



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

SAMUEL GADELHA GUIMARÃES

**RELAÇÃO ENTRE EXPANSÃO UNIDIMENSIONAL E TENSÃO DE EXPANSÃO
EM SOLOS EXPANSIVOS TRATADOS COM CAL E CINZA DO BAGAÇO DA
CANA-DE-AÇÚCAR**

Orientadora: Prof^ª. Dra. Carina Silvani

Coorientadora: Prof^ª. Dra. Izabelle Marie Trindade Bezerra

Campina Grande – PB

2023

SAMUEL GADELHA GUIMARÃES

RELAÇÃO ENTRE EXPANSÃO UNIDIMENSIONAL E TENSÃO DE EXPANSÃO EM
SOLOS EXPANSIVOS TRATADOS COM CAL E CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-
AÇÚCAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Geotecnia Ambiental.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Carina Silvani
Coorientadora: Prof^ª. Dra. Izabelle Marie Trindade Bezerra

Campina Grande – PB

2023

G963r

Guimarães, Samuel Gadelha.

Relação entre expansão unidimensional e tensão de expansão em solos expansivos tratados com cal e cinza do bagaço da cana-de-açúcar / Samuel Gadelha Guimarães. – Campina Grande, 2023.

123 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2023.

"Orientação: Profa. Dra. Carina Silvani, Profa. Dra. Izabelle Marie Trindade Bezerra".

Referências.

1. Geotecnia Ambiental. 2. Variação Volumétrica. 3. Estabilização Química. 4. Porosidade/Teor Volumétrico de Cal. I. Silvani, Carina. II. Bezerra, Izabelle Marie Trindade. III. Título.

CDU 624.131(043)

SAMUEL GADELHA GUIMARÃES

RELAÇÃO ENTRE EXPANSÃO UNIDIMENSIONAL E TENSÃO DE EXPANSÃO EM
SOLOS EXPANSIVOS TRATADOS COM CAL E CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-
AÇÚCAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Geotecnia Ambiental.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Carina Silvani
Coorientadora: Prof^ª. Dra. Isabelle Marie Trindade Bezerra

Aprovada em 12/12/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dra. Carina Silvani (Orientadora)
Universidade Federal de Campina Grande

Prof^ª. Dra. Isabelle Marie Trindade Bezerra (Coorientadora)
Universidade Federal de Campina Grande

Prof^ª. Dra. Ana Maria Duarte Gonçalves Mendonça (Membro interno)
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Ph.D. Nilo César Consoli (Membro externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul



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(A): SAMUEL GADELHA GUIMARÃES/ COMISSÃO EXAMINADORA: DR.^a CARINA SILVANI - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR.^a IZABELLE MARIE TRINDADE BEZERRA DA COSTA LIMA - UAEC/UFCG - COORIENTADORA, DR.^a ANA MARIA GONÇALVES DUARTE MENDONÇA - PPGECA/UFCG - EXAMINADORA INTERNA, DR. NILO CESAR CONSOLI - PPGECA/UFRGS – EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 46/2023). / TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “RELAÇÃO ENTRE EXPANSÃO UNIDIMENSIONAL E TENSÃO DE EXPANSÃO EM SOLOS EXPANSIVOS TRATADOS COM CAL E CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 09:00 HORAS / NO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS, BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFCG, EM CAMPINA GRANDE, DE FORMA HÍBRIDA.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, 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, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 12 DE DEZEMBRO 2023**



Documento assinado eletronicamente por **CARINA SILVANI, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/12/2023, às 16:39, 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 12/12/2023, às 16:46, 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 **ANA MARIA GONÇALVES DUARTE MENDONÇA, Usuário Externo**, em 12/12/2023, às 21:38, 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 **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 13/12/2023, às 07:52, 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 **IZABELLE MARIE TRINDADE BEZERRA DA COSTA LIMA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/12/2023, às 12:22, 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 **SAMUEL GADELHA GUIMARÃES, Usuário Externo**, em 13/12/2023, às 16:30, 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 **3990920** e o código CRC **D7EC297D**.

AGRADECIMENTOS

Começo este agradecimento expressando minha gratidão à Deus, fonte inesgotável de sabedoria, força e bênçãos providenciadas durante toda essa jornada acadêmica. À minha família, pilar fundamental em minha trajetória. Suas palavras de encorajamento e suporte foram o alicerce que sustentou minha caminhada.

Minha querida esposa, sua presença foi meu porto seguro ao longo dessa jornada e tantas outras. Seu apoio incondicional, paciência e compreensão foram a força motriz por trás de cada conquista e superação. Você literalmente me ajudou com o desenvolvimento da pesquisa, indo ao laboratório comigo várias vezes me ajudar nos ensaios, suando e engolindo poeira do solo. Obrigado por ser minha inspiração diária e por remar lado a lado comigo neste barco.

À minha orientadora Carina, expresso minha sincera admiração e reconhecimento. Seus conselhos, dedicação e expertise foram cruciais para a realização deste trabalho. Consegui para mim uma bolsa, foi bastante compreensiva e até um amparo emocional em situações adversas que enfrentei, como doenças e quando bati o carro kkk (hoje eu rio, mas foi um choque!). Você nunca mediu esforços para me entender e me ajudar. Agradeço também à coorientadora Isabelle, que chegou depois, tivemos poucos momentos para interação, mas prontamente me ajudou na dissertação. Ambas foram verdadeiras mentoras que contribuíram para este trabalho acadêmico, influenciando no meu crescimento como pesquisador e me ajudando a alcançar este marco importante em minha trajetória.

À banca da defesa da dissertação, expresso minha gratidão pela disponibilidade, pelo debate construtivo e pelas contribuições valiosas para aprimorar este trabalho.

Agradeço aos meus colegas e amigos pelo apoio de diferentes formas, seja através de conversas e companhia, ou contribuições diretas na pesquisa. À nossa turma do online, mas que nos encontramos depois no presencial, Gabriel, Alcidey, Aline, Ingridy, Mateus e Juliette, e a outros que encontrei pela UFCG, como Manoel, Alisson, Leonardo, Lara, Gilson, Luana e Pedro, agradeço por cada momento compartilhado. Especialmente à Pedro, pela amizade e ajuda em vários momentos, e à Juliette, por todas as fofocas e desabafos.

Ao laboratório LEP da UFCG, agradeço a estrutura e recursos disponibilizados, que foram essenciais para a realização dos experimentos e análises que fundamentaram este estudo.

Por fim, expresso gratidão à bolsa de pesquisa fornecida pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ/PB), Edital de bolsas nº 16/2022. Sem esse suporte financeiro, minha jornada acadêmica teria sido muito mais desafiadora.

Este trabalho não seria possível sem o apoio e contribuição de cada um de vocês. Meu mais sincero obrigado por fazerem parte desta jornada e por tornarem este momento possível.

RESUMO

Os solos expansivos, caracterizados por variações volumétricas expressivas em resposta às alterações no teor de umidade, representam um desafio significativo. Ao absorver água, esses solos expandem consideravelmente, podendo gerar danos estruturais devido às forças de elevação resultantes das tensões geradas pela expansão. Para atenuar os problemas associados à variação volumétrica, pode-se empregar a estabilização química do solo expansivo, que envolve a adição de materiais ricos em cálcio e magnésio. Esta pesquisa teve como objetivo investigar o comportamento expansivo de um solo tratado com cal e cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), com foco na relação entre a tensão de expansão e a expansão unidimensional livre das misturas solo/CBCA/cal. Para esse fim, foram conduzidos ensaios em aparelho edométrico, visando determinar a expansão livre e a tensão de expansão das misturas em estudo. As dosagens avaliadas incluíram 6,5% de CBCA, mantendo a umidade inicial de 19%, variando-se o teor de cal (2%, 3% e 4%) e o peso específico seco de compactação (14, 15 e 16 kN/m³). A metodologia adotada baseou-se na relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv}) para avaliar a previsibilidade da expansão livre e da tensão de expansão, buscando estabelecer uma correlação entre essas variáveis por meio do η/L_{iv} . Os resultados indicaram tendência de redução tanto na expansão livre quanto na tensão de expansão do solo. Isso ocorreu à medida que houve aumento do teor de cal e valores menores de peso específico seco, demonstrando também redução com o aumento da porosidade. Essa tendência foi semelhante ao analisar o parâmetro η/L_{iv} e corroborada ao analisar o $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$, tanto para uma mesma faixa do teor de cal quanto para o peso específico seco. Foram conduzidos testes de Adsorção do Azul de Metileno tanto para o solo sem aditivos quanto para as misturas solo/CBCA/cal. Observou-se redução nos valores médios de CTC com o aumento do teor de cal, correlacionando com a diminuição da expansão vertical livre do solo. A análise estatística utilizando ANOVA e o método MQO confirmou correlações significativas entre as variáveis de tensão de expansão e expansão livre, sendo estatisticamente significativas entre si e diretamente proporcionais, variando conjuntamente com as mudanças no teor de cal e no peso específico seco. Por fim, uma equação parametrizada foi desenvolvida para estabelecer uma relação direta entre os parâmetros de tensão de expansão e expansão livre das misturas solo/CBCA/cal.

Palavras-chave: variação volumétrica; estabilização química; porosidade/teor volumétrico de cal.

ABSTRACT

The expansive soils, characterized by significant volumetric variations in response to changes in moisture content, pose a significant challenge. By absorbing water, these soils expand considerably, potentially causing structural damage due to the uplifting forces resulting from the stresses generated by expansion. To mitigate the issues associated with volumetric variation, one can employ chemical stabilization of expansive soil, which involves the addition of materials rich in calcium and magnesium. This research aimed to investigate the expansive behavior of a soil treated with lime and sugarcane bagasse ash (SCBA), focusing on the relationship between the swelling pressure and the free one-dimensional swell of soil/CBCA/lime blends. To achieve this, tests were conducted using an oedometer apparatus to determine the free swell and swelling pressure of the studied mixtures. The evaluated dosages included 6.5% of CBCA, maintaining an initial moisture content of 19%, while varying the lime content (2%, 3%, and 4%) and the compacted dry unit weight (14, 15, and 16 kN/m³). The adopted methodology relied on the porosity/volumetric lime content ratio (η/L_{iv}) to assess the predictability of free swell and swelling pressure, aiming to establish a correlation between these variables through η/L_{iv} . The results indicated a trend of reduction in both free swell and swelling pressure of the soil. This reduction occurred as the lime content increased and lower values of dry unit weight were observed, also demonstrating a decrease with increased porosity. This trend remained consistent when analyzing the parameter η/L_{iv} and was supported by the analysis of $\eta/(L_{iv})^{-0.26}$, both within the same lime content range and for the dry unit weight. Methylene Blue Adsorption tests were carried out for both the soil without additives and for the soil/CBCA/lime blends. A decrease in the average Cation Exchange Capacity (CEC) values was observed with the increase in lime content, correlating with the reduction in free swell of the soil. The statistical analysis using ANOVA and the Ordinary Least Squares (OLS) method confirmed significant correlations between the variables of swelling pressure and free swell, being statistically significant and directly proportional to each other, concurrently varying with changes in lime content and dry unit weight. Finally, a parametric equation was developed to establish a direct relationship between the parameters of swelling pressure and free swell of soil/CBCA/lime blends.

