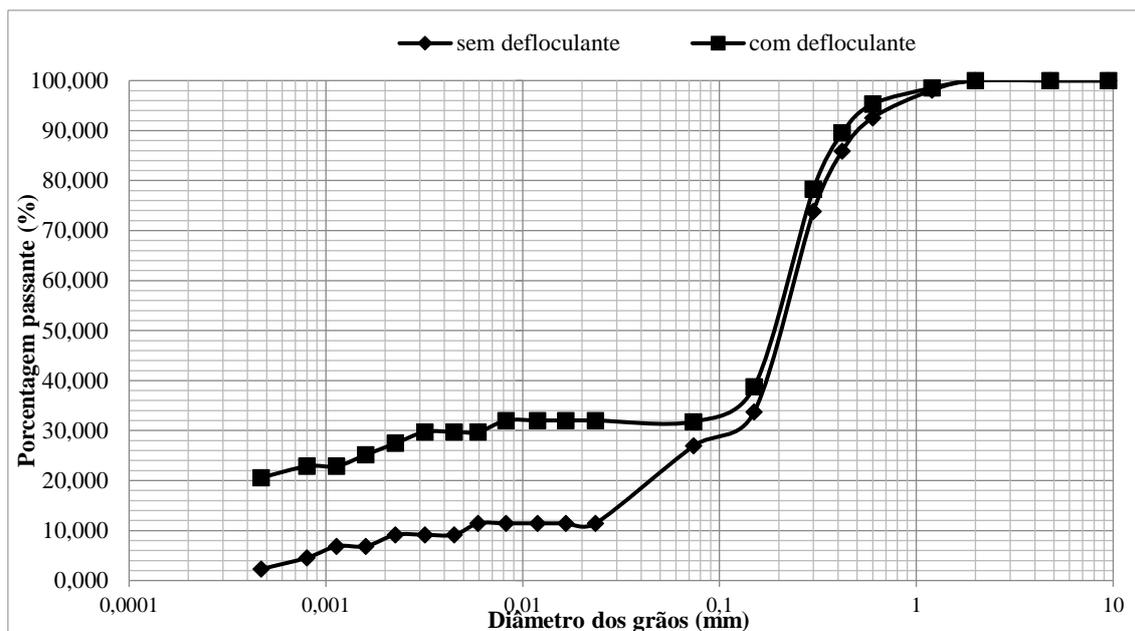
O resultado da análise química revelou que a CBCA é composta majoritariamente pelos altos teores de sílica em sua composição e, também de óxidos de magnésio (MgO), potássio (K<sub>2</sub>O) e cálcio (CaO). Presença desses materiais é confirmada pelos picos de Quartzo, Periclásio, Silvita e Dolomita/Lime (Cal) respectivamente, encontrados na DRX. Quando comparadas com as médias dos elementos da Tabela 2, as frações da CBCA em estudo são similares às frações encontradas pelos autores citados, com exceção do teor de óxidos de magnésio (MgO), pois é possível perceber uma diferença considerável com a média, indicando maior potencial de reação da CBCA com o solo, uma vez que os cátions de Mg<sup>2+</sup> também substituem os cátions com menor valência presentes no solo, resultado em floculação e tem potencial de desencadeamento de reações pozolânicas (GRIM, 1953). Esse fato, motivou a realização dos ensaios de compressão simples objetivando medir o grau de desenvolvimento de reações pozolânicas da CBCA.

## 5.3 Análise do Solo Expansivo

### 5.3.1 Propriedades Físicas do Solo Expansivo

Na Figura 24 é apresentada a curva granulométrica do solo expansivo com e sem defloculante por sedimentação e peneiramento e na Tabela 13 são apresentadas as propriedades físicas do solo.

Figura 24: Distribuição do tamanho das partículas do solo expansivo



Fonte: Autoria Própria (2022)

Além dos resultados da análise granulométrica do solo estudado, a Tabela 13 apresenta o resultado da massa específica, superfície específica, pH, índice de atividade e de classificação do solo. O mesmo valor de peso específico real do solo desta pesquisa, foi encontrado por: Silvani *et al.* (2021) ao estudar o solo expansivo coletado na cidade de Paulista - PE. E ainda, resultados semelhantes foram encontrados por Paiva (2016) ao analisar os solos expansivos de Ipojuca-PE, Paulista-PE e Cabrobó-PE.

Tabela 13: Propriedades Físicas do Solo Expansivo

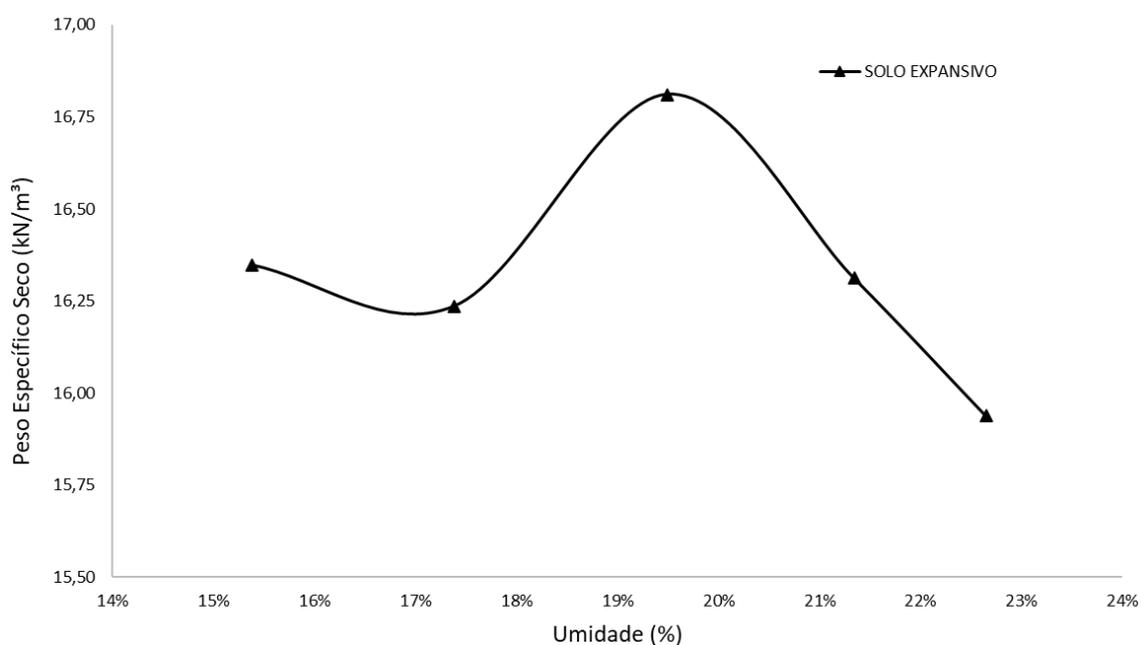
Propriedades	Valores		Norma Técnica
	S/defloculante	C/defloculante	
Areia grossa (%) $0,6 \leq d < 2$ mm	0,00	0,00	D 2487 (ASTM, 2017)
Areia média (%) $0,2 \leq d < 0,6$ mm	14,10	10,43	
Areia fina (%) $0,06 \leq d < 0,2$ mm	58,96	57,79	
Silte (%) $0,002 \leq d < 0,06$ mm	17,79	4,34	
Argila (%) $d < 0,002$ mm	9,15	27,45	
Índice de atividade = $IP/ \% < 0,002$ mm	4,13	1,38	-
Umidade Higroscópica	2,73%		
Índice de classificação ( $K_d$ )	1,65		
Classificação SUCS	SC		D 2487 (ASTM, 2017)
Limite de liquidez	65,00%		ABNT NBR 6459/2017
Limite de plasticidade	27,20%		ABNT NBR 7180/2016
Índice de plasticidade	37,80%		
Peso específico das partículas do solo	26,50 kN/m <sup>3</sup>		ABNT NBR 6458/2016
Superfície específica	1024,64m <sup>2</sup> /g		ASTM C837/2009
pH	10,50		

Observa-se uma variação significativa na curva com e sem defloculante, onde tem-se para proporção de silte e argila presente na amostra de solo uma variação da ordem de 17,79% e 9,15%, respectivamente, para 4,34% e 27,45%. E assim, fica comprovado a importância e eficiência do defloculante hexametáfosfato de sódio usado no ensaio.

O índice de plasticidade de 37,80% indica a alta plasticidade do solo, propriedade comum em solos finos e expansivos. O índice de atividade indica a presença de uma argila ativa a muito ativa conforme os critérios de Skempton (1953) e o índice de classificação ( $K_d$ ) indica a expansividade do solo pelos critérios Priklnskij (1952), ambos apresentados no item 3.1.2. Por fim, tomando como base o Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS), o solo é classificado como uma areia argilosa (SC).

A Figura 25 apresenta a curva de compactação do solo expansivo obtida através do ensaio de Proctor, conforme as recomendações normativas da NBR 7182 (ABNT, 2020). O ensaio foi realizado com energia de compactação normal, reuso de material e cilindro pequeno. O solo expansivo em estudo apresentou um peso específico máximo de  $16,75 \text{ kN/m}^3$  e umidade ótima de  $19,5\%$ . A umidade ótima elevada é uma característica de solos coesivos, bem como o peso específico seco máximo entre  $15 \text{ kN/m}^3$  e  $17 \text{ kN/m}^3$ .

Figura 25: Curva Proctor do solo expansivo



Fonte: Autoria Própria (2022)

Pode-se observar que a curva de compactação para o solo expansivo apresenta uma certa tendência de pico duplo, o que também foi encontrado por Paiva et. al (2016) e Ataíde (2017), nos seus respectivos, estudos com solo expansivo. Para Paiva (2016) e Schanz e Elsway (2017), o formato da curva de compactação com pico duplo é encontrado em solos com limite de liquidez entre 30 e 70%, muito coesivo e que possuem o argilomineral montmorilonita. O solo em estudo apresenta 65% de limite de liquidez, e, conforme a análise de difração de Raio-X, exibida na Figura 26 o solo apresenta picos de montmorilonita.

### 5.3.2 Composição Química do Solo Expansivo (Mistura de Bentonita + areia)

Para a caracterização química do solo expansivo (mistura de bentonita cálcica + areia) realizou-se os ensaios FRX, DRX e adsorção de azul de metileno.

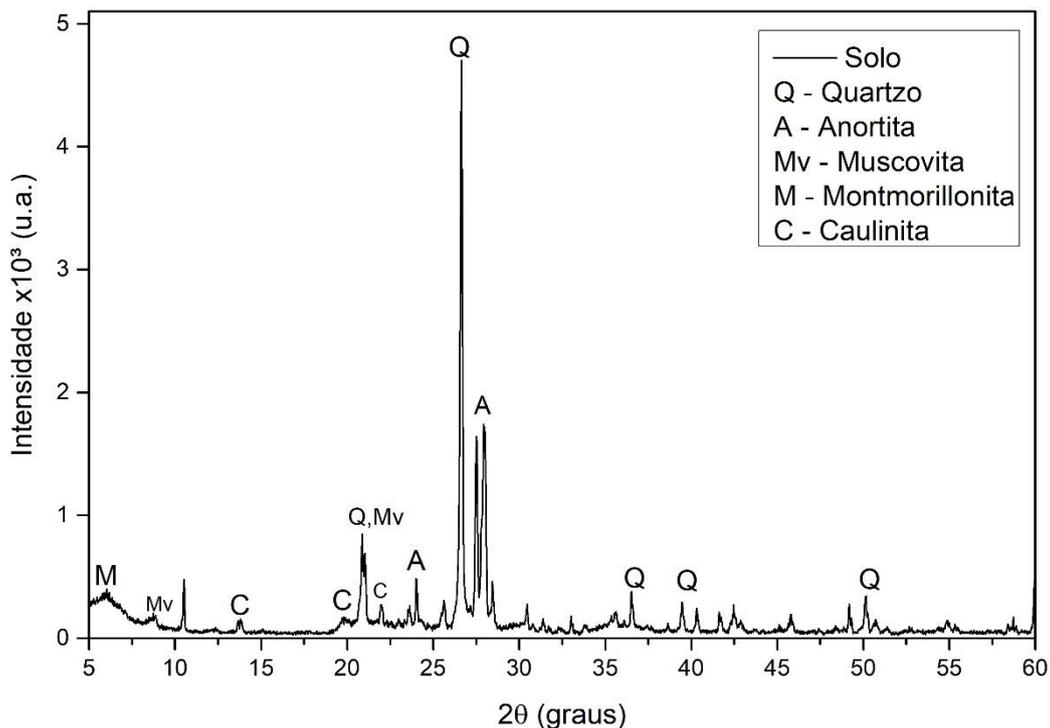
O ensaio de FRX foi realizado de acordo com a ABNT NBR 16137/2016 com atmosfera a vácuo e cátodos de cobre para o solo. O resultado do ensaio está presente na Tabela 14. O solo apresenta altos teores de sílica e alumina, favorecendo a ocorrência das reações pozolânicas.

Tabela 14: Espectrometria de Fluorescência de Raio-X do Solo Expansivo

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

O DRX foi executado com amplitude de 5° a 60° com uma velocidade de varredura de 2° por minuto em equipamento com cátodo de cobre e seu resultado, mostrado na Figura 26, indicou picos de quartzo, anortita, caulinita, muscovita e montmorilonita, sendo os dois últimos argilominerais expansivos. Os picos de montmorilonita e quartzo são decorrentes da bentonita e da areia, respectivamente, uma vez que são os principais minerais desses materiais. Li *et al.* (2018) encontraram um difratograma similar ao do solo expansivo em estudo, diferenciando apenas a anortita pela illita (argilomineral expansivo).

Figura 26: Difração dos raio-x do solo expansivo



Fonte: Autoria Própria (2022)

O resultado da análise química revelou que o solo expansivo é composto majoritariamente por  $\text{SiO}_2$ , principal componente do quartzo. Entretanto, a presença do mineral quartzo não define o comportamento do solo. O comportamento expansivo do solo é consequência da presença dos argilominerais muscovita e montmorilonita na fração argilosa do solo (POLIDORI, 2009). Neste caso, a montmorilonita é a responsável pela elevada capacidade de absorção de água, alto índice de plasticidade e alto potencial de expansão do solo.

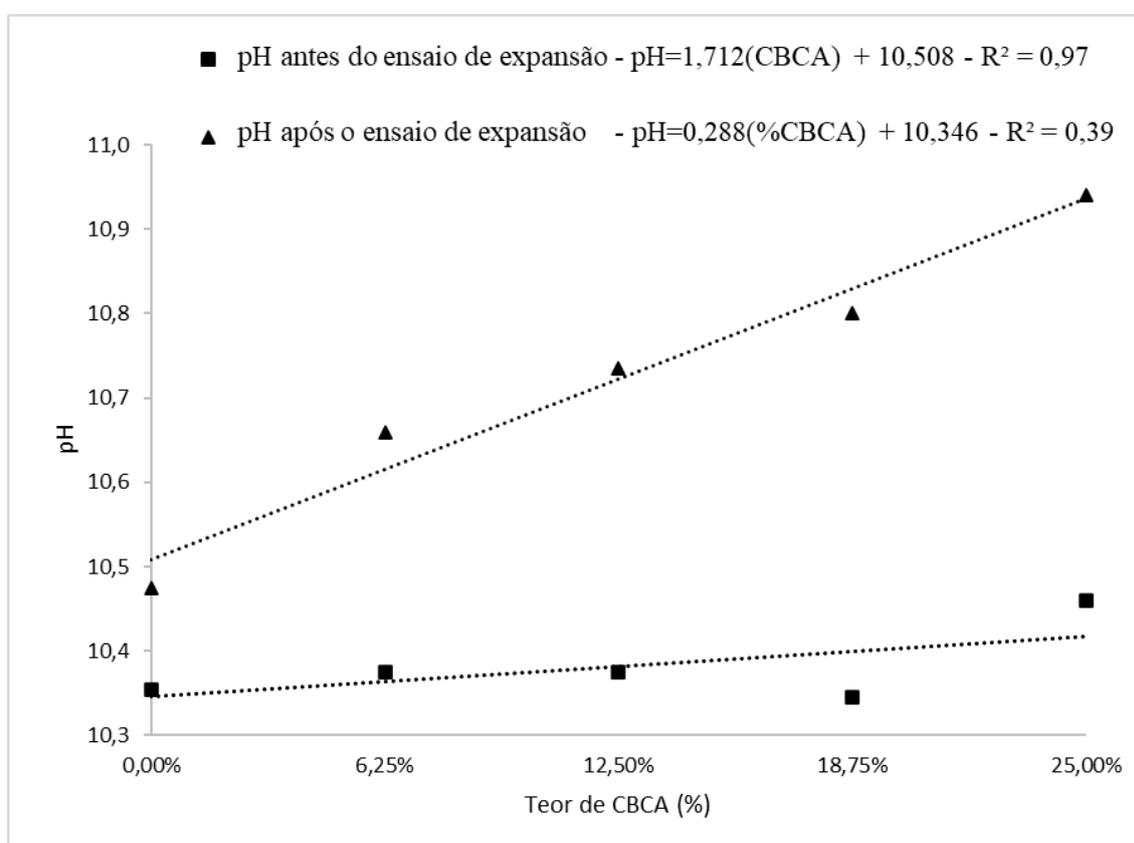
Através do ensaio de adsorção de azul de metileno normatizado pela ASTM C837/2009 foi possível calcular a capacidade de troca catiônica (CTC) e a superfície específica do solo e assim, encontrar grandezas na ordem de 131,29 meq/100g e 1024,64m<sup>2</sup>/g, respectivamente. Destaca-se que segundo MUGGLER et al., 2005; SOUZA, 2015, BARMAN E DASH, 2022 a superfície específica da montmorilonita varia de 100-150 meq/100g.

## 5.4 Análise das Características das Misturas de SOLO + CBCA

### 5.4.1 Análise do Potencial de Hidrogênio

Ao avaliar o potencial de hidrogênio (pH) do solo expansivo e da CBCA, separadamente, obteve-se valores da ordem de 10,50 e 11,90, respectivamente. Ambos os valores indicam que os materiais estudados apresentam pH alcalino. Conforme, ilustra a Figura 27, à medida que se adiciona teores de CBCA ao solo, o pH da mistura tende a aumentar, resultado obtido para a condição de antes e depois do ensaio de expansão.

Figura 27: Análise do Potencial de Hidrogênio (pH) do solo ao se adicionar teores de CBCA



Fonte: Autoria Própria (2022)

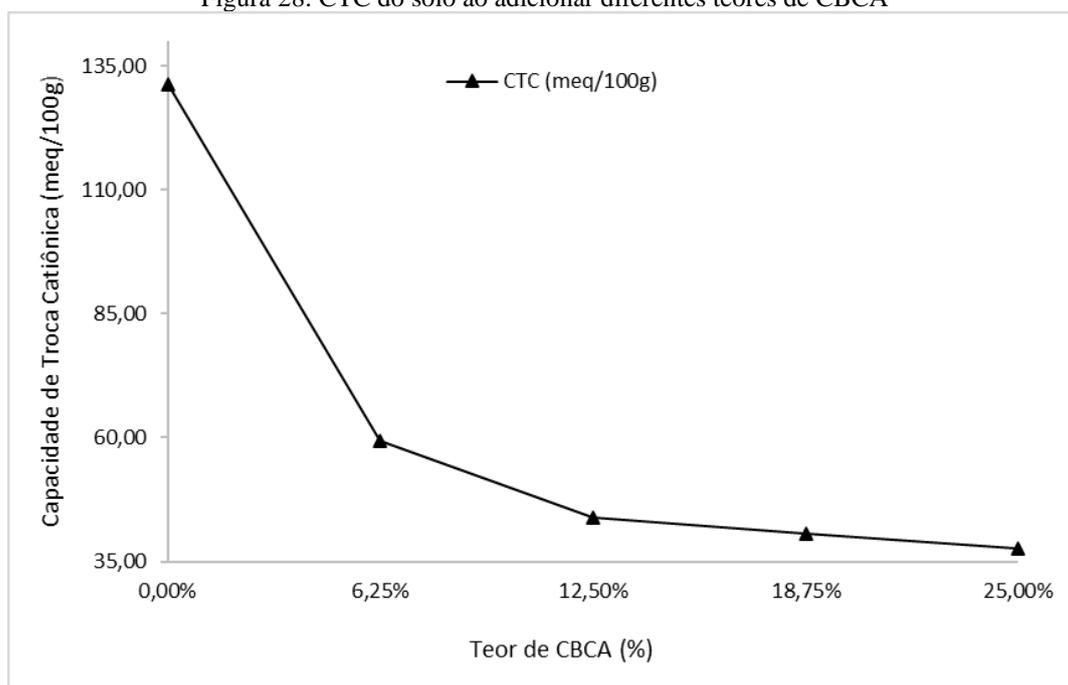
Pode-se observar que, à medida que o percentual de CBCA foi aumentando houve um incremento de 10,5 para 10,9 e de 10,4 para 10,5 para antes e após o ensaio de expansão, respectivamente. Ao analisar o ponto de teor máximo de CBCA adicionada ao solo expansivo constata-se que houve um incremento de 4% no valor do pH do solo tratado, este fato deve-se ao pH da CBCA ser maior que o do solo. Cheng et.al (2018) ao analisar um determinado solo tratado com 20% de cinzas vulcânicas encontrou um incremento da ordem de 8% no valor de pH da sua mistura.

#### 5.4.2 Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Superfície Específica

As Figura 28 e 29 indicam que os valores de CTC e superfície específica diminuem à medida que o percentual de CBCA aumenta. Esse comportamento, comprova que a adição de CBCA ao solo expansivo provocou mudanças no comportamento mineralógico dos solos tratados. CTC é a quantidade de cátions trocáveis necessária para equilibrar a deficiência de carga na superfície das partículas de argila. As argilas com maior área superficial específica geralmente apresentam maior CTC, maior atividade superficial e conseqüentemente maior potencial de absorção de água. O tratamento com cinzas faz com que o solo se torne mais granular, resultando em menor atividade superficial e, portanto, menor potencial de absorção de água (NALBANTOĞLU, 2004).

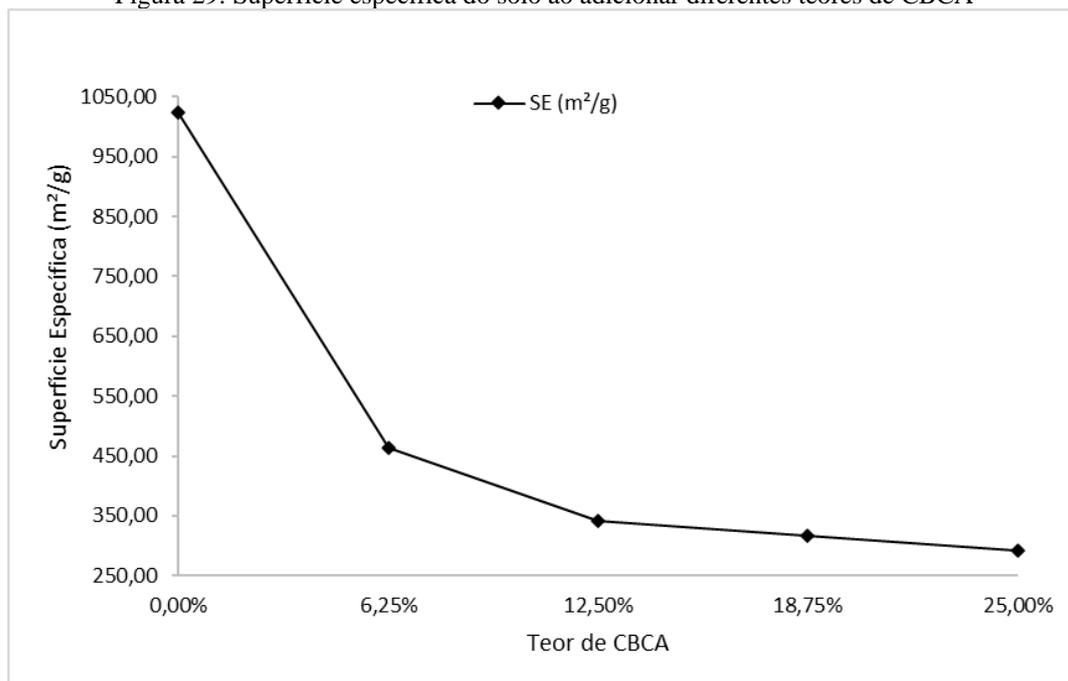
Resultados similares a esses foram encontrados por Nalbantoğlu (2004) ao estudar o comportamento expansivo das argilas de Degirmenlik e Tuzla tratados com Cinza Volante tipo C.