Keywords: volumetric variation; chemical stabilization; porosity/volumetric lime content ratio.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Folhas dos argilominerais: (A) sílica tetraédrica; (B) alumina octaédrica.....	18
Figura 2: Arranjo estrutural molecular de alguns argilominerais: (A) Caulinita; (B) Esmectita; (C) Clorita.....	19
Figura 3: Mecanismo de expansão de um solo argiloso.....	21
Figura 4: Esquema estrutural de uma montmorilonita com os possíveis cátions trocáveis.	22
Figura 5: Carta de plasticidade por atividade da argila e grau de expansão.....	26
Figura 6: Gráfico de potencial e grau de expansão livre por atividade da argila.	27
Figura 7: Carta de plasticidade pelo grau de expansão de um solo.....	27
Figura 8: Relação gráfica entre sucção, teor de umidade e grau de expansão de um solo.....	28
Figura 9: Carta de plasticidade relacionada ao tipo de argilomineral presente num solo.	28
Figura 10: Ocorrência de solos expansivos globalmente.	31
Figura 11: Ocorrência de solos expansivos.	32
Figura 12: Redução da distância basal do argilomineral devido às trocas catiônicas.	40
Figura 13: Reações pozolânicas em uma argila.....	41
Figura 14: Relação ajustada entre o parâmetro porosidade/teor de cal e a expansão vertical.	47
Figura 15: Relação entre η/C_{iv} e módulo de cisalhamento inicial.	48
Figura 16: Relação entre $\eta/(L_{iv})^a$ e a resistência à compressão simples de um solo expansivo.	49
Figura 17: Fluxograma das etapas metodológicas.....	52
Figura 18: Processo de destorroamento: (A) inicialmente; (B) após peneiramento.....	54
Figura 19: Estado da CBCA: (A) <i>in natura</i> ; (B) após peneiramento e requeima.	55
Figura 20: Distribuição granulométrica do solo expansivo com e sem defloculante.....	57
Figura 21: Distribuição granulométrica com e sem defloculante da CBCA.	57
Figura 22: Curva de compactação Proctor do solo expansivo.	58
Figura 23: Classificação do grau de expansão do solo baseado no IP e na fração fina.....	59
Figura 24: Potencial de expansão do solo baseado na quantidade e atividade dos finos.	59
Figura 25: Grau de expansão do solo baseado nos índices de consistência.	60
Figura 26: Difratoograma do solo expansivo.	61
Figura 27: Difratoograma da CBCA.	62
Figura 28: Ensaio de ICL do solo expansivo com a cal.	65
Figura 29: Moldagem dos corpos de prova: (A) molde cilíndrico; (B) prensa; (C) amostra moldado no anel edométrico.....	66
Figura 30: Fluxograma do programa experimental.	68
Figura 31: Valores de CTC do solo puro e das misturas com CBCA e cal.....	70
Figura 32: Valores de ASE do solo puro e das misturas com CBCA e cal.	70
Figura 33: Ensaio de expansão unidimensional para o solo puro.....	72
Figura 34: Gráficos da expansão livre pelo teor de cal, separados pelo peso específico seco: (a) $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$; (b) $\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3$; (c) $\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$	74
Figura 35: Gráficos dos incrementos de tensão de expansão por expansão livre, separados pelo teor de cal e peso específico seco: (a) $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$; (b) $\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3$; (c) $\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$	75
Figura 36: Tensão de expansão pelo teor de cal, separado pelo peso específico seco.	77
Figura 37: Tensão de expansão pelo peso específico seco, separado pelo teor de cal.	78
Figura 38: Expansão livre pelo teor de cal, separado pelo peso específico seco.	79

Figura 39: Expansão livre pelo peso específico seco, separado pelo teor de cal adicionado...	79
Figura 40: Expansão livre pela porosidade das misturas solo/CBCA/cal.	81
Figura 41: Expansão livre em relação à porosidade, pelo teor de cal adicionado.	81
Figura 42: Tensão de expansão pela porosidade das misturas solo/CBCA/cal.	82
Figura 43: Tensão de expansão em relação à porosidade, pelo teor de cal adicionado.	83
Figura 44: Expansão livre em relação à η/L_{iv} pelo teor de cal adicionado.	83
Figura 45: Expansão livre em relação à η/L_{iv} , separado pelo peso específico seco.	84
Figura 46: Tensão de expansão em relação à η/L_{iv} pelo teor de cal adicionado.	85
Figura 47: Tensão de expansão em relação à η/L_{iv} , separado pelo peso específico seco.	85
Figura 48: Expansão livre pelo $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ das misturas.	86
Figura 49: Expansão livre em relação à $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ pelo teor de cal adicionado.	87
Figura 50: Expansão livre em relação à $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ pelo peso específico seco.	87
Figura 51: Tensão de expansão pelo $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ das misturas.	88
Figura 52: Tensão de expansão em relação à $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ pelo teor de cal adicionado.	89
Figura 53: Tensão de expansão em relação à $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ pelo peso específico seco.	89
Figura 54: Tendências da tensão de expansão pela expansão livre, por teor de cal adicionado.	90
Figura 55: Tendências da tensão de expansão pela expansão livre, pelo peso específico seco.	91
Figura 56: Correlação direta entre a expansão livre e a tensão de expansão em relação ao parâmetro $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$	92
Figura 57: Matriz de correlação entre os parâmetros analisados.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais métodos indiretos para identificação de solos expansivos.	24
Tabela 2: Correlação entre índices de Atterberg e grau de expansão de um solo de acordo com: (a) e (f) Chen (1988); (b) Dakshanamurthy e Raman (1973); (c) e (e) Holtz e Gibbs (1956); (d) e (i) Cuellar (1978); (g) Sridharan e Prakash (2000); (h) Seed <i>et al.</i> (1962).	25
Tabela 3: Correlação entre atividade da argila e fração de finos e o grau de expansão.	25
Tabela 4: Correlação entre índices físicos e atividade da argila com o tipo de argilomineral, de acordo com: (a) Skempton (1953); (b), (d) e (f) Das (2016); (c), (e) e (g) Sirivitmaitrie <i>et al.</i> (2008).	25
Tabela 5: Correlação entre o valor de CTC e o tipo de argilomineral.	26
Tabela 6: Correlação entre o valor de ASE e o tipo de argilomineral.	26
Tabela 7: Principais métodos diretos para determinação de solos expansivos.	29
Tabela 8: Correlação entre expansão livre e grau de expansão de um solo.	30
Tabela 9: Correlação entre tensão de expansão e grau de expansão de um solo.	30
Tabela 10: Pesquisas sobre tratamento de solos expansivos com aditivos convencionais.	36
Tabela 11: Principais resultados de aditivos alternativos na estabilização de solos expansivos.	38
Tabela 12: Pesquisas sobre solos expansivos tratados com cal e resultados relevantes.	42
Tabela 13: Correlações de previsão entre expansão livre e tensão de expansão.	50
Tabela 14: Correlações entre índices físicos e parâmetros de expansão do solo.	51
Tabela 15: Propriedades físicas do solo expansivo e CBCA e as normas técnicas referentes.	56
Tabela 16: Classificação do potencial de expansão de um solo.	59
Tabela 17: Resultados do ensaio de FRX do solo expansivo.	61
Tabela 18: Resultados de FRX da CBCA.	62
Tabela 19: Variáveis fixas e controladas das misturas para os ensaios.	65
Tabela 20: Modelos de Regressão analisados.	69
Tabela 21: Classificação do solo quanto ao tipo de argilomineral pelos valores de CTC e ASE.	71
Tabela 22: Classificação do grau de expansão do solo segundo os valores de expansão livre.	73
Tabela 23: Classificação do solo quanto ao grau de expansão e danos possíveis às estruturas.	76
Tabela 24: Análise de variância para significância do Modelo Expansão.	94
Tabela 25: Análise de variância para significância do Modelo Tensão.	94
Tabela 26: Análise de variância para significância do Modelo Tensão x Expansão.	94
Tabela 27: Método MQO para o modelo Expansão.	95
Tabela 28: Método MQO para o modelo Tensão.	95
Tabela 29: Método MQO para o modelo Tensão x Expansão.	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
ASE	Área de Superfície Específica
ASTM	American Society for Testing and Materials
C-A-H	Hidratos de aluminato de cálcio
C-A-S-H	Hidratos de silicato de alumínio de cálcio
CBCA	Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar
CBR	California Bearing Ratio
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
C-S-H	Hidratos de silicato de cálcio
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DRX	Difração de Raio-X
DTA	Análise Térmica Diferencial
FRX	Fluorescência de Raio-X
HRB	Highway Research Board
ICL	Initial Consumption of Lime
IP	Índice de Plasticidade
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentação
LL	Limite de Liquidez
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MQO	Mínimos Quadrados Ordinários
NBR	Norma Técnica Brasileira
R ²	Coefficiente de Determinação
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TGA	Análise Termogravimétrica
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UNICA	União da Indústria de Cana-de-Açúcar

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Solos expansivos.....	17
2.2 Formas de identificação de solos expansivos.....	23
2.3 Ocorrência de solos expansivos	30
2.4 Formas de tratamento de solos expansivos	33
2.4.1 Estabilização dos solos	34
2.5 Estabilização com cal e CBCA	39
2.5.1 Cal	39
2.5.2 Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBCA)	43
2.6 Parâmetro η/L_{iv}	46
2.7 Relação entre expansão livre e tensão de expansão.....	49
3 METODOLOGIA	52
3.1 Materiais.....	53
3.1.1 Solo expansivo	53
3.1.2 Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar	54
3.1.3 Cal	55
3.2 Métodos	55
3.2.1 Preparação das amostras.....	55
3.2.2 Caracterização física	55
3.2.3 Caracterização química	60
3.2.4 Planejamento experimental.....	64
3.2.5 Moldagem dos corpos de prova	66
3.2.6 Ensaios de expansão livre e tensão de expansão.....	66
3.2.7 Porosidade e parâmetro η/L_{iv}	67
3.2.8 Programa experimental	68
3.2.9 Análise estatística	68
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1 Adsorção de azul de metileno	70
4.2 Ensaios de expansão unidimensional do solo	72
4.3 Ensaios de expansão unidimensional das misturas solo/CBCA/cal	73
4.4 Efeito da porosidade e dos parâmetros L_{iv} , η/L_{iv} , $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$	80
4.5 Análise estatística.....	93

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97
5.1 Sugestão de pesquisa futura	98
REFERÊNCIAS	100
APÊNDICE A - MATERIAL COMPLEMENTAR.....	118

1 INTRODUÇÃO

Os solos expansivos, argilas plásticas não saturadas, são aqueles que sofrem variações volumétricas significativas em resposta a alterações no teor de umidade. Isso significa que expandem consideravelmente quando há adição de água e se contraem quando há redução (LAMBE; WHITMAN, 1959; MITCHELL; SOGA, 2005). A expansão volumétrica desses solos pode alcançar até 30% de sua estrutura inicial com o aumento do teor de umidade (LIU *et al.*, 2019a).

Os solos desempenham um papel fundamental na construção civil, uma vez que servem como base para a maioria das obras. No entanto, solos expansivos demandam atenção especial devido à sua variação volumétrica expressiva. Esse comportamento expansivo pode causar danos às edificações e outras estruturas, uma vez que as forças de elevação resultantes das tensões geradas pela expansão podem levar à formação de fissuras, rupturas e outros problemas (CARVALHO *et al.*, 2015; IKEAGWUANI; NWONU, 2019; ZHAO *et al.*, 2014).