Figura 28: CTC do solo ao adicionar diferentes teores de CBCA



Fonte: Autorial Própria (2022)

Figura 29: Superfície específica do solo ao adicionar diferentes teores de CBCA



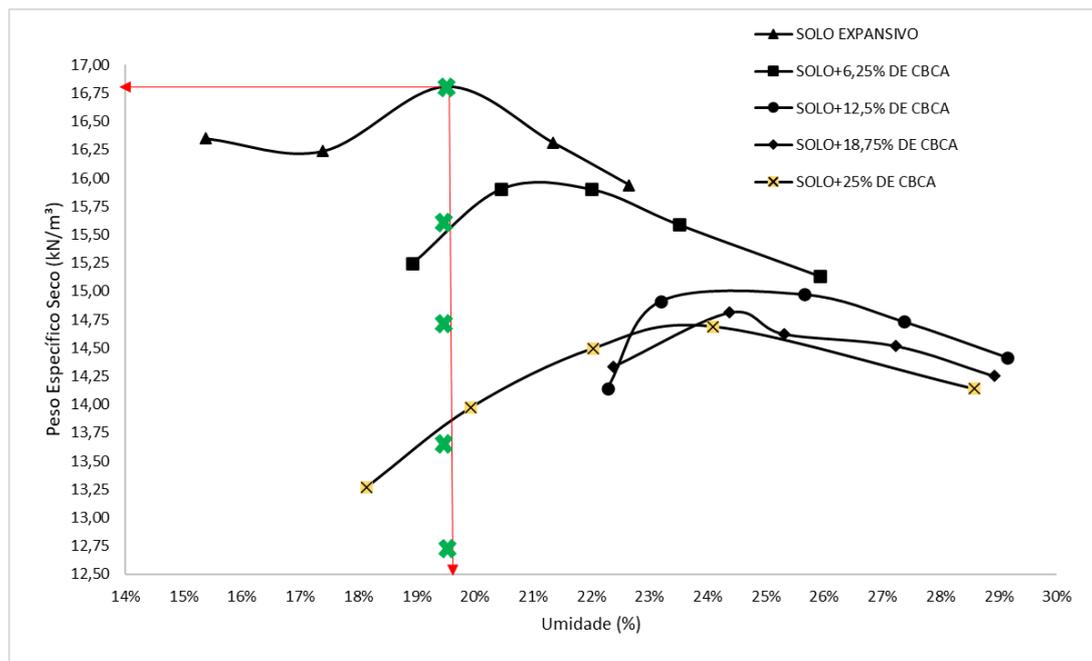
Autoria Própria (2022)

De acordo Cheng et. al (2018) aditivos estabilizadores ricos em Calcio e Magnésio alteraram a característica de carga na superfície das partículas do solo pela troca e movimento de cátions, fazendo as partículas do solo ficarem mais próximas umas das outras e diminuindo o potencial de expansão.

### 5.5 Análise da Curva Proctor das Misturas de SOLO + CBCA

A Figura 30 apresenta o comportamento da curva Proctor do solo expansivo puro (Mistura de Bentonita cálcica + Areia), à medida que são incrementados os teores de CBCA analisados na presente pesquisa. Conforme, observa-se na Figura 30 e na Tabela 15, à medida que se adiciona teores de CBCA ao solo há uma diminuição do peso específico seco máximo e um aumento da umidade ótima das misturas.

Figura 30: Curvas Proctor do solo puro e das misturas com adição de CBCA



Fonte: Autorial Própria (2022)

Tabela 15: Pontos máximos das curvas Proctor

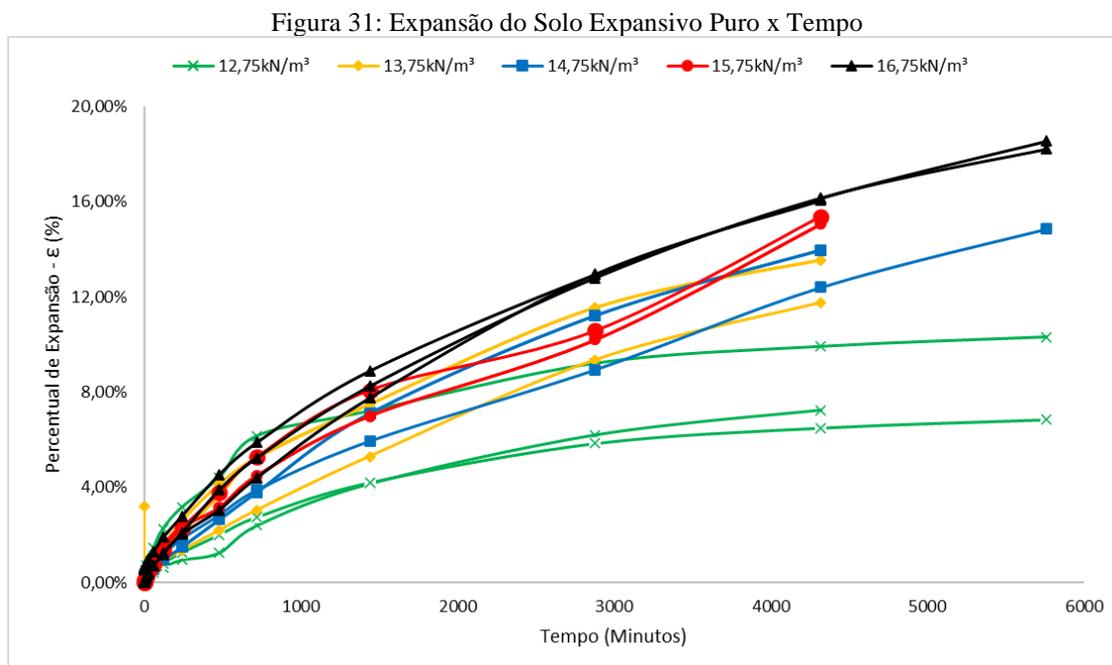
Curva	Peso específico máximo	Umidade ótima
Solo Expansivo puro	16,75kN/m <sup>3</sup>	19,50%
Solo + 6,25% de CBCA	16,00 kN/m <sup>3</sup>	21,00%
Solo + 12,50% de CBCA	15,00kN/m <sup>3</sup>	24,00%
Solo + 18,75% de CBCA	14,75 kN/m <sup>3</sup>	24,75%
Solo + 25,00% de CBCA	14,60 kN/m <sup>3</sup>	23,50%

A diminuição do peso específico seco do solo com a adição de CBCA foi encontrado por Dang, Khabbaz e Ni (2021), os autores atribuem essas alterações a floculação do solo, originada pela troca catiônica e pelo menor peso específico real dos grãos da CBCA em relação ao solo. Constatino (2018) ao estudar o impacto da cinza da casca de arroz (resíduo semelhante a CBCA) na expansividade do solo de Paulista-PE, constatou que, o incremento proporcional no teor de cinza aos solos causa um aumento contínuo na umidade ótima e uma diminuição do peso específico seco máximo das misturas.

## 5.6 Análise da Expansão em Solo Puro

A Figura 31 ilustra o comportamento do solo expansivo puro (Mistura de bentonita cálcica ativada + areia) avaliado sobre diferentes pesos específicos. Em um solo que apresenta argilominerais expansivos, conforme, pode-se verificar na Figura 31,

à medida que o peso específico aumenta, o percentual de expansão também aumenta. Resultados semelhantes foram encontrados por: Consoli et. al (2020); Silvani et. al (2021) e Tenório (2019), em seus respectivos estudos.



Fonte: Autoria Própria (2022)

Conforme, ilustrado acima na Figura 31, para os pesos específicos de 12,75; 13,75; 14,75; 15,75 e 16,75kN/m<sup>3</sup>, obteve-se, respectivamente, os seguintes percentuais médios de expansão: 7,88%; 12,95%; 13,43%; 15,16% e 16,12% para o tempo equivalente a 96 horas (5760 minutos) de inundação do corpo de prova submetido a sobrecarga de 10kPa, conforme procedimentos descritos anteriormente.

Entretanto, é válido salientar que, conforme ilustra a Figura 31 após 72 horas de inundação o solo continua expandindo, atingindo valores superiores em torno de 20% de expansão no caso, do peso específico de 16,75kN/m<sup>3</sup>. Assim, ao avaliar, o incremento de expansão livre entre os pontos extremos analisados no tempo equivalente às 96 horas (5760 minutos) de inundação, tem-se um incremento de 62,4% aproximadamente entre o teor de expansão equivalente a 6,85%, no peso específico de 12,75kN/m<sup>3</sup>, para o teor de expansão de 18,20%, no peso específico de 16,75kN/m<sup>3</sup>.

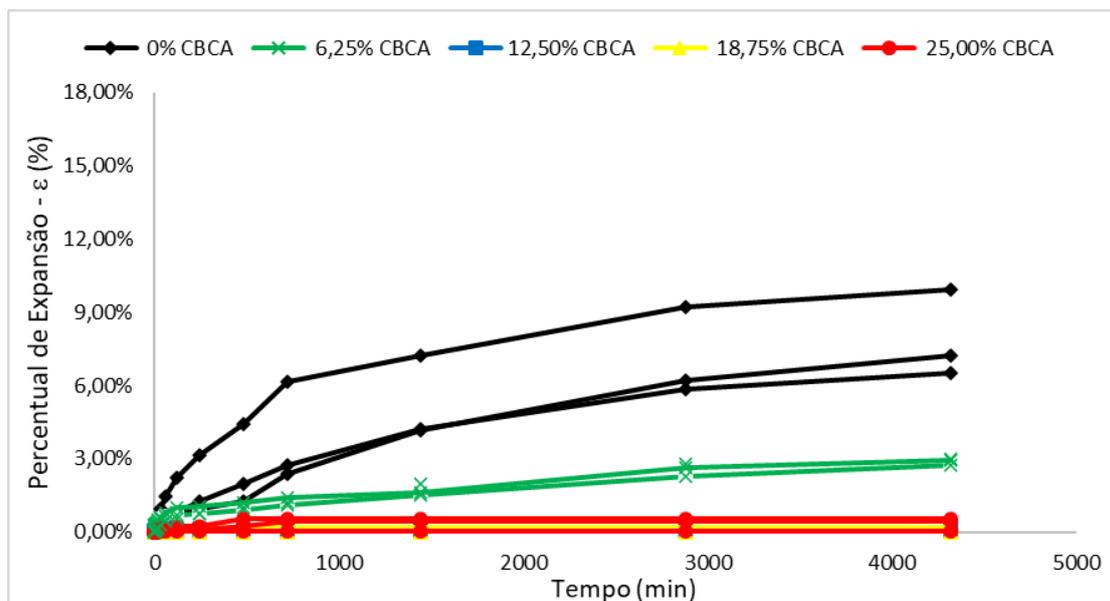
## 5.7 Efeito da CBCA na Expansão do solo

A seguir, por meio das Figuras 32 a 36 serão apresentados e analisados os resultados de expansão ao longo do tempo para os pesos específicos de 12,75; 13,75;

14,75; 15,75 e 16,75kN/m<sup>3</sup>, respectivamente, para todos os percentuais de adição da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) aqui estudados. O traçado gráfico das curvas, bem como as análises realizadas foram parametrizadas para as leituras obtidas de 0 até 4320 minutos (72 horas) após o início dos ensaios de expansão unidimensional.

A Figura 32 apresenta o percentual de expansão das amostras compactados com peso específico seco de 12,75kN/m<sup>3</sup> e tratadas com diferentes teores de CBCA. Pode-se verificar que, para este peso específico o solo puro apresenta forte potencial de expansão, com valores amostrais em torno dos 10% de expansão. Entretanto, ao adicionar 6,25% de CBCA, a expansão diminui para valores amostrais em torno de 3%, o que representa uma redução de aproximadamente 70% no índice de expansão deste solo e ainda, conforme ilustrado graficamente esta mistura apresenta comportamento nítido de estabilização. Para adições acima de 12,50% de CBCA o solo analisado apresenta-se totalmente estabilizado com deslocamentos verticais abaixo de 0,5%, ou seja, não apresenta mais comportamento expansivo.

Figura 32: Expansão para compactação com 12,75kN/m<sup>3</sup> de peso específico

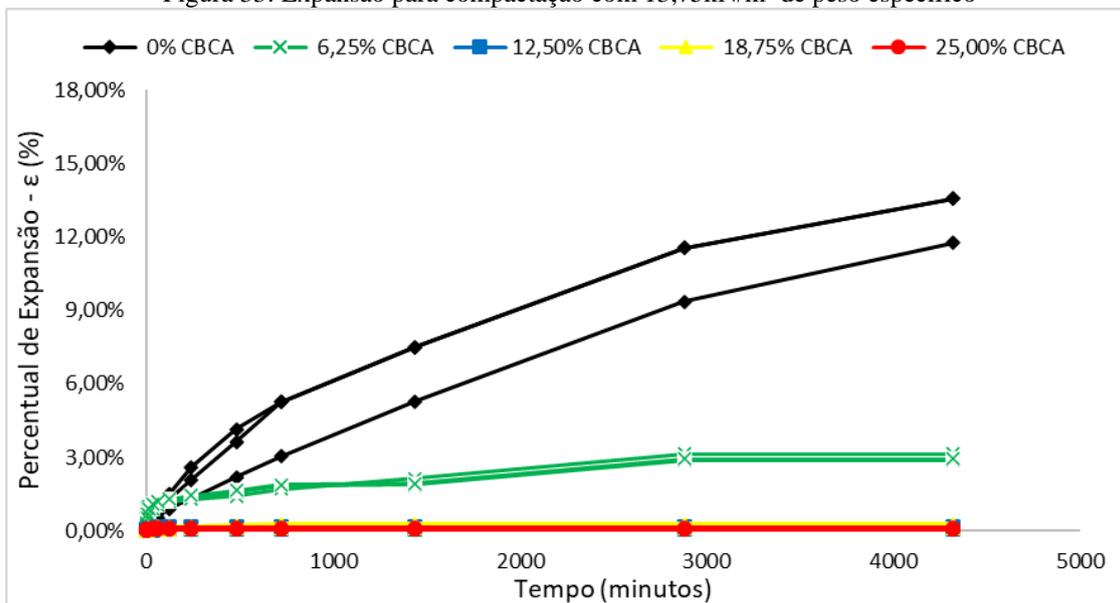


Autoria Própria (2022)

A Figura 33 apresenta o percentual de expansão das amostras compactados com peso específico seco de 13,75kN/m<sup>3</sup> e tratadas com diferentes teores de CBCA. Pode-se verificar que, para este peso específico o solo puro apresenta alto potencial de expansão, com valores amostrais em torno dos 13,5% de expansão. No entanto, ao adicionar 6,25% de CBCA, a expansão é reduzida para valores amostrais em torno de 3%, o que

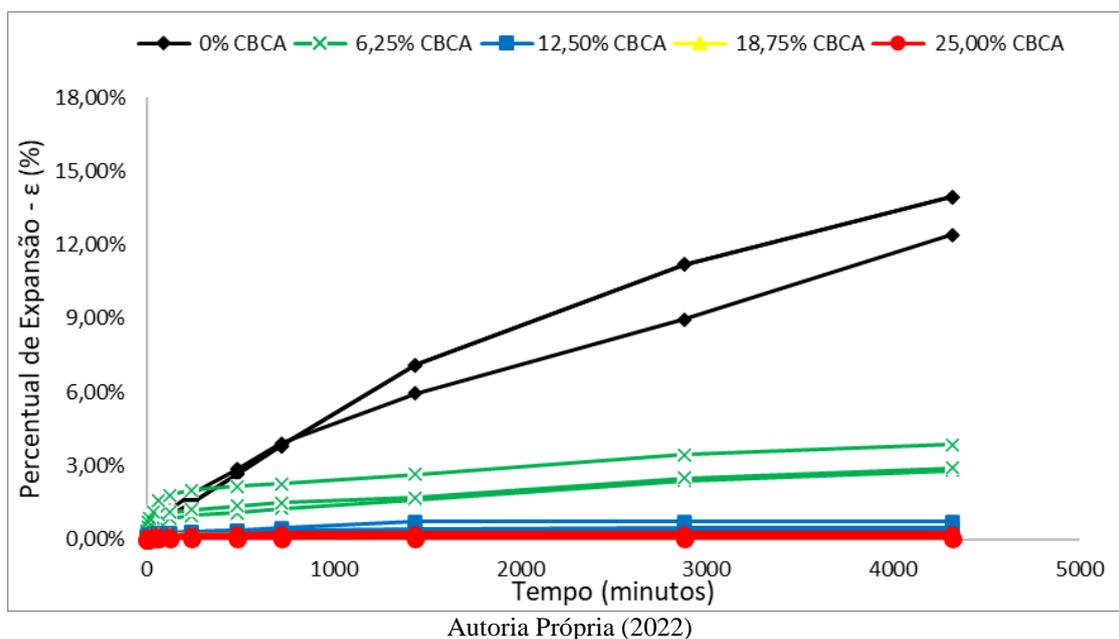
representa uma diminuição de aproximadamente 78% no índice de expansão deste solo e ainda, conforme ilustrado graficamente esta mistura apresenta comportamento nítido de estabilização. Para adições acima de 12,50% de CBCA o solo analisado apresenta-se totalmente estabilizado com deslocamentos verticais abaixo de 0,5%, ou seja, não apresenta mais comportamento expansivo.

Figura 33: Expansão para compactação com 13,75kN/m<sup>3</sup> de peso específico

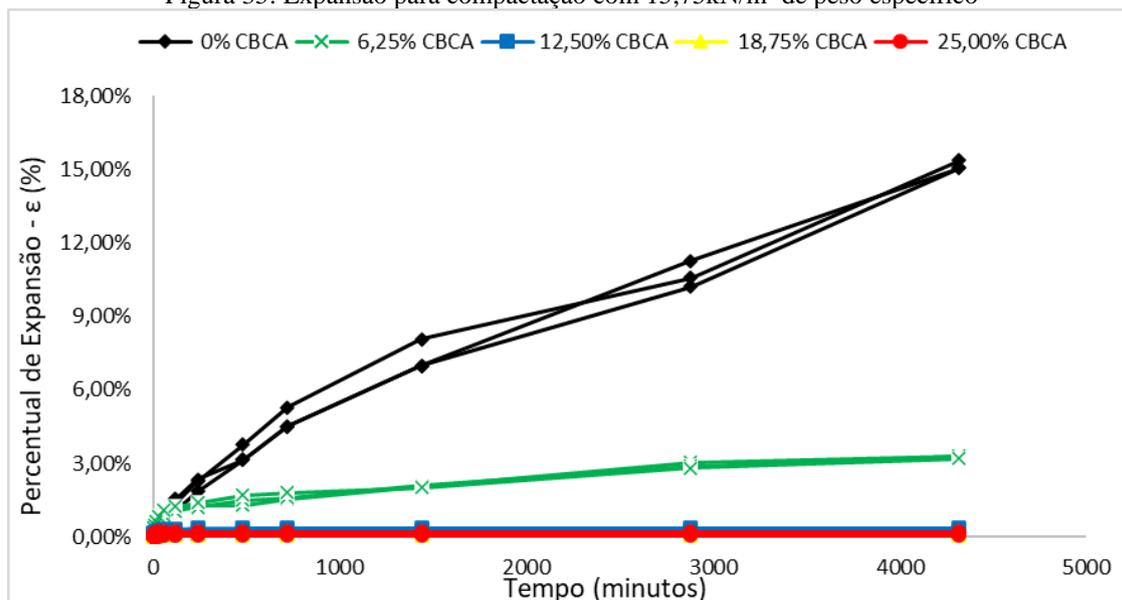


Autoria Própria (2022)

A Figura 34 apresenta o percentual de expansão das amostras compactados com peso específico seco de 14,75KN/m<sup>3</sup> e tratadas com diferentes teores de CBCA. Pode-se verificar que, para este peso específico o solo puro apresenta alto potencial de expansão, com valores amostrais em torno dos 14% de expansão. No entanto, ao adicionar 6,25% de CBCA, a expansão é reduzida para valores amostrais em torno de 4%, o que representa uma diminuição de aproximadamente 71,5% no índice de expansão deste solo. Para adições acima de 12,50% de CBCA o solo analisado apresenta-se totalmente estabilizado com deslocamentos verticais abaixo de 0,5%, ou seja, não apresenta mais comportamento expansivo.

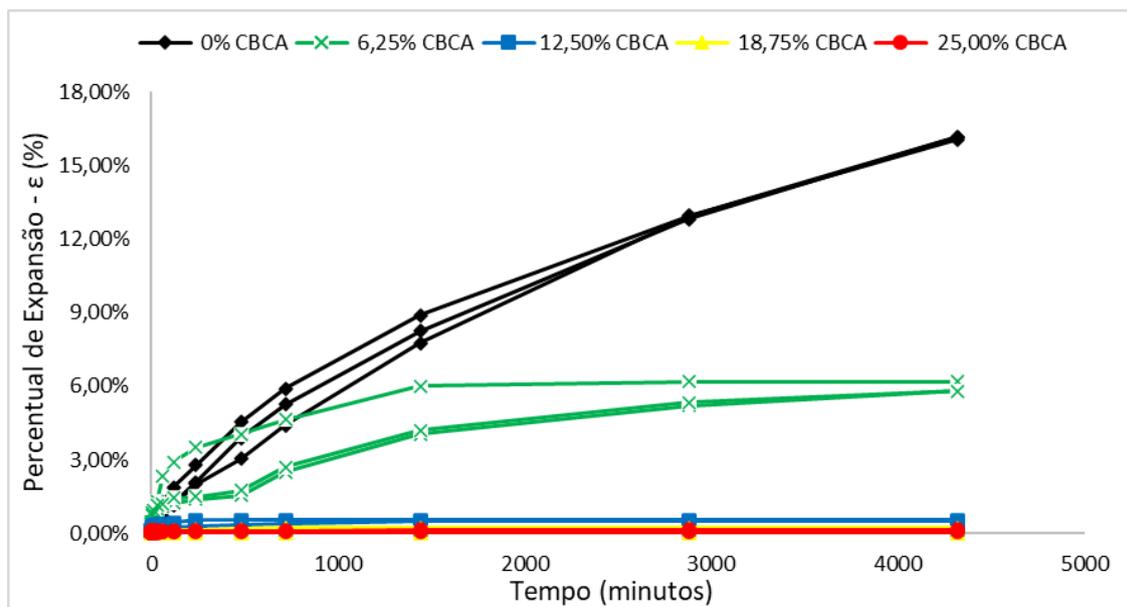
Figura 34: Expansão para compactação com  $14,75\text{kN/m}^3$  de peso específico

A Figura 35 apresenta o percentual de expansão das amostras compactados com peso específico seco de  $15,75\text{kN/m}^3$  e tratadas com diferentes teores de CBCA. Pode-se verificar que, para este peso específico o solo puro apresenta alto potencial de expansão, com valores amostrais em torno dos 15% de expansão. No entanto, ao adicionar 6,25% de CBCA, a expansão é reduzida para valores amostrais em torno de 3,5%, o que representa uma diminuição de aproximadamente 77% no índice de expansão deste solo e ainda, conforme ilustrado graficamente esta mistura apresenta comportamento nítido de estabilização. Para adições acima de 12,50% de CBCA o solo analisado apresenta-se totalmente estabilizado com deslocamentos verticais abaixo de 0,5%, ou seja, não apresenta mais comportamento expansivo.