Em contrapartida, a retração volumétrica do solo, que ocorre quando há perda de umidade, pode comprometer o suporte das fundações. Isso pode resultar em recalques diferenciais, subsidência e facilitação da infiltração de água em camadas mais profundas, desencadeando fissuras adicionais no solo. Esse ciclo de variação volumétrica gera fadiga e aumenta a suscetibilidade à erosão, originando trincas em pavimentos e falhas em elementos estruturais de aço ou concreto, entre outras patologias (FERREIRA, 1995; PUPPALA; MANOSUTHIKIJ; CHITTOORI, 2013; RIBEIRO, 2019).

Dados revelam que, por volta da década de 1970, nos Estados Unidos, eram destinados cerca de 2 bilhões de dólares anuais para soluções geotécnicas voltadas para problemas associados aos solos expansivos (OLIVEIRA; JESUS; MIRANDA, 2006; SANTOS, 2017). Em períodos mais recentes, China e Reino Unido têm despendido milhões de dólares anualmente em manutenção e reparos de solos e edificações, enquanto a Austrália já detectou problemas relacionados a solos expansivos em cerca de 20% de seu território nacional (CONSOLI *et al.*, 2019b; FERREIRA *et al.*, 2018; KULANTHAIVEL *et al.*, 2021).

Para mitigar ou eliminar os problemas associados à variação volumétrica, podem ser adotados procedimentos e técnicas para estabilizar os solos expansivos. Em muitos casos, a estabilização química do solo se apresenta como uma solução eficaz e viável. Essa abordagem envolve a adição de materiais ao solo expansivo, como a cal, cimento, cinzas volantes, pó de brita, cloretos e outros resíduos e materiais ricos em cálcio e magnésio (ATAHU; SAATHOFF; GEBISSA, 2019; BROOKS, 2009; CONSOLI *et al.*, 2020b; KUMAR; KUMAR, 2020;

MANSO *et al.*, 2013; PAIVA *et al.*, 2016; PHANIKUMAR; SREEDHARAN; ANIRUDDH, 2015; SILVANI, 2013; SILVANI *et al.*, 2020, 2023).

A aplicação de materiais ricos em cálcio e magnésio resulta no aumento da condutividade elétrica devido ao acréscimo na concentração de cátions na água dos poros, como Ca^{+2} e Mg^{+2} . Isso desencadeia uma troca catiônica simultânea entre a argila e o aditivo, o que leva ao aumento do potencial osmótico e à diminuição das forças repulsivas entre as superfícies de argila. Essa troca catiônica promove a floculação instantânea e reduz as áreas disponíveis para interação com a água. Portanto, todos esses processos contribuem para a redução do potencial expansivo do solo (DANG; KHABBAZ; NI, 2021; MITCHELL; SOGA, 2005).

Conforme observado por Silvani *et al.* (2023), a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) demonstra potencial na redução da expansão do solo, devido aos consideráveis teores de óxido de cálcio e magnésio em sua composição. Esses componentes contribuem para a floculação e trocas catiônicas, resultando na redução da expansão, um comportamento semelhante às reações provocadas pela cal no solo (DRUMOND, 2019; SILVANI; SILVA; GUEDES, 2023). A eficácia da CBCA foi amplamente investigada tanto em concreto quanto em solos, uma vez que os altos teores de sílica e alumina presentes na CBCA contribuem para o surgimento de produtos cimentantes e reações pozolânicas necessárias para o aumento da resistência mecânica de ambos os materiais (BAHURUDEEN *et al.*, 2015; CHUSILP; JATURAPITAKKUL; KIATTIKOMOL, 2009; CORDEIRO *et al.*, 2008; KHAN; KANTROO; SOBTI, 2021; RAMÍREZ *et al.*, 2012).

Além disso, o uso da CBCA na estabilização de solos expansivos pode contribuir para a redução da quantidade de resíduos provenientes das indústrias sucroalcooleiras, oferecendo ao mesmo tempo uma alternativa ambientalmente adequada para o descarte desse resíduo. Isso pode aumentar o potencial de reciclagem e uso da CBCA como estabilizante químico para solos expansivos (AL-KALILI; ALI; AL-TAIE, 2022; MELESE, 2017; WUBSHET; TADESSE, 2014).

Nesse contexto, essa pesquisa tem como objetivo avaliar o potencial de estabilização de solos expansivos tratados com cal e cinzas provenientes da queima do bagaço da cana-de-açúcar, com ênfase na determinação de uma relação direta entre a expansão unidimensional livre e a tensão de expansão gerada em um solo expansivo. Destaca-se, assim, a abordagem técnica e científica deste estudo e, sobretudo, sua relevância para a sustentabilidade ambiental.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa consiste em estabelecer a relação entre a tensão de expansão e a expansão unidimensional livre de um solo expansivo tratado com cal e cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o impacto da adição de teores de cal e do peso específico seco de compactação no comportamento expansivo das misturas solo/CBCA/cal;
- Investigar a viabilidade de prever a expansão livre das misturas solo/CBCA/cal com base no coeficiente de porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv});
- Avaliar a possibilidade de prever a tensão de expansão das misturas solo/CBCA/cal por meio do coeficiente de porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv});
- Analisar a capacidade de prever a tensão de expansão com base tanto na expansão unidimensional livre quanto no coeficiente de porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv}) das misturas solo/CBCA/cal.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, serão abordados os principais tópicos relacionados à pesquisa em questão, com base nas descobertas e comprovações encontradas na literatura. Os temas abordados incluem o comportamento de solos expansivos, o processo de estabilização de solos e o uso de aditivos como a cal e a CBCA.

2.1 Solos expansivos

Solos expansivos são suscetíveis a variações volumétricas devido às mudanças em seu teor de umidade. Expandem-se quando a umidade aumenta e contraem-se quando há redução, um fenômeno que está associado às flutuações sazonais. Durante períodos de estiagem, esses solos apresentam uma superfície bastante fissurada devido à contração (LAMBE; WHITMAN, 1959; MITCHELL; SOGA, 2005).

As mudanças nas propriedades dos solos argilosos expansivos estão associadas a diversos fenômenos, incluindo a perda de resistência ao cisalhamento à medida que absorvem umidade, gerando poropressões negativas. Além disso, ocorrem alterações na macroestrutura do solo durante os processos cíclicos causados pelas condições climáticas (MITCHELL; SOGA, 2005; SEED; WOODWARD JUNIOR; LUNDGREN, 1962).

De acordo com Snethen (1979), as condições climáticas semiáridas tendem a induzir um comportamento particularmente prejudicial nos solos expansivos. Esse tipo de clima caracteriza-se por períodos significativos de umedecimento e secagem, que levam à expansão e contração cíclica dos solos a cada ano. Ao longo dos anos ou ciclos, esse processo provoca fissuras no solo, resultando em movimentos diferenciais significativos em diversas construções (ROSENBALM; ZAPATA, 2016).

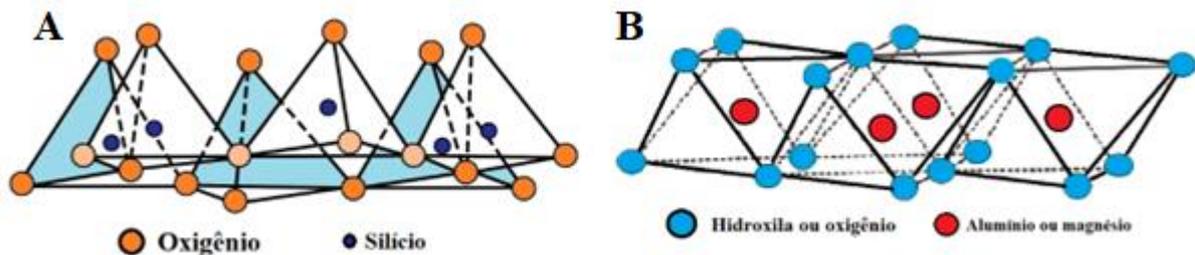
A instabilidade volumétrica de um solo é influenciada e determinada por fatores internos e externos. Os fatores internos, mais preponderantes e determinantes, compreendem elementos geológicos que caracterizam as propriedades intrínsecas do solo, tais como sua composição mineralógica e química, densidade e teor de umidade. Por outro lado, os fatores externos incluem elementos ambientais, hidrogeológicos e as condições de carga aplicadas ao solo (FERREIRA, 1995; OLARTE; CAVALCANTE, 2023; QI *et al.*, 2020).

Conforme Puppala *et al.* (2013) e Silva *et al.* (2020), a instabilidade volumétrica em solos expansivos é atribuída a fatores internos, relacionados à própria formação geológica e à

estrutura laminar dos argilominerais, que englobam as montmorilonitas (um grupo das esmectitas) e as vermiculitas.

Os argilominerais são da classe de minerais de filossilicatos, caracterizados por sua estrutura cristalina laminar. A estrutura molecular de um argilomineral é composta por várias camadas, resultantes da combinação de folhas tetraédricas e octaédricas empilhadas. Os tetraedros consistem em um átomo central de silício (Si) cercado por quatro átomos de oxigênio (O), enquanto os octaedros são compostos por um átomo central de alumínio (Al) rodeado por seis átomos de oxigênio (O) (MITCHELL; SOGA, 2005; VELDE; MEUNIER, 2008). A Figura 1A ilustra a estrutura planar de uma folha tetraédrica de sílica, enquanto a Figura 1B mostra a folha octaédrica de alumina.

Figura 1: Folhas dos argilominerais: (A) sílica tetraédrica; (B) alumina octaédrica.



Fonte: Adaptado de Mitchell e Soga (2005).

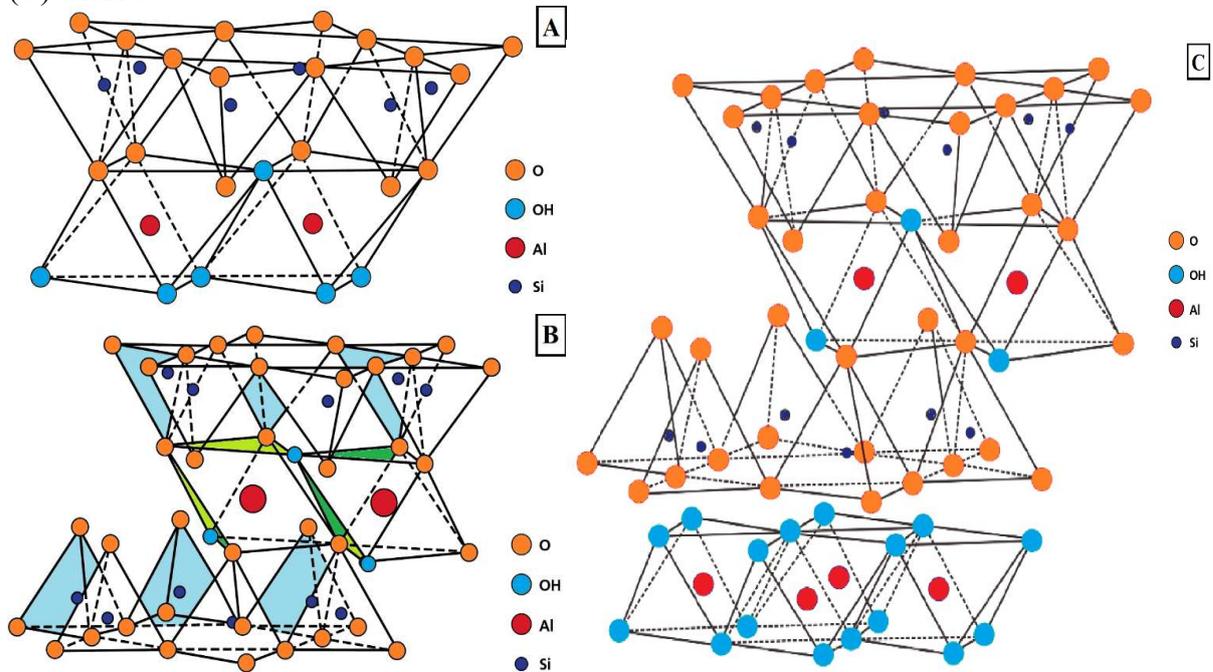
Essas folhas se combinam sucessivamente para criar camadas alternadas em proporções específicas, originando os diferentes tipos de argilominerais. Os principais tipos incluem os grupos das caulinitas, esmectitas, ilitas e cloritas (MITCHELL; SOGA, 2005).