Figura 35: Expansão para compactação com 15,75kN/m<sup>3</sup> de peso específico

Autoria Própria (2022)

A Figura 36 apresenta o percentual de expansão das amostras compactados com peso específico seco de 16,75KN/m<sup>3</sup> e tratadas com diferentes teores de CBCA. Pode-se verificar que, para este peso específico o solo puro apresenta alto potencial de expansão, com valores amostrais em torno dos 16% de expansão. No entanto, ao adicionar 6,25% de CBCA, a expansão é reduzida para valores amostrais em torno de 6%, o que representa uma diminuição de aproximadamente 62,5% no índice de expansão deste solo e ainda, conforme ilustrado graficamente esta mistura apresenta comportamento nítido de estabilização. Para adições acima de 12,50% de CBCA o solo analisado apresenta-se totalmente estabilizado com deslocamentos verticais abaixo de 0,5%, ou seja, não apresenta mais comportamento expansivo.

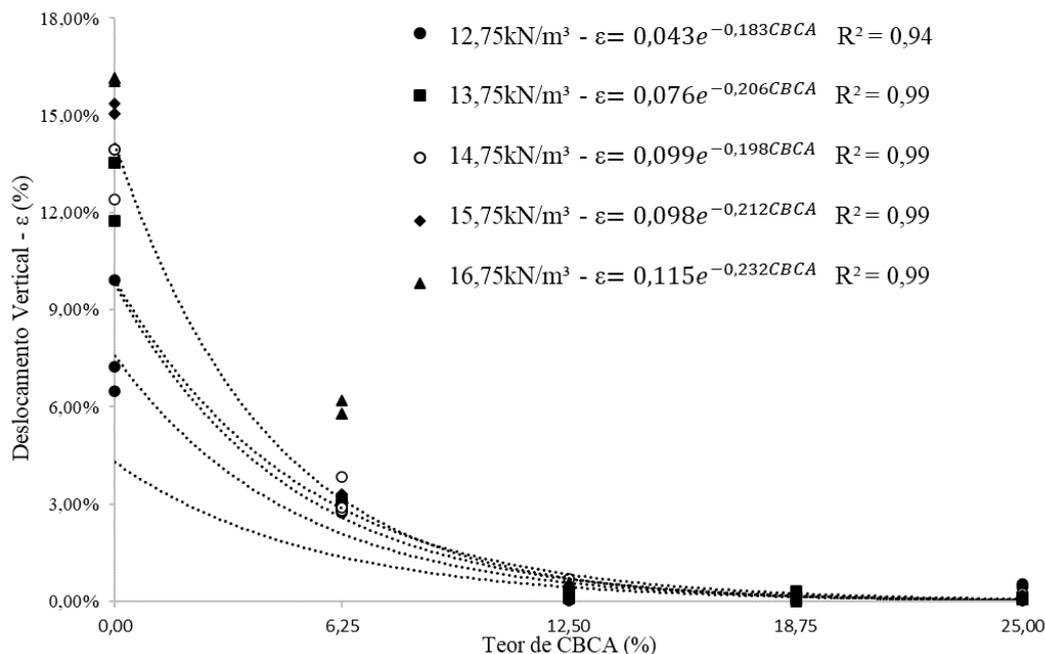
Figura 36: Expansão para compactação com  $16,75\text{kN/m}^3$  de peso específico

Autoria Própria (2022)

Assim, de maneira resumida tem-se que as Figuras 32 a 36, expõem o comportamento do solo puro, que mesmo após 72 horas de ensaio apresenta uma curva com tendência de crescimento, o que indica que o solo continua expandindo. E, também explana o comportamento das amostras de solos tratados com CBCA, onde ao adicionar CBCA observa-se que a estabilização da expansão ocorre em menores tempo de menores. Esta tendência de expansão ao longo do tempo, bem como maiores expansões conforme aumenta o peso específico (por compactação) e menor expansão à medida que se adiciona aglomerantes também, foi verificada por Consoli et. al (2020a) ao avaliar a expansão de misturas de bentonitas-caulim-cimento.

Por fim, ao analisar a Figura 37 observa-se que, ao adicionar CBCA, a expansão tende a zero (comportamento similar em todos os pesos específicos estudados). E ainda, pode-se constatar que, o gráfico torna-se uma assíntota horizontal paralela ao eixo x a partir de 12,50% de teor de CBCA, com expansões na ordem de 0,05%.

Figura 37: Expansão x Teor de CBCA

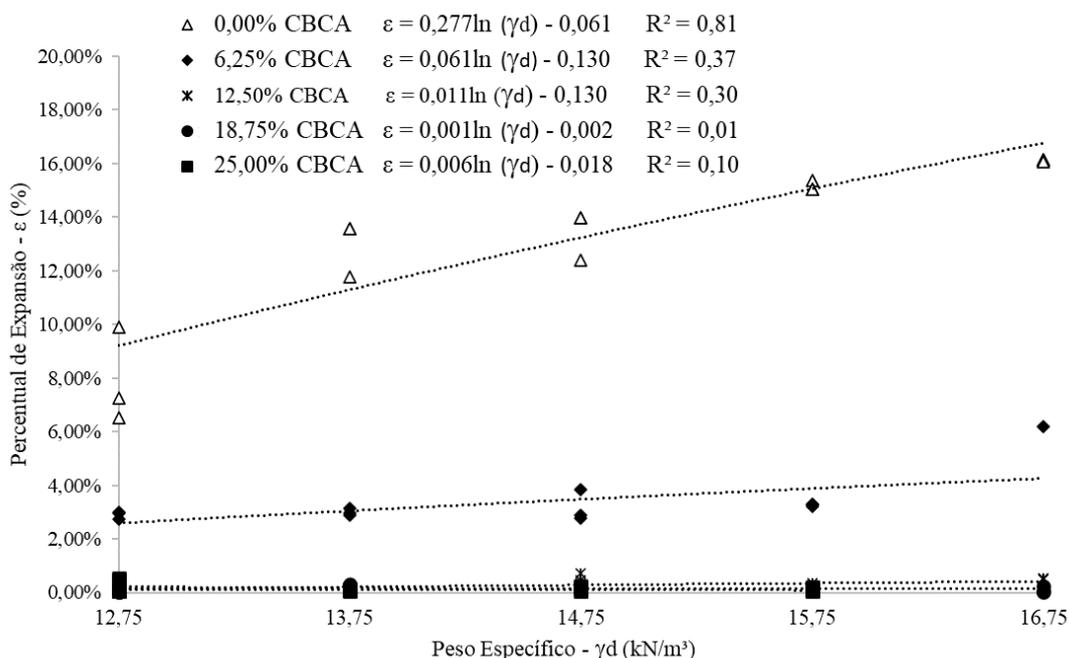


Fonte: Autoria Própria (2022)

Dang *et al.* (2021) ao avaliar as possíveis vantagens do componente pozolânico da cinza do bagaço de açúcar no tratamento de solos expansivos constatou que, após 3 dias de cura o potencial de expansão do solo atingiu valores abaixo de 1% para uma adição de 25% de CBCA ao solo expansivo. Conforme, ilustra a Figura 37 a presente pesquisa atingiu resultados semelhantes a partir de adições de 12,50% de CBCA. Uma possível justificativa para essa diferença é encontrada ao compararmos os resultados de FRX das CBCA utilizadas em ambas as pesquisas. Dang *et. al* (2021) utilizou uma CBCA com 1,98% e 2,43% de óxidos de magnésio e cálcio, respectivamente, enquanto a presente pesquisa avaliou a utilização de uma CBCA com teores de 16,12% e 6,89% respectivamente para os mesmos óxidos. Portanto, a cinza utilizada na presente pesquisa mostra-se bem mais eficiente com 18,6% a mais de óxidos com presença de cátions com valência dois.

A Figura 38 ilustra de maneira resumida a análise do efeito da expansão por teor de CBCA no peso específico, e, assim, constata-se que, quanto maior o peso específico, maior será a expansão do solo em um comportamento linear para todos os teores de CBCA estudados.

Figura 38: Efeito da expansão por teor de CBCA no Peso Específico



Fonte: Autoria Própria (2022)

A partir da Figura 38 verifica-se que para todos os pesos específicos analisados a variação de volume ao adicionar 12,50%; 18,75% e 25,00% de CBCA na matriz do solo apresentou valores abaixo de 1%, o que indica uma mudança no comportamento do solo estudado, pois de acordo com Constantino (2018), um solo é considerado expansivo quando apresenta variação de volume superior a 1%. E ainda, ao adicionar 6,25% de CBCA observa-se uma redução acentuada e bastante satisfatória na variação de volume deste solo, pois houve uma diminuição média de 61,12% na expansão do solo para todos os pesos específicos avaliados.

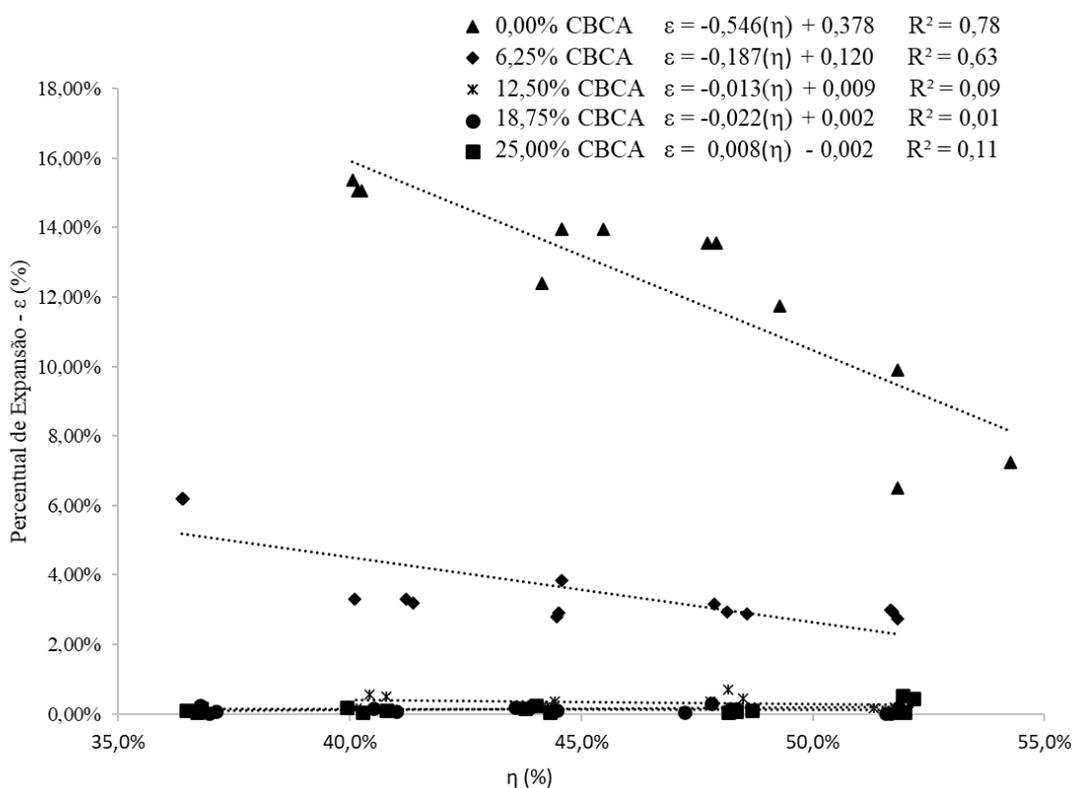
Na Figura 31 verificou-se que, o solo tende a expandir quando o peso específico seco aumenta, fato claramente observado, também, nas curvas das Figuras 37 e 38, onde verifica-se, também que a expansão tende a reduzir com o aumento do teor de CBCA. Assim, o efeito dos fatores, teor de CBCA e peso específico seco, sobre a expansão do solo é inverso.

## 5.8 Efeito da Porosidade

A porosidade, como mostrada por diversos autores (CONSOLI et al., 2007; CONSOLI et al., 2009; CONSOLI et al., 2011c; CONSOLI et al., 2017; TENÓRIO, 2019; CONSOLI et al., 2020c), é um dos Parâmetros-Chave na resistência mecânica do solo.

A Figura 39 ilustra o efeito da porosidade por teor de CBCA no comportamento do solo expansivo estudado. A redução do número de vazios (porosidade) proporciona a diminuição do contato entre os grãos de solo, o que conseqüentemente, reduz a expansão do solo, ou seja, quanto maior a porosidade menor a expansão. (TENÓRIO,2019; SILVANI et. al, 2021; CONSOLI et. al, 2020).