As caulinitas se organizam na proporção de uma camada tetraédrica para uma camada octaédrica (ou seja, 1:1) e são mais estáveis e menos suscetíveis à retenção de água. As esmectitas apresentam camadas alternadas na proporção de duas folhas tetraédricas para uma folha octaédrica (2:1). Esse grupo, com destaque para a montmorilonita, é conhecido por sua capacidade expansiva na presença de água. As ilitas possuem uma estrutura 2:1, semelhante à esmectita, mas com uma menor capacidade de expansão. As cloritas exibem uma estrutura mais complexa no arranjo 2:1:1, consistindo em duas folhas tetraédricas e uma folha octaédrica intercaladas com mais uma folha octaédrica. As cloritas são consideradas não expansivas (MITCHELL; SOGA, 2005; VELDE; MEUNIER, 2008).

Na Figura 2, apresentam-se representações das estruturas de alguns argilominerais, incluindo a caulinita (1:1), a esmectita (2:1) e a clorita (2:1:1). Além desses grupos, outros tipos de argilominerais incluem a haloisita (1:1), talco e pirofilita, que possuem uma estrutura 2:1,

mas não-expansivos, bem como o grupo das vermiculitas (2:1), que são expansivas (PUPPALA; MANOSUTHIKIJ; CHITTOORI, 2013; VELDE; MEUNIER, 2008).

Figura 2: Arranjo estrutural molecular de alguns argilominerais: (A) Caulinita; (B) Esmectita; (C) Clorita.



Fonte: Adaptado de Mitchell e Soga (2005).

As argilas de estrutura 2:1 (Figura 2B), geralmente, têm sua origem na decomposição de rochas sedimentares e metamórficas por meio do processo de intemperismo. No caso da montmorilonita, as extremidades dos tetraedros compartilham oxigênio e hidroxilas com a camada octaédrica, resultando na formação de uma única camada (CARVALHO *et al.*, 2015; IKEAGWUANI; NWONU, 2019).

É conhecido que as partículas da argila apresentam cargas superficiais negativas devido à substituição isomórfica. Para manter a neutralidade, cátions são atraídos para a superfície negativa dessas partículas. A quantidade de cátions necessária para neutralizar a carga negativa superficial do argilomineral é denominada Capacidade de Troca Catiônica (CTC) (HERZOG; MITCHELL, 1963).

Além disso, Ferreira (1995) e Oliveira *et al.* (2006) acrescentam que o potencial de expansão do solo está relacionado ao arranjo estrutural de seus argilominerais, à CTC e à sucção do solo. Solos com maior Área de Superfície Específica (ASE) geralmente apresentam uma CTC mais elevada, maior atividade de superfície e, conseqüentemente, maior capacidade de retenção de água (MITCHELL; SOGA, 2005).

Assim, durante essas trocas catiônicas, surgem forças eletrostáticas entre a superfície negativa da argila e os cátions trocáveis presentes no fluido dos poros da argila, cuja intensidade depende da química do cátion trocável (carga, posição e valência). Como resultado, forma-se uma "camada dupla difusa" elétrica ao redor das partículas de argila (OLPHEN, 1977; TANYILDIZI; UZ; GÖKALP, 2023).

Essas forças de interação entre duas partículas de argila imersas em um eletrólito consistem principalmente em duas componentes: a atração de curto alcance de Van der Waals e a repulsão eletrostática de longo alcance, conhecida como a força repulsiva da camada dupla difusa. Portanto, a expansibilidade da argila está diretamente relacionada à repulsão gerada pela camada dupla difusa (DASH; HUSSAIN, 2012; OLPHEN, 1977).

É evidente que a camada dupla difusa exerce uma influência considerável sobre todas as propriedades geotécnicas dos solos argilosos, especialmente no comportamento de variação volumétrica de um solo expansivo e na condutividade hidráulica. Espera-se que o aumento da espessura da camada dupla difusa reduza a condutividade hidráulica. Isso fornece o contexto para o comportamento de expansão e contração dos solos expansivos mediante às variações de umidade (CARVALHO *et al.*, 2015; IKEAGWUANI; NWONU, 2019).

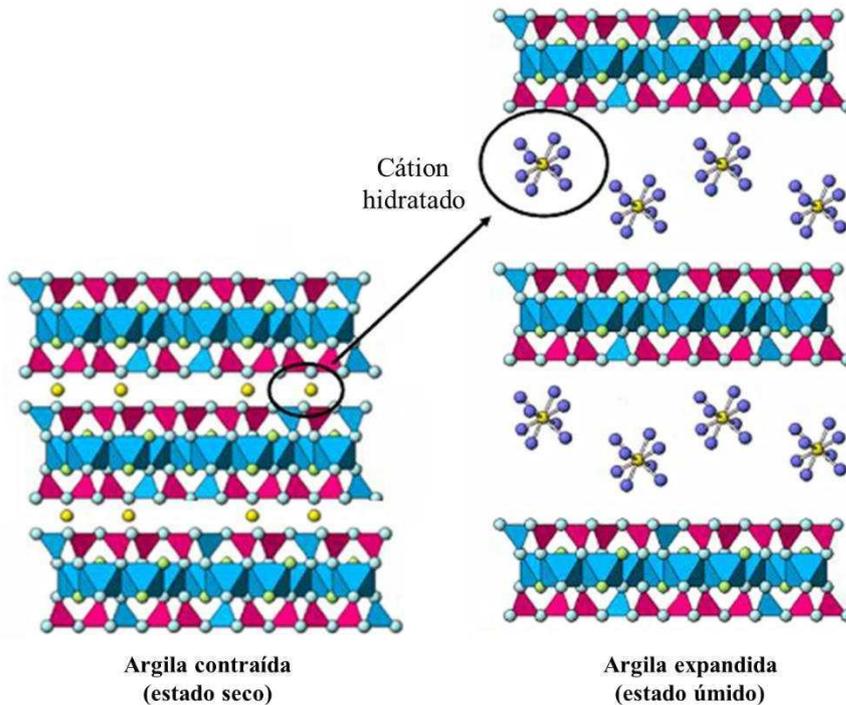
De forma geral, é possível observar duas fases de expansão nas argilas expansivas quando a água penetra no solo. Na primeira fase, a água hidrata os cátions trocáveis presentes entre as superfícies internas dos argilominerais, reduzindo as forças de atração entre as camadas e permitindo a penetração de mais água. Isso resulta em forças adicionais e no aumento da distância basal do argilomineral, caracterizando essa expansão como intracristalina. Uma vez que os argilominerais apresentam carga negativa, as partículas adsorvem cátions presentes nos fluidos e moléculas de água para alcançar o equilíbrio químico. Esse processo resulta em uma alteração na carga, levando ao aumento da distância entre os minerais e à consequente expansão do maciço de solo (BOLT, 2015; MITCHELL; SOGA, 2005).

Na segunda fase, a camada dupla difusa se forma entre as partículas, gerando uma força repulsiva devido às interações eletrostáticas entre a carga superficial negativa, os íons presentes na argila e as moléculas de água nos vazios. Isso provoca a repulsão elétrica entre duas camadas, levando a uma expansão conhecida como expansão osmótica (IKEAGWUANI; NWONU, 2019; NALBANTOĞLU, 2004).

Em resumo, a expansividade intrínseca (intracristalina + osmótica) modifica a estrutura original do solo devido às variações no teor de umidade e nas oscilações da sucção. Quando a água é introduzida no sistema, a sucção diminui e o volume do solo aumenta, e vice-versa

(PUPPALA; MANOSUTHIKIJ; CHITTOORI, 2013). A Figura 3 ilustra o comportamento expansivo de um solo argiloso.

Figura 3: Mecanismo de expansão de um solo argiloso.



Fonte: Adaptado de Tanyldizi *et al.* (2023).

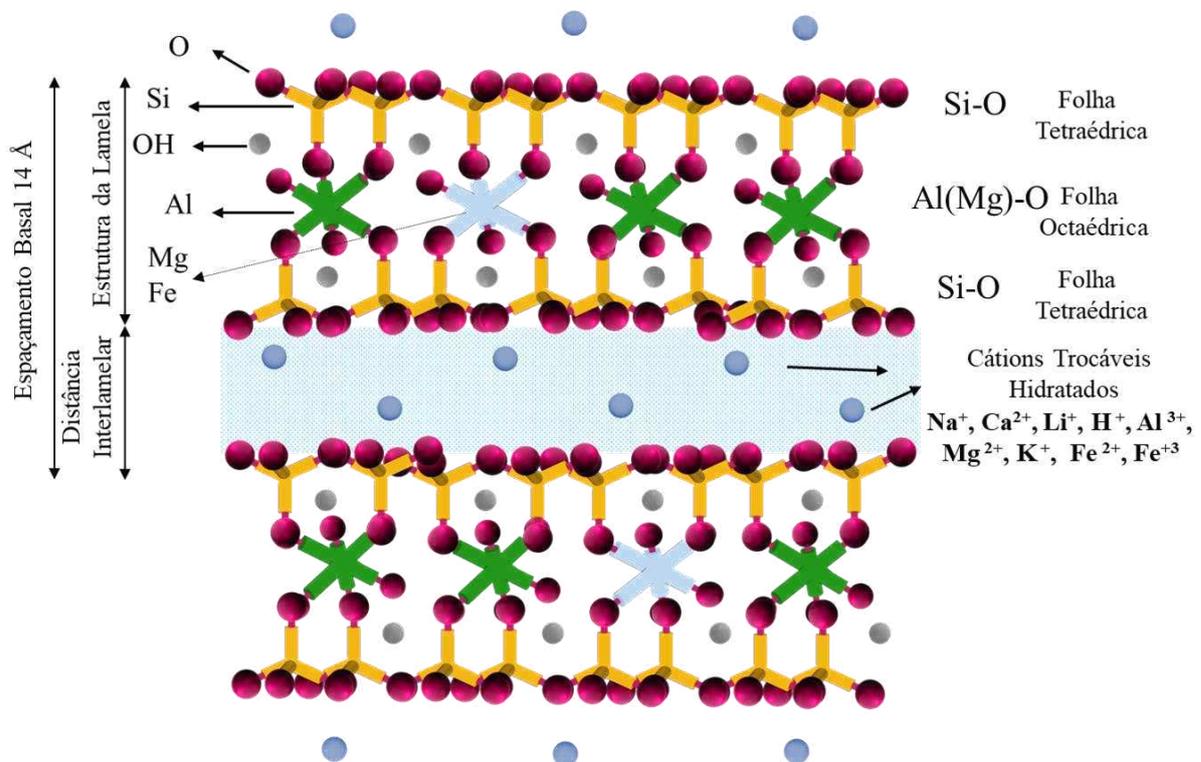
As argilas com estrutura 2:1 apresentam uma imperfeição natural devido ao desequilíbrio nas cargas químicas mencionado anteriormente. A expansão das montmorilonitas é significativamente mais acentuada do que em outras argilas, devido à pressão osmótica resultante das diferenças na concentração de íons dentro e fora da camada difusa (BOLT, 2015). Portanto, as montmorilonitas exibem propriedades expansivas significativas devido à deficiência de carga na estrutura e à presença de uma ligação de Van der Waals mais fraca entre duas folhas de sílica adjacentes, mantendo uma distância interbasal maior se comparado com as outras estruturas. Isso permite que a água e os cátions trocáveis penetrem rapidamente e separem as camadas primárias. Logo, um solo rico em montmorilonita tem maior tendência à expansão (BARMAN; DASH, 2022).