Figura 39: Efeito da porosidade por teor de CBCA

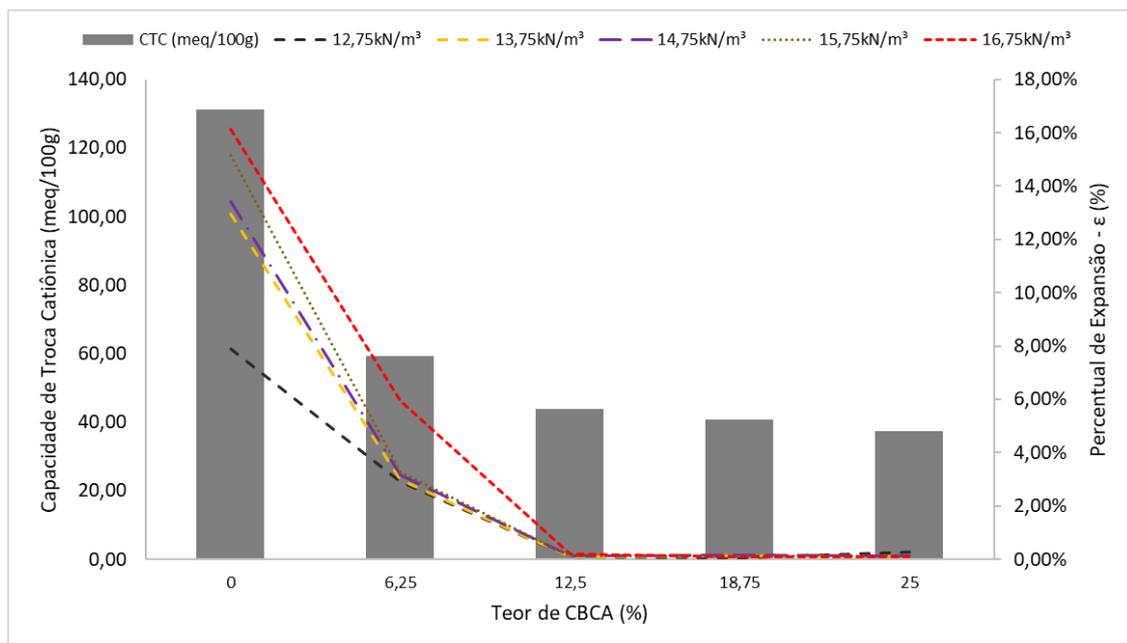


Autoria Própria (2022)

## 5.9 Análise Comparativa entre teor de CBCA x CTC x Expansão

A Figura 40 apresenta uma análise comparativa do efeito da expansão média por teor de CBCA no comportamento da Capacidade de Troca Catiônica do solo expansivo à medida que são incrementados teores de CBCA.

Figura 40: Relação entre teor de CBCA, CTC e Expansão.



À medida que se adiciona CBCA ao solo expansivo, os valores da CTC diminuem consideravelmente, apresentando uma redução de 54,76%; 66,67%; 69,05 e 71,43% respectivamente, para a adição de 6,25%; 12,50%; 18,75% e 25,00% de CBCA. Comportamento similar é observado para o índice de potencial de expansão em relação ao solo puro para cada peso específico avaliado, onde os valores reduzem bruscamente, à medida que o teor de CBCA aumenta.

Os valores reduzidos de CTC indicam que o tratamento com CBCA podem provocar alterações na mineralogia dos solos tratados, tornar os solos mais granulares e com menor potencial de absorção de água. Resultados semelhantes foram encontrados por: Nalbantoglu (2004) ao avaliar a estabilização de solos expansivos com uso de cinzas volantes tipo C. Portanto, pode-se afirmar que há concordância entre os resultados obtidos nos ensaios de expansão com os dados aferidos para capacidade de troca catiônica (CTC) e de superfície específica para o solo puro e para o solo tratado com diferentes teores de CBCA.

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) do solo é definida como a quantidade de cátions necessária para neutralizar as cargas negativas de uma quantidade unitária de solo submetida a determinadas condições, ou seja, a capacidade do solo de reter e trocar cátions para um determinado pH. (NALBANTOGLU,2004) e a elevada superfície específica indica o alto potencial de absorção de água pelas partículas de solo e consequentemente altos índices de expansividade (NALBANTOGLU, 2004).

### **5.10 Ensaio de Compressão Simples**

De acordo com Nalbantoğlu (2004) o pH do solo é um dos fatores cruciais na estabilização. Em geral, o solo apresenta boa reatividade, se apresentar pH superior a 7. Um pH mais alto provou ser eficaz para a dissolução de sílica e alumina, o que contribui para alcançar reações pozolânicas.

Conforme, pode-se verificar na Figura 27, a adição de CBCA ao solo provocou alterações no pH da mistura, no entanto, o pH não atingiu valores alto o suficiente para desencadear reações pozolânicas capazes de conter a expansão e ainda, garantir resistência a compressão simples as misturas avaliadas.

Portanto, o fato do pH das misturas de SOLO+CBCA não atingir valores superior a 12 foi possivelmente, o fator preponderante para a não sobrevivência a inundação, e conseqüentemente a inexistência de resistência a compressão simples dos corpos de prova ensaiados com 6,25%; 12,50% e 18,75% de CBCA. Entretanto, os CPs moldados com 25% de CBCA apresentaram em média 52kPa de resistência a compressão simples, o que pode comprovar que a CBCA apresenta em sua constituição mineralógica pequenas quantidades de material cimentante oriundo dos óxidos de cálcio e magnésio presentes na cinza, no entanto, possivelmente esse material foi todo consumido no processo de estabilização dos altos teores de expansão do solo avaliado.

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões e sugestões para novas pesquisas, que resultaram dos questionamentos surgidos ao término da execução do programa de investigação experimental dessa pesquisa.

### 6.1 Conclusões

Com base nos ensaios realizados, as seguintes considerações finais foram aferidas:

- a) A análise dos resultados permite observar que a CBCA utilizada é um resíduo industrial com grande potencial para uso na estabilização de solos expansivos. Apresentando por exemplo, para adição de teores iguais ou superiores a 12,50% uma redução de 99% no potencial de expansividade do solo estudado. Esse comportamento deve-se provavelmente à constituição da CBCA rica em Óxidos de Magnésio e Cálcio que permitem a troca catiônica e conseqüente floculação dos solos.
- b) Ao avaliar os resultados gráficos do efeito da porosidade na expansão da mistura solo/CBCA, constatar-se que, quanto menor a porosidade da mistura maior sua expansão, para todos os teores de CBCA estudados. Logo estabilização por compactação não é uma solução adequada para solos expansivos.
- c) À medida que se adiciona CBCA ao solo expansivo, ambos os valores da CTC e do potencial de expansão diminuem exponencialmente. A CTC do solo apresentou uma redução de 54,76%; 66,67%; 69,05 e 71,43% respectivamente, para a adição de 6,25%; 12,50%; 18,75% e 25,00% de CBCA. Enquanto, o potencial de expansão foi reduzido em aproximadamente, 65% para adição de 6,25% de CBCA e 99% para teores a partir de 12,50%, 18,75% e 25,00% de CBCA. Comportamento justificado, pois o solo expansivo utilizado apresenta em sua composição mineralógica alto percentual do argilomineral montmorilonita, ou seja, solo com elevada capacidade de troca catiônica. E, a CBCA investigada apresenta altos percentuais de óxidos de magnésio e cálcio ricos em cátions com valência 2+, gerando um ambiente promissor para o desenvolvimento de floculação, onde os cátions de menor valência presentes no solo expansivo possivelmente foram substituídos pelos cátions de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ .
- d) Ao estudar a influência da CBCA na resistência a compressão simples de solos somente o solo tratado com adição de 25,00% de CBCA apresentou resistência a compressão simples mensurável, o que se pode sugerir que, quando adicionada em

menores teores todo o percentual de óxido de magnésio e cálcio presentes na CBCA foram consumidos para contém a expansão do solo. Esse comportamento é justificável pois, o pH do solo não atingiu valores superiores a 12, apesar da adição de CBCA ter elevado o pH original do solo com um incremento de até 4%.

## **6.2 Sugestões**

A partir dos resultados e conclusões obtidas e aqui discutidos segue abaixo algumas sugestões para futuros trabalhos:

- a) Avaliar a resistência a compressão simples de um solo não expansivo melhorado com adições de CBCA, visando analisar o potencial dessa cinza como material cimentante;
- b) Avaliar através de ensaios triaxiais o comportamento de um solo expansivo tratado com adições de CBCA;
- c) Executar ensaios de DRX e FRX em amostras de solos tratados após o ensaio de expansão unidimensional.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADHIKARY, SUDIPTA E JANA, KOYEL. **Potentials of rice-husk ash as a soil stabilizer.** International Journal of Latest Research in Engineering na Technology (IJLRET). Vol. 2, Issue 2, 2016. p 40-48.

AGEITEC. **Adubação: resíduos alternativos.** Campinas, SP, [s.d]. Disponível em: [http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-açúcar/arvore/CONTAG01\\_39\\_711200516717.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-açúcar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html). Acesso em: 16 fev. 2021.

AKINYELE, J. O.; SALIM, R. W.; OIKELOME, K. O.; OLATEJU, O. T. **The use of rice husk ash as a stabilizing agente in lateritic clay soil.** International Science Index, Civil and Environmental Engineering, v. 9, n. 11, p. 1373-1377, 2015.

ALHASSAN, Musa. **Potentials of Rice Husk Ash for Soil Stabilization. Technical Report,** AU J. T. 11 (4): 246-250, 2008.

ALMEIDA, F. C. R.; SALES, A.; MORETTI, J. P.; MENDES, P. C. D. Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 82, p. 31-38, 2015.

ALMEIDA, G. B. de O. Avaliação da Resistência à Compressão Simples de Misturas. **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D4546-14 - Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils**, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM C837 - Standard test method for methylene blue index of clay**, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D4829-11 Standard Test Method for Expansion Index of Soils**, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM. D2487 - Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)**. West Conshohocken, PA: [s.n.], 2017.

AMORIM, S. F. (2004). **Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações geográficas dos solos expansivos e colapsíveis do Estado de Pernambuco (SIGSEC – PE)**. Recife (2004). 244 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

ANOOP, S. P.; BEEGOM, H.; JOHNSON, J.P.; MIDHULA, J.; THARIS, M. T. N.; PRASANTH, S. Potential of Eggshell Powder as Replacement of Lime in Soil Stabilization. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)**, v. 4, n. 8, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solos – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**, Rio de Janeiro, 9 p., 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12007: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional**. Rio de Janeiro, 13 p., 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025 - Solo-cimento: Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio**, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9001 – Sistema de Gestão de Qualidade – Requisitos**, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16137: Ensaios não destrutivos – Identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por fluorescência de raios X e espectrometria por emissão óptica**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458: Grãos de Pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2020.

ATAÍDE, S. O. F. **Análise do comportamento de variação de volume devido à inundação de um solo expansivo quando misturado com areia**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. 117 p. Recife – PE, 2017.

AYALA, C.; J, F.; GIJON, M. F.; MOZO, C.O.; RODRIGUEZ, J. L. S. Mapa previsor de riesgos por expansividad de argillas en España a Escala 1:1.000.000, In: **Geologia Ambiental. Instituto Geologico y Minero de España, Centro de Estudios y Experimentacion de Obras Publicas**, España, Madrid, 1986.

BALTAR, C.A.M.B. Caracterização, Ativação e Modificação Superficial de Bentonitas Brasileiras. In.: **XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, Anais. Volume 3. BALTAR, C.A.M.; OLIVEIRA, J.C.S.; BARBOSA, J.P. (Editores). Recife, p. 10-17, 2003.

BAPTISTA, C. F. N. (1976) **Ensaios Fundamentais para a Pavimentação e Dimensionamentos dos Pavimentos Flexíveis**. Vol. 1, 2ª Edição, Editora Globo, Porto Alegre, RS.

BARBOSA, V. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal**. 2013. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

BARMAN, D.; DASH, S. K. Stabilization of expansive soils using chemical additives: a review. **Journal Of Rock Mechanics And Geotechnical Engineering**, [S.L.], v. 14, n. 4, p. 1319-1342, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.02.011>.

BELL, F. G. Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils. **Engineering Geology**, v. 42, p. 223-237, 1996.