Entretanto, como mencionado anteriormente, nem todos os tipos de argilas com estrutura 2:1 são expansivas, como as ilitas, talco e pirofilita. Porém, os grupos das esmectitas e vermiculitas apresentam todas as características e propriedades expansivas discutidas até aqui

(MITCHELL; SOGA, 2005; PUPPALA; MANOSUTHIKIJ; CHITTOORI, 2013; VELDE; MEUNIER, 2008).

Na Figura 4, apresenta-se um esquema da estrutura de uma montmorilonita, destacando os diversos cátions hidratados possíveis para a substituição isomórfica (proveniente das trocas de íons trivalentes por sílica na folha tetraédrica e de íons trivalentes ou divalentes na folha octaédrica). Além disso, a figura ilustra a distância interplanar basal de 14 Å e a distância interlamelar entre duas camadas.

Figura 4: Esquema estrutural de uma montmorilonita com os possíveis cátions trocáveis.



Fonte: Adaptado de Odom (1984).

Os íons de troca mais comuns incluem Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ e H⁺, embora outros, como K⁺, Al³⁺, Fe²⁺, Fe³⁺ e Li⁺, ocorram em menor frequência. Quando o Na⁺ é o íon de troca predominante, o solo pode exibir uma alta capacidade de expansão, resultando em dispersão e alta viscosidade natural (GOODARZI; AKBARI; SALIMI, 2016; SECO *et al.*, 2011).

Ao adicionar água, as propriedades químicas e de hidratação do Na⁺ fazem com que os cristais se separem e se dispersem. O potencial elétrico resultante leva as partículas a se repelirem mutuamente, culminando em um estado coloidal devido ao tamanho extremamente pequeno das partículas dos cristais. Vale destacar que os cátions de maior valência têm maior

facilidade em substituir os cátions de menor valência (MITCHELL; SOGA, 2005; ODOM, 1984).

Portanto, as argilas mais reativas são aquelas com concentração significativa de cátions de sódio disponíveis para troca iônica. Por outro lado, as menos reativas geralmente contêm cátions bivalentes, que têm uma afinidade menor com a água. Isso significa que os solos contendo montmorilonita- Na^+ tendem a apresentar maior potencial expansivo que outros tipos de argilominerais (PUPPALA; MANOSUTHIKIJ; CHITTOORI, 2013).

Além disso, os tipos e concentrações de cátions na solução aquosa ao redor das partículas de argila influenciam a facilidade com que a água é absorvida e liberada pela argila. As concentrações de cátions também afetam a floculação das partículas de argila, desempenhando um papel nos padrões de comportamento do solo (PUPPALA; MANOSUTHIKIJ; CHITTOORI, 2013; SECO *et al.*, 2011).

Por fim, a adição de substâncias químicas ao solo pode impactar a retenção de água pelas partículas de argila, influenciando, assim, o comportamento de variação volumétrica da argila (GOODARZI; AKBARI; SALIMI, 2016; MITCHELL; SOGA, 2005; TIWARI; SATYAM; PUPPALA, 2021).

2.2 Formas de identificação de solos expansivos

Além dos perigos associados à expansão dos solos em estruturas civis e à extensa contração (perda de água), que resulta em recalques visíveis, esse problema pode causar outros danos significativos. Portanto, a identificação adequada de solos expansivos na fase pré-construção é um pré-requisito essencial.

Existem procedimentos recomendados e comuns para a identificação de solos expansivos, que variam desde a avaliação local de manifestações patológicas típicas (danos estruturais, retração e fissuras nos solos), até o uso de técnicas geotécnicas para confirmação e caracterização por meio de ensaios de laboratório.

A análise de técnicas e ensaios para determinar a expansão do solo divide-se em métodos diretos e indiretos. De maneira geral, os métodos indiretos estabelecem correlações entre a expansão do solo e parâmetros físico-químicos, enquanto os métodos diretos determinam a medida real do potencial de expansão do solo.

Os métodos indiretos são úteis como indicativos iniciais na identificação de solos expansivos. Todavia, é importante destacar que suas correlações nem sempre são definitivas e determinísticas. Eles servem como suporte técnico para fundamentar a suspeita de que um solo

é expansivo. Em outras palavras, quando se possui conhecimento prévio sobre a natureza expansiva de um solo, os métodos indiretos podem corroborar essa informação. No entanto, o oposto nem sempre é verdadeiro; ou seja, a identificação de um solo como expansivo por meio de um método indireto não garante que esse solo seja expansivo, conforme determinado por um método direto.

Os métodos indiretos podem ser divididos em três categorias: identificativos, qualitativos e orientativos. A Tabela 1 apresenta os principais métodos por categoria. A seleção do método mais apropriado para se empregar depende dos objetivos da análise e da disponibilidade de dados. No entanto, é importante reconhecer as limitações dos métodos indiretos e a necessidade de confirmação por meio de métodos diretos, sempre que possível, para uma avaliação mais precisa do potencial de expansão do solo.

Tabela 1: Principais métodos indiretos para identificação de solos expansivos.

CATEGORIA	MÉTODOS INDIRETOS
Identificativos	Difração de Raios-X (DRX), Fluorescência de Raio-X (FRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Análise térmica diferencial (DTA), Análise termogravimétrica (TGA), Adsorção de etilenoglicol e glicerina, Adsorção de azul de metileno, Análise por sedimentação coloidal.
Qualitativos	Granulometria, índices de Atterberg, índices físicos, classificações geotécnicas (SUCS, HRB).
Orientativos	Geologia, geomorfologia, pedologia e identificação visual.

Fonte: Adaptado de Silva (2022, 2018).

A análise física do solo inclui a determinação da granulometria, dos limites de Atterberg, dos índices físicos e atividade da argila. Por outro lado, a análise química envolve o teste de adsorção do azul de metileno que determina a CTC e a ASE, técnicas para a análise termogravimétrica (TGA), análise térmica diferencial (DTA) e análise química da mineralogia do solo. A mineralogia pode ser identificada por meio de técnicas de DRX, FRX e MEV, em que permitem identificar a composição dos principais minerais presentes no solo, e determinam o tipo e a quantidade de argilomineral presente (BARMAN; DASH, 2022; MITCHELL; SOGA, 2005; PUPPALA; MANOSUTHIKIJ; CHITTOORI, 2013).

Com a análise físico-química do solo e a utilização de correlações obtidas por meio de métodos indiretos, é possível estabelecer várias classificações do potencial expansivo de um solo, o que é amplamente documentado na literatura.

A Tabela 2 oferece correlações de autores que relacionaram valores dos índices de consistência de Atterberg com o grau de expansão de um solo.

Tabela 2: Correlação entre índices de Atterberg e grau de expansão de um solo de acordo com: (a) e (f) Chen (1988); (b) Dakshanamurthy e Raman (1973); (c) e (e) Holtz e Gibbs (1956); (d) e (i) Cuellar (1978); (g) Sridharan e Prakash (2000); (h) Seed *et al.* (1962).

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
Grau de Expansão	Limite de Liquidez (LL %)		Limite de Contração (%)		Índice de Plasticidade (IP %)				
Baixo	< 30	20-35	> 13	> 15	< 20	0-15	< 15	< 10	< 15
Médio	30-40	35-50	8-18	11-15	12-34	10-35	15-30	10-20	15-25
Alto	40-60	50-70	6-12	8-11	23-45	20-55	30-60	20-35	25-35
Elevado	> 60	> 70	< 10	< 10	> 32	> 35	> 60	> 35	> 35

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 3 mostra a correlação entre o grau de expansão e a atividade da argila proposta por Skempton (1953) e a fração (%) de finos presentes em um solo, como proposto por Holtz e Gibbs (1956).

Tabela 3: Correlação entre atividade da argila e fração de finos e o grau de expansão.

Grau de Expansão	Critério de Skempton (1953)	% finos – Holtz e Gibbs (1956)	Atividade da Argila
Baixo	< 0,75	< 17	Inativo
Médio	0,75 – 1,25	12 – 27	Pouco ativo
Alto	1,25 – 2,0	18 – 37	Ativo
Elevado	> 2,0	> 27	Muito ativo

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 4 fornece correlações entre faixas de valores de atividade da argila e índices de Atterberg que determinam o possível argilomineral predominante num solo.

Tabela 4: Correlação entre índices físicos e atividade da argila com o tipo de argilomineral, de acordo com: (a) Skempton (1953); (b), (d) e (f) Das (2016); (c), (e) e (g) Sirivitmaitrie *et al.* (2008).

Argilomineral	a	b	c	d	e	f	g
	Atividade da argila			Limite de Liquidez (LL %)		Limite de Plasticidade (LP %)	
Caulinita	0,3-0,5	0,3-0,5	0,5	35 - 100	30 - 110	20 - 40	25 - 40
Ilita	0,9-1,0	0,5-1,2	0,5-1,0	60 - 120	60 - 120	35 - 60	35 - 60
Montmorilonita	1,5-7,2	1,5-7,0	1,0-7,0	100-900	100-900	50 - 100	50 - 100

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 5 apresenta a relação entre valores típicos de CTC propostos por alguns autores e o tipo de argilomineral, enquanto a Tabela 6 mostra essa relação com valores de ASE.

Tabela 5: Correlação entre o valor de CTC e o tipo de argilomineral.

	Santos (1975)	Mitchell e Soga (2005)	Reichert (2009)	Silva <i>et al.</i> (2018)	Kumari e Mohan (2021)
Argilomineral	Capacidade de Troca Catiônica (meq/100g)				
Caulinita	3 – 15	5	3 – 15	0 – 5	3 – 15
Ilita	10 – 40	25	10 – 40	10 – 40	10 – 40
Montmorilonita	80 - 150	85	80 – 150	40 - 150	80 – 120
Vermiculita	-	150	100 - 150	-	100 – 150
Clorita	-	40	-	5 - 10	10 - 40

Fonte: Autoria própria.

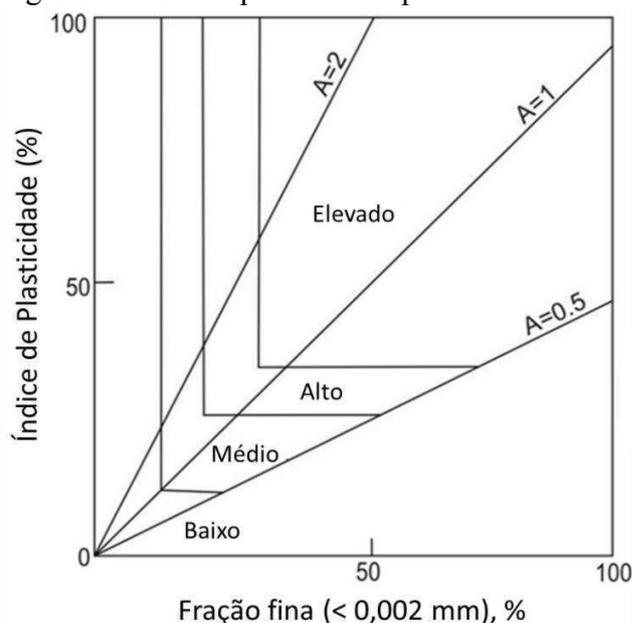
Tabela 6: Correlação entre o valor de ASE e o tipo de argilomineral.