BEZERRA, A. L. (2019) **Análise da Expansão de um Solo no Estado Natural e Compactado com Adição de Cinza de Casca de Arroz do Município De Brejo da Madre de Deus -PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco – Caruaru. 2018.

BRAZ, E. Análise da adequação do mercado produtor de barita e de bentonita para perfuração de poços de petróleo. In.: **XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, Anais. Volume 2. BALTAR, C.A.M.; OLIVEIRA, J.C.S.; BARBOSA, J.P. (Editores). Recife, p. 10-17, 2002.

BRUSCHI, G.J. **Estabilização de rejeitos de mineração de bauxita por meio de um sistema ligante álcali-ativado de cinza do bagaço da cana-de-açúcar e cal de carbureto**. 2020. 184 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

BRUSCHI, G. J.; SANTOS, C. P.; ARAUJO, M. T.; FERRAZZO, S. T.; Marques, S.; CONSOLI, N. C. Green Stabilization of Bauxite Tailings: Mechanical Study on Alkali-Activated Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, p. 06021007, 2021.

CAMAPUM C.; GITIRANA JR, G. (Org.); MACHADO, S. L. (Org.); MASCARENHA, M. M. A. (Org.); SILVA FILHO, F. C. (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1. ed. São Paulo: ABMS, 2015. v. 1. 804p.

CACURO, T. A.; WALDMAN, W. R. Cinzas da queima de biomassa: aplicações e potencialidades. **Revista Virtual de Química**, Sorocaba-SP, v.7, n.6, p. 2154-2165, 2015. Disponível em: < <http://rvq.sbq.org.br/imagebank/pdf/v7n6a17.pdf>>. Acesso em: 28 de Fev. 2021.

CARVALHO, A. L. **Análise do Efeito da Estabilização Mecânica e Física em Matrizes de Terra**. Relatório Final de Iniciação Científica. Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.

CHAITANYA, J. Y.; AMMINEDU, E. Investigation of Soil Stabilization Using Waste Fiber Materials. **International Journal of Recent Trends in Engineering & research**, v. 3, p. 1–7, 2017.

CHAO-LUNG, H.; ANH-TUAN, B. L.; CHUN-TSUN, C. Effect of marble dust on strength and durability of Rice husk ash stabilised expansive soil. **Construction and building materials**, v. 25, n. 9, p. 3768–3772, 2011.

CHENG, Y. et al. Engineering and mineralogical properties of stabilized expansive soil compositing lime and natural pozzolans. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 1031–1038, 2018.

CHRISTOPHER, I. C.; CHIMOB, N. D. Emerging trends in expansive soil stabilization: A review. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, p. 37, 2019.

CONSOLI, N. C. et al. Variables Controlling Stiffness and Strength of Lime-Stabilized. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 138, n. 5, p. 184–192, 2012.

CHEN F. H. **Foundations on Expansive Soils**. Elsevier, Amsterdam, 1975.

CHEN, F.H. **Foundations on Expansive Soils**. Elsevier Science Publishing Company Inc., New York, 1988, 461p.

CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K.; Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. **Construction And Building Materials**, [s. l], v. 23, p. 3352-3358, 18 jun. 2009.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, disponível em:>> <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>>, acessado em março de 2022.

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.; LOPES JÚNIOR, L. S.; FOPPA, D.; HEINECK, K.S. Key Parameters Dictating Strength of Lime/Cement-Treated Soils. **Geotechnical Engineering**, v. 162, p. 111-118, 2009.

CONSOLI, N. C.; FONSECA, A. V.; CRUZ, R. C.; SILVA, S. R. Voids/Cement Ratio Controlling Tensile Strength of Cemented-Treated Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 137, n. 11, p. 1126-1131, 2011a.

CONSOLI, N. C.; LOPES JÚNIOR, L. S.; PRIETTO, P. D. M.; FESTUGATO, L.; CRUZ, R. B. Variables Controlling Stiffness and Strength of Lime Stabilized Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 137, n. 6, p. 628-632, 2011b.

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, A.; CORTE, M. B.; LOPES JÚNIOR, L. S. Porosity-Cement Ratio Controlling Strength of Artificially Cemented Clays. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 23, n. 8, 2011c.

CONSOLI, N. C.; QUIÑÓNEZ, 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.

CONSOLI, N., 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 Material. Civil Engenring**. Eng. 31, 1–10. 2019(a).

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 environmentally friendly binder blends. **Soils and Foundations**, v. 59, n. 5, p. 1428-1439, 2019 (b).

CONSOLI, N. C. et al. Durability Assessment of Soil-Pozzolan-Lime Blends through Ultrasonic-Pulse Velocity Test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 8, p. 04020223, 2020.

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 (a).

CONSOLI, N. C.; SILVA, A.; BARCELOS, A. M.; FESTUGATO, L.; FAVRETTO, F. Porosity/Cement Index Controlling Flexural Tensile Strength of Artificially Cemented Soils in Brazil. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 38, p. 713-722, 2020 (b).

CONSOLI, N.C.; CAICEDO, A. M. L.; SALDANHA, R. B.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; ACOSTA, C. J. M. Eggshell Produced Limes: Innovative Materials for Soil Stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 11, p. 1-7, 2020 (c).

CONSTANTINO, C.de S. **Estabilização de um solo expansivo do município de Paulista com uso de cinza de casca de arroz**. 2018. 97 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

CORDEIRO, G.C. *et al.* Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement & Concrete Composites**, [s. l], n. 30, p. 410-418, 9 jun. 2008.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. Ultrafine Grinding of Sugarcane Bagasse Ash for Application as Pozzolanic Admixture in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 110-115, 2009.

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, 2009a.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, v. 32, n. 1, p. 1-14, 2009b.

CORDEIRO, G. C.; KURTIS, K. E. Effect of Mechanical Processing on Sugarcane Bagasse Ash Pozzolanicity. **Cement and Concrete Research**, v. 97, p. 41-49, 2017.

CORDEIRO, G. C.; ANDREÃO, P. V.; TAVARES, L. M. Pozzolanic Properties of Ultrafine Sugarcane Bagasse Ash Produced by Controlled Burning. **Heliyon**, v. 5, p. 1-6, 2019.

DAHALE, P. P.; NAGARNAIK, P. B.; GAJBHIYE, A. Y. Engineering Behavior of Remolded Expansive Soil with Lime and Fly-ash. *Materials today: Proceedings*, v. 4, n. 9, p. 10581-10585, 2017.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos Parâmetros-Chave no Controle da Resistência de Misturas solo-cinza-cal**. 2009. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

DANG, L. C.; KHABBAZ, H.; NI, B. J. Improving engineering characteristics of expansive soils using industry waste as a sustainable application for reuse of bagasse ash. **Transportation Geotechnics**, [S.L.], v. 31, p. 100637, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100637>.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. *An Introduction to the Rock Forming Minerals*. Longman, Harlow, Essex, 528 pp. 1966.

DIAS, J. J. F. M. S. **Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas**. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2012.

DONAGEMA, G.K., CAMPOS, D.V., CALDERANO, S.B., et al. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. Rio de Janeiro, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Solos, 2011.

DRUMOND, M.A.M. **Avaliação da aplicação da cinza resultante da queima do bagaço da cana-de-açúcar sobre o potencial expansivo de uma argila proveniente do município de paulista-PE**. 2019. 65 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

DIMOND, S.; KINTER, E. B. **Mechanisms of soil lime stabilization: an interpretive review**. Highway Research Record, Washington, n. 92, 1965.

FARIAS, E.R. **A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação - análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental**. 2005, 107 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC/UFSC. Florianópolis, 2005.

FERNANDES FILHO, P.; TORRES, S. M.; ANJOS JÚNIOR, R. H.; PORTO, A. A. V.; BARBOSA, N. P. Solubility of Silicate from Sugarcane Bagasse Ash in Alkaline Solutions. **Trans Tech Publication**, v. 517, p. 477-483, 2012.

FERREIRA, S. R. de M. **Colapso e Expansão em Solos Naturais não Saturados Devido à Inundação**. Tese de Doutorado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1995.

FERREIRA, S. R. M.; FERREIRA, M. G. V. X. Mudanças de volume devido à variação do teor de umidade em um vertissolo no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 779-791, 2009.

FERREIRA, S. R. M. et al. Estabilização de Solos Expansivos de Cabrobó, Paulista e Suape /PE com Cal. **XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. Anais, p.264. Porto de Galinhas/PE, 2012.

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**, 2017.

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, 2018.

FRANÇA, F. C. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: estudo de caso com o produto “RBI Grade 81”**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2003.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress State Variables for Unsaturated Soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 103, 447-446, 1977.

GILLOTT, J. E. Clay in engineering geology. Amsterdam ; New York : Elsevier: New York, NY, U.S.A, 1987.

GONÇALVES, J. C. P. da S. Estudo do teor em água e porosidade como. 2016. Universidade de Lisboa, 2016.

GOMES, C. F. Argilas. O que são e para que servem, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1986, 457p.

GRIM, R. E. **Clay mineralogy**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1953.

GRIM, R. E. Applied Clay Mineralogy, McGraw Hill, New York, NY, 1962.

HAMILTON, J. J. Effects of environment on the performance of shallow foundations. **Canadian Geotechnical Journal**, vol. 6, no. 1, pp. 65-80, 1969.

HANG, P.T., BRINDLEY, G.W. Methylene Blue Absorption by Clay Minerals. Determination of Surface Areas and Cation Exchange Capacities (Clay-Organic Studies XVIII). *Clays Clay Miner.* **18**, 203–212 (1970). <https://doi.org/10.1346/CCMN.1970.0180404>

HUAT, B. K. et al. Utilization of Alkali-Activated Olivine in Soil Stabilization and the Effect of Carbonation on Unconfined Compressive Strength and Microstructure. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 6, p. 1–11, 2017.

IKEAGWUANI, C. C.; NWONU, D, C. Emerging Trends In Expansive Soil Stabilization: A Review. **Journal Of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 11, p. 423-440, 2019.

IKIZLER, B.; AYTEKIN, M.; TURKER; YAVUZ; Hİ. **Effect of fibers on swelling characteristics of bentonite**. 2009.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization: Principles and Practice**. Sidney: Butterworths, p. 374, 1972.

IEA – INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA, disponível em:>> <http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/index.php>>> acessado em março de 2022.

JOHNSON, L.; SNETHEN, D. "Prediction of Potential Heave of Swelling Soil," Geotechnical Testing Journal 1, no. 3: 117-124, 1978.

JONES, L.D., SURVEY, B.G., and Jefferson, I.F. 2015. Expansive soils. **Institution of Civil Engineers Manuals series**, ICE Publishing, 46 pages.

JONES, E. C.; HOLTZ, W. G. Expansive solos – The hidden desastre, Civil Eng. 8, 49–51, 1973.

KESHAVAN, V. Soil Stabilization using Marble Dust and Granite Dust in Clay Soil. **International Journal of Engineering Science and Computing**, v. 7, n. 4, p. 10084–10086, 2017.

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.

KULANTHAIVEL, P.; SOUNDARA, B.; VELMURUGAN, S.; NAVEENRAJ, V. Experimental investigation on stabilization of clay soil using nano-material and white cement. **Materials Today: proceedings**, 2020.

LACERDA, L. S. S. do N. **Análise do Comportamento Geotécnico de Solos de Cabrobó, potencialmente expansivos, estabilizados com Cinza de Casca de Arroz**. 2019. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco – Recife. 2019.

LE ROUX, A. Classification des différentes textures de roches argileuses et marneuses en relation avec leur comportement. Bull. Liaison Labo. P. et Ch., spécial, décembre 1976. p. 39-48, 1976.

LE BLOND, J.S., TOMATIS, M., HORWELL, C.J., DUNSTER, C., MURPHY, F., CORAZZARI, I., GRENDENE, F., TURCI, F., GAZZANO, E., GHIGO, D., WILLIAMSON, B.J., OPPENHEIMER, C. and FUBINI, B. The surface reactivity and implied toxicity of ash produced from sugarcane burning. **Environ. Toxicol.**, 29: 503-516, 2014.

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.

LI, M.; FANG, C.; KAWASAKI, S.; ACHAL, V. Fly Ash Incorporated with Biocement to Improve Strength of Expansive Soil. *Scientific Reports*, v. 8, p. 1-7, 2018.