	Mitchell e Soga (2005)	Kuo e Liao (2006)	Reichert (2009)	Kumari e Mohan (2021)
Argilomineral	Área de Superfície Específica (m ² /g)			
Caulinita	10 – 20	5 - 40	7 – 30	5 – 40
Ilita	65 – 100	60 – 250	40 – 150	10 – 100
Montmorilonita	50 – 800	450 - 800	600 – 800	40 – 800
Vermiculita	40 - 80	300 – 500	500 - 800	500 - 800

Fonte: Autoria própria.

Algumas dessas correlações foram propostas por meio de gráficos e cartas que mostram a relação entre alguns parâmetros físicos com o potencial grau de expansão de um solo. A Figura 5 apresenta uma carta que relaciona o índice de plasticidade, a fração fina do solo, a atividade da argila e o grau de expansão proposta por Skempton (1953) e Merwe (1964).

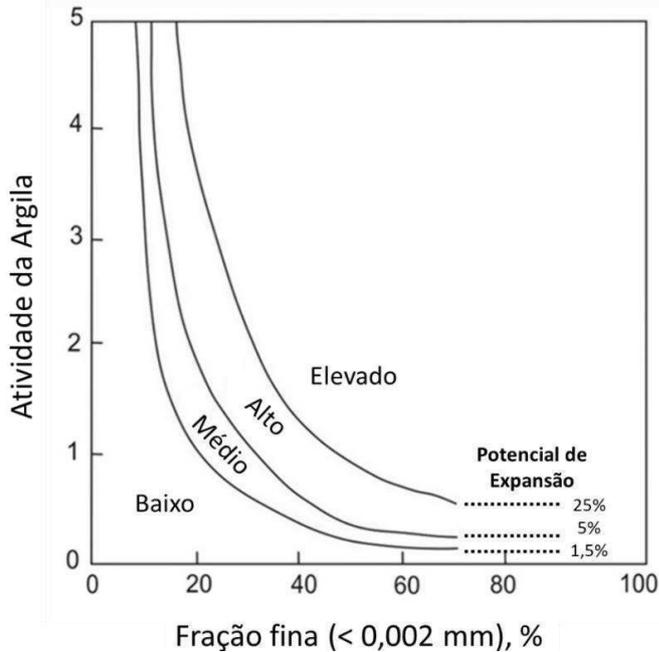
Figura 5: Carta de plasticidade por atividade da argila e grau de expansão.



Fonte: Adaptado de Skempton (1953) e Merwe (1964).

A Figura 6 mostra um gráfico que relaciona a atividade da argila e a fração fina do solo com o potencial de expansão livre e grau de expansão proposto por Seed *et al.* (1962).

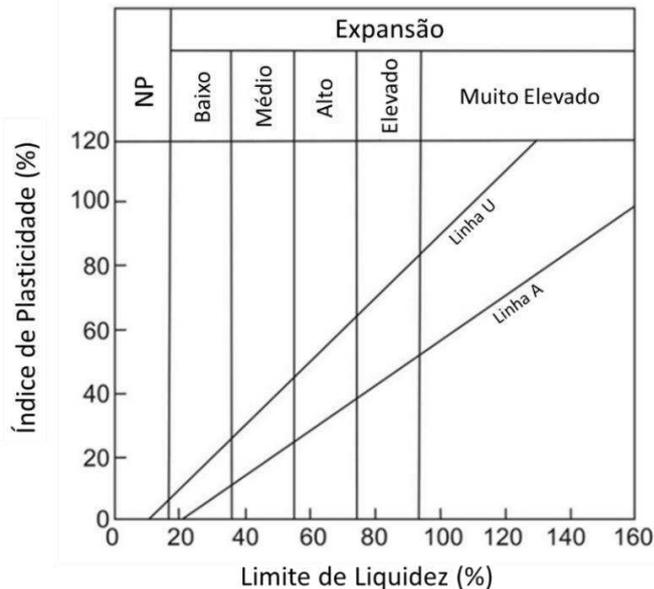
Figura 6: Gráfico de potencial e grau de expansão livre por atividade da argila.



Fonte: Adaptado de Seed *et al.* (1962).

A Figura 7 apresenta uma carta de plasticidade que relaciona o índice de plasticidade e o limite de liquidez com o grau de expansão de um solo proposto por Dakshanamurthy e Raman (1973), que foi baseada na carta de plasticidade de Casagrande.

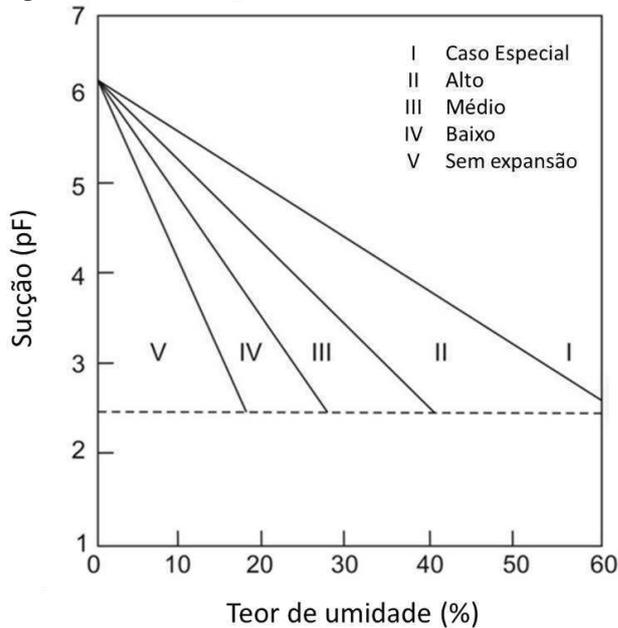
Figura 7: Carta de plasticidade pelo grau de expansão de um solo.



Fonte: Adaptado de Dakshanamurthy e Raman (1973).

Um modelo proposto por McKeen (1992) para prever a expansão de um solo está apresentada na Figura 8, que relaciona a sucção e teor de umidade do solo com o grau de expansão.

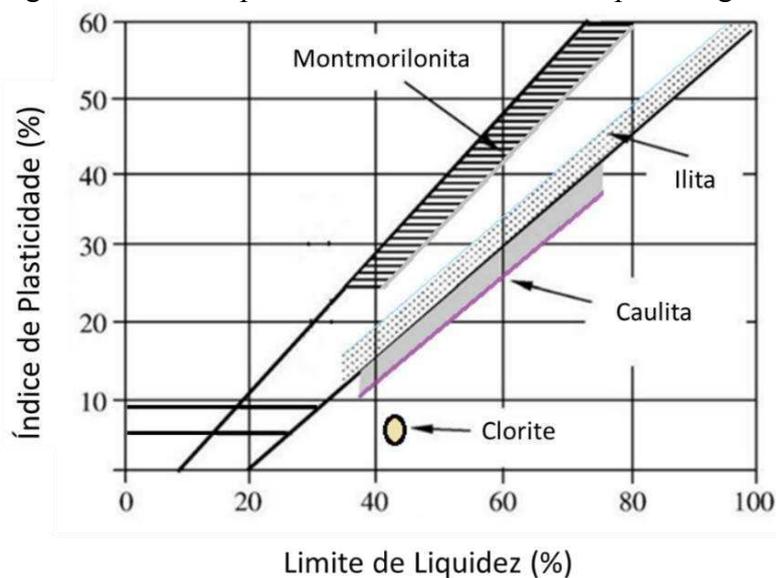
Figura 8: Relação gráfica entre sucção, teor de umidade e grau de expansão de um solo.



Fonte: Adaptado de McKeen (1992).

A Figura 9 mostra a carta de plasticidade proposta por Holtz e Kovacs (1981), baseada na carta de Casagrande e no sistema de classificação SUCS. Essa carta relaciona o índice de plasticidade e o limite de liquidez com o tipo de argilomineral presente no solo.

Figura 9: Carta de plasticidade relacionada ao tipo de argilomineral presente num solo.



Fonte: Adaptado de Holtz e Kovacs (1981).

Entretanto, a maneira mais simples e eficiente de reconhecer um solo expansivo é por meio dos métodos diretos, que são ensaios em aparelhos edométricos projetados para induzir ou impedir a expansão da amostra, resultando na determinação dos parâmetros de Expansão Livre e Tensão de Expansão (BARMAN; DASH, 2022; IKEAGWUANI; NWONU, 2019; SILVA; BELLO; FERREIRA, 2020). Estes métodos podem ser divididos em avaliativos e quantitativos, como apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Principais métodos diretos para determinação de solos expansivos.

CATEGORIA	MÉTODOS DIRETOS
Avaliativos	Ensaio de expansão de Lambe; índices edométricos.
Quantitativos	Expansão vertical livre e tensão de expansão; Ensaio edométrico simples e duplos; Ensaio edométrico com sucção controlada.

Fonte: Adaptado de Silva (2022, 2018).

Nos ensaios de expansão unidimensional, uma amostra de solo geralmente é submetida a uma sobrecarga inicial e , posteriormente, é inundada por água, o que permite medir a expansão ao longo do tempo. Após a estabilização da amostra, é possível calcular o parâmetro de expansão livre, que representa a porcentagem de expansão vertical da amostra em relação ao seu tamanho inicial. A expansão livre unidimensional é calculada usando a Equação 1:

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta H}{H} (100) \quad (1)$$

Sendo: ε_s = expansão livre unidimensional, em porcentagem (%)

ΔH = altura final da amostra após expansão total

H = altura inicial da amostra antes da inundação

A tensão de expansão gerada durante o processo de expansão da amostra pode ser calculada de duas maneiras distintas (induzida ou impedida), ambas iniciando com a aplicação de uma sobrecarga inicial e , em seguida, saturando a amostra. No primeiro método, ocorre a expansão livre da amostra logo após inundação. Após o equilíbrio da amostra, incrementos de sobrecarga são gradualmente aplicados até que a amostra retorne ao seu tamanho original. A tensão de expansão gerada no processo é calculada somando todas as sobrecargas necessárias para a amostra retornar ao seu tamanho inicial. No segundo método, quando a amostra apresenta expansão após inundação, sobrecargas adicionais são aplicadas para impedir qualquer variação volumétrica da amostra. Assim, a tensão de expansão gerada é calculada somando todas as sobrecargas que foram adicionadas para manter o volume da amostra constante durante o processo de expansão.

Vários pesquisadores têm documentado correlações por meio da medição da expansão livre e da tensão de expansão, obtidas pelos métodos diretos, estabelecendo classificações para o potencial expansivo de um solo. A Tabela 8 apresenta correlações entre valores típicos de expansão livre e o grau de expansibilidade de um solo, juntamente com os respectivos autores.

Tabela 8: Correlação entre expansão livre e grau de expansão de um solo.

	Holtz e Gibbs (1956)	Seed et al. (1962)	Vijayvergiya e Ghazzaly (1973)	Ortiz (1975)	Cuellar (1978)	Sridharan e Prakash (2000)
Grau de Expansão	Expansão Livre (%)					
Baixo	< 10	0 – 1	< 1	< 1	< 1,5	1 – 5
Médio	10 – 20	1 – 5	1 – 4	1 – 5	1,5 – 5	5 – 15
Alto	20 – 30	5 – 25	4 – 10	5 – 10	5 – 10	15 – 25
Elevado	> 30	> 25	> 10	> 10	> 10	> 25

Fonte: Autoria própria.

Enquanto a Tabela 9 apresenta correlações entre valores de tensão de expansão com o grau de expansibilidade do solo, bem como os possíveis danos que essa expansão pode causar às estruturas.

Tabela 9: Correlação entre tensão de expansão e grau de expansão de um solo.

	Ortiz (1975)	Cuellar (1978)	Salas (1980)	Possíveis danos às estruturas
Grau de Expansão	Tensão de Expansão (kPa)			
Baixo	< 30	< 25	20 – 50	Fissuras pequenas
Médio	30 – 120	25 – 125	50 – 100	Fissuras significantes
Alto	120 – 300	125 – 300	100 – 200	Danos graves
Elevado	> 300	> 300	> 200	Demolição

Fonte: Autoria própria.

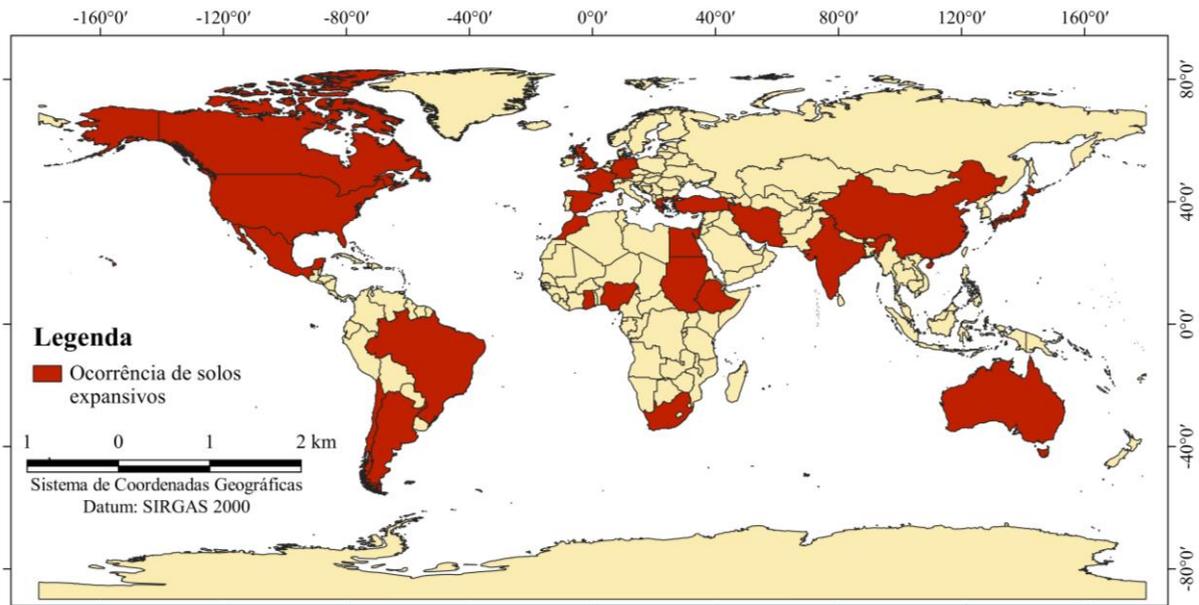
2.3 Ocorrência de solos expansivos

Os solos expansivos e sua instabilidade volumétrica representam uma ameaça para várias edificações e estradas. Eles estão presentes em diversas regiões do mundo, e os esforços para lidar com seus efeitos prejudiciais resultam em gastos anuais de milhões de dólares (LI; CAMERON; REN, 2014; OLIVEIRA; JESUS; MIRANDA, 2006; POONI *et al.*, 2019; SANTOS, 2017; ZHAO *et al.*, 2014).

Diversos países, incluindo o Brasil, Argentina, Chile, México, Canadá, Estados Unidos, China, Japão, Índia, Austrália, Turquia, Irã, Israel, Egito, Etiópia, Gana, Nigéria, Sudão, África

do Sul, Marrocos, França, Alemanha, Espanha, Grécia e Reino Unido, têm conduzido extensas pesquisas sobre o comportamento de solos expansivos na tentativa de mitigar seus impactos (CARVALHO *et al.*, 2015; FERREIRA, 2008; SANTOS, 2008). A Figura 10 destaca os países onde foram registradas e documentadas ocorrências de solos expansivos.

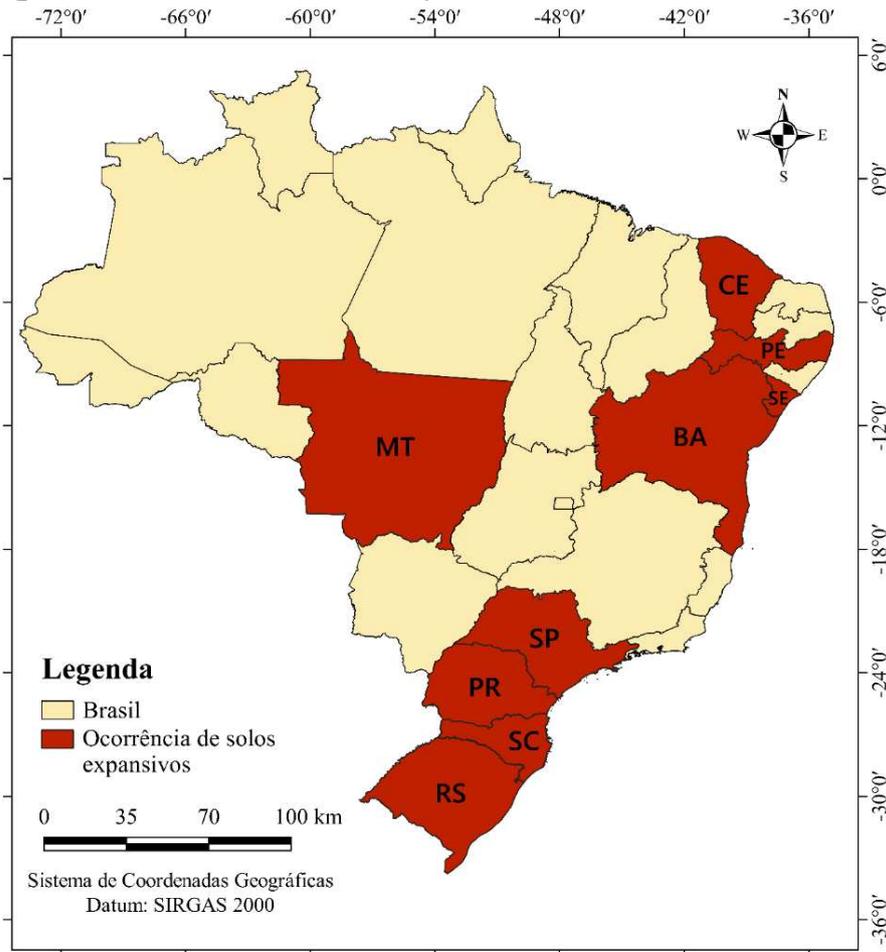
Figura 10: Ocorrência de solos expansivos globalmente.



Fonte: Autoria própria.

No Brasil, assim como em outras áreas com climas tropicais e semiáridas, os solos expansivos são encontrados em várias regiões do país, especialmente no Nordeste. Também foram identificadas ocorrências nas regiões Sul-Sudeste e na Região Central. Esses solos podem ser encontrados frequentemente em bacias sedimentares e podem se originar a partir da decomposição de feldspatos e piroxênios em rochas ígneas e sedimentares, onde favorecem a formação de argilominerais (AMORIM, 2004; FERREIRA *et al.*, 2018; SANTOS, 2008, 2017; SILVA, 2022, 2018). Com base nessas pesquisas sobre a localização de solos expansivos no Brasil, a Figura 11 apresenta um mapa do país com os estados em destaque onde foram identificadas ocorrências de solos expansivos.

Figura 11: Ocorrência de solos expansivos.



Fonte: Autoria própria.

A profundidade em que esses solos expansivos são encontrados pode chegar a até 6 metros em depósitos de solos residuais. É importante destacar que a profundidade onde ocorrem as mudanças periódicas de umidade é conhecida como “zona ativa” para solos expansivos. Ela costuma ser próxima à superfície, mas esta profundidade varia dependendo de diversos fatores. Abaixo da zona ativa, o teor de umidade do solo é constante, e não há variação volumétrica. Portanto, os problemas decorrentes dos ciclos de expansão/contração do solo ocorrem dentro da zona ativa (DAS, 2016; PUPPALA; MANOSUTHIKIJ; CHITTOORI, 2013; SANTOS, 2017).

Para determinar a profundidade da zona ativa, pode-se traçar o limite de liquidez do solo em relação ao teor de umidade e relacioná-los à profundidade do perfil do solo ao longo de várias estações por vários anos. Se for constatado que essa profundidade é relativamente pequena e outros fatores permitirem (viabilidade econômica de remoção do solo e transporte para descarte adequado), a camada de solo pode ser removida ou trocada. No entanto, se a

profundidade da zona ativa for extensa e/ou a remoção do solo for economicamente inviável, a solução prática e amplamente utilizada é a estabilização química do solo (CARVALHO *et al.*, 2015; DAS, 2016; FERREIRA, 1995; SANTOS, 2017).

2.4 Formas de tratamento de solos expansivos

Há diversos procedimentos geotécnicos recomendados quando se lida com a construção de edificações sobre solos expansivos e como mitigar ou eliminar seus efeitos negativos (DAS, 2016; SANTOS, 2017). Dentre as soluções técnicas mais comuns que podem ser aplicadas antes, durante e após a construção em solos expansivos, pode citar-se:

Antes da construção:

- Substituição do solo expansivo: abordagem aplicável a solos rasos e próximos à superfície. Consiste em remover e substituir o solo expansivo por um solo estável.
- Alteração da natureza do solo: envolve técnicas como pré-umedecimento e estabilização química para reduzir a expansividade do solo.
- Projetos com fundações apropriadas: escolher fundações adequadas, rígidas ou flexíveis, dependendo das condições específicas do local.
- Eliminação da alimentação de água: evitar que água excessiva penetre no solo, o que pode agravar a expansão.
- Manutenção do equilíbrio do teor de umidade: monitorar e controlar o teor de umidade no solo para evitar variações extremas.
- Drenagem controlada e redirecionada: implementar sistemas de drenagem para desviar a água longe das áreas críticas.
- Barreiras de proteção/contenção: uso de revestimentos e geomembranas impermeabilizantes.

Durante a construção:

- Impermeabilização de áreas próximas às fundações: impedir que a água alcance as fundações.
- Redimensionamento de elementos estruturais: adaptar elementos estruturais para acomodar as variações do solo.
- Adoção de fundações complementares: em casos extremos, considerar fundações adicionais.

Após a construção:

- Instalação de poços e novas estacas: medidas adicionais para reforçar a estabilização das fundações existentes, se os problemas persistirem mesmo após a construção.
- Readequação dos sistemas de drenagem: avaliar e ajustar os sistemas de drenagem existentes para lidar com problemas contínuos de saturação do solo.
- Possível substituição do solo expansivo: em situações extremas, considerar a substituição do solo expansivo por um solo estável.

De forma geral, a solução mais amplamente reconhecida e documentada na literatura é a estabilização do solo, que será discutida mais detalhadamente a seguir.