LIU, Y.; CHANG, C. W.; NAMDAR, A.; SHE, Y.; LIN, C. H.; YUAN, X.; YANG, Q. Stabilization of expansive soil using cementing material from rice husk ash and calcium carbide residue. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 221, p. 1-11, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.157>.

LUKIANCHUKI, J. A. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

MAHLER, C. F., **Análise de obras assentes em solos colapsáveis e expansivos**. Dissertação de D.SC. COPPE/UFRJ, Engenharia Civil, 1994.

MARTINERA, J. F. M. H.; MIDDEENDORF, B.; GEHRKE, M.; BUDELMANN, H. Use of Wastes of the Sugar Industry as Pozzolana in Lime-Pozzolana binders: Study of the Reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 11, p. 1525-1536, 1998.

MELLO, I. S.; CARVALHO, M. A.; FERREIRA, J. N.; COGO, J. M.; SILVA, R. A. R.; GUERRA, D. L. Revisão sobre Argilominerais e suas modificações estruturais com ênfase em aplicações tecnológicas e adsorção – uma pesquisa inovadora em universidades. **Revista de ciências Agro-Ambientais, Alta Floresta**, v. 9, p. 141 - 152, 2011.

MELLO, L. C. A.; ANJOS, M. A. S.; SÁ, M. V. V. A; SOUZA, N. S. L.; FARIAS, E. C. Effect of High Temperatures on Self-Compacting Concrete with High Levels of Sugarcane Bagasse Ash and Metakaolin. *Construction and Building Materials*, v. 248, p. 1-17, 2020.

MENDES, M. e. et al. **A importância da qualidade da água reagente no laboratório clínico**. *J Bras Patol Med Lab*. v. 47. n. 3. p. 217-223. 2011.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. John Wiley & Sons, Nova Jérsei, 2005.

MITCHELL, J. K. *Fundamentals of soil behavior*, 2<sup>nd</sup> Ed. John Willey e sons, inc New York. 422p. 1976.

MORANDINI, T. L. C. **Solos Tropicais e Bentonita: Análise Geotécnica de Misturas com Ênfase na Abordagem Coloidal**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

MORAIS, J.J.O.M. (2017) - **Caracterização Geotécnica da Expansividade de um Solo**

**Argiloso do Município de Paulista-PE.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco – Recife. 2017.

MONROY, R.; ZDRAVKOVIC, L.; RIDLEY, A. Mechanical behaviour of unsaturated expansive clay under K0 conditions. **Engineering Geology**. 197. 112-131, 2015.

MUGGLER, C.; CARDOSO, I.; FONTES, M.; ABRAHÃO, W.; CARVALHO, A. Conteúdos básicos de geologia e pedologia. Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos. Viçosa, 2005.

NALBANTOĞLU, Zalihe. Effectiveness of Class C fly ash as an expansive soil stabilizer. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 18, n. 6, p. 377-381, jul. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.011>.

NELSON, J. D.; MILLER, D. J. Expansive Soils – Problems and practice in foundation and pavement engineering. **John Wiley & Sons, Inc.**, New York, 259p. 1992.

NORRISH, K.; QUIRK, J. Crystalline Swelling of Montmorillonite: Use of Electrolytes to Control Swelling. *Nature* 173, 255–256, 1954.

NUHFER, E. B.; PROCTOR, R. J.; MOSER, P. H. The Citizens' Guide to Geologic Hazards: A Guide to Understanding Geologic Hazards, Including Asbestos, Radon, Swelling Soils, Earthquakes, Volcanoes, Landslides, Subsidence, Floods, and Coastal Hazards. Westminster, CO: **The American Institute of Professional Geologists**, 1993.

NUNES, A. J. C. Fundações em terrenos expansivos. In: **1º Seminário Regional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**, p. 161-190, Salvador, 1978.

OLIVEIRA, E. **Emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão: estudo de caso no município de Ribeirão das Neves/MG.** Dissertação (Mestre em Engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

OLPHEN, H. V. An Introduction to Clay Colloid Chemistry. For clay technologists, geologists, and soil scientists. Interscience (Wiley), New York, 1963.

PAIVA, S. C. de; LIMA, M. A. de A.; FERREIRA, M. da G. de V. X.; FERREIRA, S. R. de M. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. **Matéria** (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 21, n. 2, p. 437-449, jun. 2016.

PAIVA, S.C.P (2016). **Propriedades Geotécnicas de um Solo Expansivo Tratado com Cal.** Tese de Doutorado - Universidade Federal de Pernambuco – Recife, 2016.

PEREIRA, E. M., (2004). **Estudo do Comportamento à Expansão de Materiais Sedimentares da Formação Guabirotuba em Ensaios com Sucção Controlada.** Tese (Doutorado) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos. 227pp.

PETRY, T.; LITTLE, D. Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures—History, Practice, and Future. **Journal of Materials in Civil Engineering - J MATER CIVIL ENG**. 14. 10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:6(447), 2002.

PHANIKUMAR, B. R.. 2016. “Swell-consolidation characteristics of fibre-reinforced expansive soils.” **Soils Foundations**. 56 (1): 138–143.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

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, 2019.

POLIDORI, E. Reappraisal of the Activity of Clays.: activity chart. **Soils And Foundations**, [s. l.], v. 49, n. 3, p. 431-441, jun. 2009

POURAKBAR, S. Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement. **Transportation Geotechnics**, v. 3, p. 24–25, 2015.

PRINKLONSKIJ, V. A. **Gruntovedenie, Vtoria Chast** (Soil Science II) Gosgeolizdat, Moscow, pp.371 in Russian, 1952.

PUPPALA, A. J., T. M. Chittoori. 2013. “Swell and shrinkage characterizations of unsaturated expansive clays from Texas.” Eng. Geol. 164 (Sep): 187–194. SANTOS, C. P.; BRUSCHI, G. J.; MATOS, J. R. G.; CONSOLI, N. C.. Stabilization of gold mining tailings with alkali-activated carbide lime and sugarcane bagasse ash. **Transportation Geotechnics**, v. 32, p. 100704, 2022.

QUISPE, C. C.; CASAGRANDE, M.. D. T. Comportamento de um solo argiloso estabilizado com cinzas de resíduos sólidos urbano sob carregamento estático. **42ª RAPv - Reunião Anual de Pavimentação. 16º ENACOR - Encontro Nacional de Conservação Rodoviária**, 2014, Gramado. RS.

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.

SALDANHA, R.B., CONSOLI, N. C. Accelerated Mix Design of Lime Stabilized Materials, **Journal of Materials in Civil Engineering**, 28 (3), 2016.

SANTOS, M. F., LIMA, D. C., BUENO, B. S. Estabilização dos solos com cal e betume. In: **6º Reunião de pavimentação urbana**, p.74 – 97, Santos – São Paulo, 1995.

SANTOS, M. F., LIMA, D. C., BUENO, B. S. Estabilização dos solos com cal e betume. In: **6º Reunião de pavimentação urbana**, p.74 – 97, Santos – São Paulo, 1995.

SANTOS, C. P. **Estabilização de Rejeito de Mineração de Ouro por Meio da Alcali-Ativação de Cal de Carbureto e Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

SANTOS, C. P.; BRUSCHI, G. J.; MATTOS, J. R. G.; CONSOLI, N. C. Stabilization of gold mining tailings with alkali-activated carbide lime and sugarcane bagasse ash. **Transportation Geotechnics**, [S.L.], v. 32, p. 100704, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100704>.

SAMANIEGO, R. Al. Q. **Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal**. 2015. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

SCHANZ, T.; ELSAWY, M. B. D. Stabilization of highly swelling clay using lime–sand mixtures. **Proceedings of The Institution of Civil Engineers - Ground Improvement**, [S.L.],

v. 170, n. 4, p. 218-230, Nov. 2017. Thomas Telford Ltd. <http://dx.doi.org/10.1680/jgrim.15.00039>.

SECO, A. et al. Sulfate soils stabilization with magnesium-based binders. **Applied Clay Science**, v. 135, p. 457–464, 2017.

SEED, H. B.; WOODWARD, R. J.; LUNDGREN, R. Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 88, 107-131, 1962.

SHARMA, R. S.; PHANIKUMAR, B. R.; RAO, B. V. Engineering Behavior of a Remolded Expansive Clay Blended with Lime, Calcium Chloride, and Rice-Husk Ash. **Journal Of Materials in Civil Engineering**, [S.L.], v. 20, n. 8, p. 509-515, ago. 2008. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2008\)20:8\(509\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2008)20:8(509)).

SHARMA, A. K.; SIVAPULLAIAH, P.V. Ground granulated blast furnaces lagamended fly ash asan expansive soil stabilizer. **Soils And Foundations**, Japanese Geotechnical Society, v. 2, n. 56, p. 205-212, dez. 2015.

SILVA, J. A. (2018) - **Estudo do Comportamento Geotécnico de um Solo Potencialmente Expansivo, Encontrado em Agrestina/PE, Aplicando Cinza de Casca de arroz e Cal como Aditivos Estabilizantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco – Caruaru. 2018.

SINGH, N. B.; SINGH, V. D.; RAI, S. Hydration of Bagasse Ash-Blended Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, v. 30 (9), p. 1485-1488, 2000.

SILVANI, C. **Influência da Temperatura de Cura no Comportamento Mecânico de Misturas Areia-Cinza Volante-Cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SILVANI, C. *et al.* Sand-Fly Ash-Lime Blends: mechanical behavior under multiaxial stress condition. **Journal Of Materials in Civil Engineering**, [S.L.], v. 34, n. 5, p. 1-13, maio 2022. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004199](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004199).

SILVANI, C.; LUCENA, L. C. F. L.; TENORIO, E. A. G.; SCHEUERMANN, F. 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, p. 06020012, 2020.

SILVANI, C.; IBRAIM, E.; SCHEUERMANN F. H. C; FESTUSGATO L.; DIAMBRA, A.; CONSOLI, N. C. Sand-Fly Ash-Lime Blends: Mechanical Behavior under Multiaxial Stress Condition. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 34, p. 04022059, 2022.

SILVANI, C. **Solos Artificialmente Cimentados em Célula Cúbica: Isotropia a Pequenas Deformações e na Ruptura**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

SIMÕES, P. R. M; COSTA FILHO, L. M. Características Mineralógicas, Químicas e Geotécnica de solos expansivos do Recôncavo Bahiano, **Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais para Engenharia, PUCRJ**. 569-588p, 1981.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo de Três Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica**. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

- SKEMPTON, A. W. The colloidal activity of clays. In: **International Conference on Soil Mechanics and Foundations**. 3rd., v.1, p. 57–61, Zurich, Proceeding. Zurich, 1953.
- SNETHEN, D. R.; JOHNSON, L. D.; PATRICK, D. M. An evaluation of expedient methodology for identification of potentially expansive soils. **Soil and Pavements Laboratory**, U.S. Army Eng. Waterway Exp. Sta., Vicksburg, MS, 1977.
- SOUZA, R. F. C. **Estudo da influencia da sucção na pressão de expansão de materiais argilosos com a tecnica da transferencia de vapor**. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo. 2015.
- SOUZA, A. J. **Avaliação da Adição de Polietileno Tereftalato (pet) no Controle da Expansão dos Solos**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2021.
- TOMASI, L. F. **Comportamento Mecânico de Resíduo de Mineração Estabilizado com Cimento**. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2018.
- TAHER, Z. J.; SCALIA, J.; BAREITHER, C. A. Comparative assessment of expansive soil stabilization by commercially available polymers. **Transportation Geotechnics**, v. 24, 2020.
- TENÓRIO, E. A. G. **Controle da Expansão dos Solos com Resíduos de Mármore e Cal**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2019.
- VILLALBA, N. M. K. **Durabilidade, Rigidez e Análise do Ciclo de Vida de um Solo Dispersivo Estabilizado com Cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- YADAV, J. S.; TIWARI, S. Effect of Waste Rubber Fibers on the Geotechnical Properties of Clay Stabilized with Cement. **Applied Clay Science**, v. 149, p. 97-110, 2017.
- WISE, J.; HUDSON, W. **An examination of expansive clay problems in Texas**. Center for Highway Research, Univ. of Texas, Austin, Res. Rep. 118-5, July. 1971.