2.4.1 Estabilização dos solos

A estabilização de solos engloba técnicas que visam melhorar as propriedades mecânicas, hidráulicas e de deformabilidade de um solo, tornando-o adequado para uma aplicação específica. De modo geral, essa estabilização pode ser alcançada por meio de métodos mecânicos, granulométricos ou químicos.

A estabilização mecânica envolve a alteração do estado do solo por meio de compactação apropriada. A estabilização granulométrica, frequentemente empregada na pavimentação, consiste em modificar a granulometria do solo com aditivos quimicamente inertes. Já a estabilização química, aprimora as propriedades do solo mediante a aplicação de aditivos que reagem com os minerais do solo, desencadeando reações pozolânicas e cimentantes. Isso resulta na elevação do pH do solo, entre outros efeitos, e na melhoria dos parâmetros de resistência do solo (IKEAGWUANI; NWONU, 2019; MITCHELL; SOGA, 2005; PUPPALA; MANOSUTHIKIJ; CHITTOORI, 2013).

Esta seção se concentrará na exploração detalhada da estabilização química, que é o foco principal desta pesquisa.

A estabilização química de argilas expansivas tem se mostrado eficaz quando ocorre a substituição dos cátions associados à argila natural por tipos que são bivalentes ou têm baixa afinidade com a água. Vários tipos de cátions foram estudados para esse fim, sendo o cálcio o mais eficaz e prontamente disponível. Esse processo também resulta no acúmulo de cátions trocáveis ao redor das partículas de argila na água dos poros, o que contribui significativamente para reduzir a atividade da argila. A presença desses cátions restringe a passagem de água para dentro e para fora das partículas de argila, levando à floculação imediata das partículas e, conseqüentemente, a um comportamento menos ativo (NALBANTOĞLU, 2004; SNETHEN, 1979). Esse processo foi ilustrado pela Figura 4, conforme mencionado na seção 2.1.

Os materiais mais comuns para a estabilização química são o cimento e a cal, sendo utilizados isoladamente ou em combinação com outros aditivos. Um estudo comparativo entre a cal e o cimento realizado por Barman e Dash (2022) demonstrou que a argila tratada com cimento apresenta maior resistência à compressão devido à formação de compostos cimentícios adicionais. Por outro lado, a cal proporciona uma melhor trabalhabilidade. Portanto, o cimento é mais adequado para solos granulares e de baixa plasticidade, enquanto a cal é ideal para solos de alta plasticidade, como as argilas expansivas.

Em casos em que é necessário melhorar tanto a resistência quanto a estabilidade volumétrica, é recomendado o uso de uma combinação de cal e cimento ou outro aditivo, principalmente em solos com deficiência de pozolanas (BARMAN; DASH, 2022; DASH; HUSSAIN, 2012).

A aplicação de cimento, cal ou cinzas aumenta a condutividade elétrica devido ao aumento na concentração de íons multivalentes na água dos poros, como Ca^{+2} e OH^- . Isso resulta em uma troca catiônica simultânea na camada dupla difusa entre cátions de sódio da argila e os íons de cálcio e óxido de cálcio do agente estabilizador, promovendo a floculação imediata dos argilominerais. Isso leva a um aumento no potencial osmótico e à diminuição das forças repulsivas entre as camadas do argilomineral, reduzindo as superfícies disponíveis para interação com a água e, conseqüentemente, reduzindo o potencial de expansão do solo (DANG; KHABBAZ; NI, 2021; MITCHELL; SOGA, 2005).

Além disso, a adição de cimento, cal ou cinzas ao solo reduz os valores de CTC, o que indica alterações na mineralogia e plasticidade dos solos tratados. Isso ocorre devido à formação de novas partículas mais granulares, resultando em menor área superficial, menor capacidade de absorção de água e, conseqüentemente, uma redução na expansão do solo (NALBANTOĞLU, 2004; ÜNVER *et al.*, 2021).

Adicionalmente, é importante destacar a ocorrência de reações pozolânicas entre os íons de cálcio do aditivo e os minerais de sílica e alumina dos argilominerais. Essas reações resultam na formação de produtos cimentantes, como hidratos de silicato de cálcio (C-S-H), hidratos de aluminato de cálcio (C-A-H) e hidratos de silicato de alumínio de cálcio (C-A-S-H) (MITCHELL; SOGA, 2005).

Esses produtos pozolânicos contribuem para a união das partículas de solo, promovendo a cimentação. À medida que o tempo de cura se estende, a resistência do solo melhora devido à formação contínua de novas fases de cimentação. Isso leva a uma ligação contínua das partículas, reduzindo a permeabilidade da argila e diminuindo a hidratação. Conseqüentemente, há uma redução na capacidade de expansão do solo. Portanto, à medida que o tempo de cura

umenta, as propriedades mecânicas do solo melhoram e a expansão é reduzida progressivamente devido às reações pozolânicas na mistura (NALBANTOĞLU, 2004; SECO *et al.*, 2011).

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas na área da estabilização química de solos expansivos com o uso de aditivos convencionais, como cimento, cal, cinza volante, escória de alto-forno e fibras. Na Tabela 10 são apresentados os resultados de algumas dessas pesquisas, destacando o tipo de aditivo, o teor de adição, as melhorias no tratamento da expansão e da tensão de expansão, e as melhorias na resistência mecânica do solo.

Tabela 10: Pesquisas sobre tratamento de solos expansivos com aditivos convencionais.

Índices de Atterberg	Teor do aditivo	Principais resultados	Referências
LL = 50 IP = 20,5	Cal: 6% Cimento: 9%	Cal: Redução da expansão livre e da tensão de expansão em 100%. Cimento: Redução da expansão em 60,92% e da tensão de expansão em 63,05%.	Al-Rawas <i>et al.</i> (2005)
LL = 80 IP = 52	Cinza volante: 20%	Redução da expansão em 66,7% e da tensão de expansão em 77,58%. Aumento da resistência à compressão em 78,95%.	Phanikumar (2009)
LL = 68 IP = 43	Escória de alto-forno: 5%	Redução da expansão em 63,13%. Aumento da resistência à compressão em 160,95%.	Manso <i>et al.</i> (2013)
LL = 98 IP = 74	Cal: 4% Cimento: 20%	Cal: Redução da expansão em 42,5%. Cimento: Redução da expansão em 46,4%.	Phanikumar <i>et al.</i> (2015)
LL = 81 IP = 37	Cal: 11%	Redução da expansão livre e da tensão de expansão em 100%.	Paiva <i>et al.</i> (2016)
LL = 75,8 IP = 58,1	Cinza volante: 15%	Redução da expansão em 96,64% e da tensão de expansão em 76,26%. Aumento da resistência à compressão de 0 para 382 kPa.	Taher <i>et al.</i> (2020)
LL = 501 IP = 436	Cimento: 4%	Redução da expansão livre em 93,5%, passando do valor 24,22% para 1,58%.	Consoli <i>et al.</i> (2020a)

Fonte: Autoria própria.

Apesar da eficácia tradicionalmente comprovada da cal e do cimento na estabilização do solo, esses materiais levantam preocupações ambientais devido às emissões de gases de efeito estufa associadas à sua produção. Essas preocupações incluem custos elevados de produção, alto consumo de energia, emissões significativas de dióxido de carbono e a exploração de recursos naturais não renováveis, agravados pelo consumo excessivo nas últimas décadas (AHMED *et al.*, 2021; BLAYI *et al.*, 2021; FIROOZI *et al.*, 2017). As emissões de

dióxido de carbono (CO₂) resultantes da produção de cimento contribuem para o aquecimento global, representando quase 8% das emissões globais de CO₂ (FATEHI *et al.*, 2021). Destaca-se que, em 2019, a produção global de cimento excedeu 4 bilhões de toneladas (GUO *et al.*, 2024).

Para enfrentar eficazmente os impactos ambientais, é essencial buscar alternativas ecológicas ao cimento e à cal. Há uma crescente demanda em adotar materiais alternativos (AL-KALILI; ALI; AL-TAIE, 2022; ARAÚJO *et al.*, 2023; IKEAGWUANI; NWONU, 2019). A literatura tem explorado o uso de resíduos industriais e agrícolas como substitutos parciais em solos expansivos, oferecendo uma abordagem sustentável para lidar com a expansão do solo, ao mesmo tempo contribuindo para resolver problemas relacionados à disposição inadequada e à redução desses resíduos no meio ambiente (FIRAT *et al.*, 2017; YILMAZ; YURDAKUL, 2017). Além disso, esses resíduos alternativos possuem propriedades pozolânicas, e seus efeitos de estabilização no solo são aprimorados quando combinados com outro material pozolânico (AL-KALILI; ALI; AL-TAIE, 2022; BARMAN; DASH, 2022; SECO *et al.*, 2011).

Diversos resíduos agroindustriais, como cinzas de casca de arroz, cinzas volantes, sílica ativa, escória de alto-forno e fibra de coco, embora tenham impactos ambientais negativos decorrentes de seus processos de queima, podem ser utilizados de maneira versátil na engenharia (DANG; KHABBAZ; NI, 2021; IKEAGWUANI; NWONU, 2019). Estudos realizados por Ramírez *et al.* (2012) demonstraram que a incorporação de cal e resíduos alternativos, como a CBCA, resulta em uma significativa redução nas emissões de CO₂ e no consumo energético associados à produção e ao transporte de cimento quando comparado ao uso exclusivo de cimento na estabilização do solo. Desse modo, a utilização da CBCA pode reduzir as emissões de CO₂ durante o processo de estabilização do solo (FAIRBAIRN *et al.*, 2010; SECO *et al.*, 2011).

Além dos materiais amplamente difundidos e comprovados na literatura, como cal, cimento, cinzas volantes e betume, várias pesquisas têm investigado a adição de diferentes materiais na estabilização química de solos expansivos. De acordo com Al-Kalili *et al.* (2022), estes materiais são resíduos que podem ser categorizados em: (1) resíduos industriais: sílica ativa, cinzas volantes, escória de alto-forno, escória de forno elétrico, pó de serra, pó de pedra de vários materiais; (2) resíduos da agricultura: casca de arroz, CBCA, casca de ovo, óleos vegetais, casca de coco, casca de café, fibras e cinzas de frutas diversas; (3) pozolanas naturais: metacaulim, argila calcinada etc.

Portanto, várias pesquisas sobre o tratamento de solos expansivos incluem pó de pedra com calcário (OGILA, 2016), cinza combustível de óleo de palmeira (JAFER *et al.*, 2018;

RAMU; DAYAKARBABU, 2022), olivina (Mg_2SiO_4) (FASIHNIKOUTALAB, 2015), cloreto de magnésio ($MgCl_2$) (LATIFI *et al.*, 2015), óxido de magnésio (MgO) (SECO *et al.*, 2011), casca de arroz (JAIN; CHOUDHARY; JHA, 2020; ONYELOWE *et al.*, 2021), casca de ovo (JAMES; PANDIAN; SWITZER, 2017), sílica ativa e pó de serra (MICHAEL; SINGH, 2016), materiais à base de cálcio (JALAL *et al.*, 2020), cinza de casca de coco e resíduos de coco (JAGWANI; JAISWAL, 2019; PETER *et al.*, 2016), cinza da palha da cana-de-açúcar (CHAKRABORTY; BORAH; SHARMAH, 2016), cinza de casca de café (ATAHU; SAATHOFF; GEBISSA, 2019), fibra de banana (RAMBABU; BHAVANNARAYANA, 2019), fibra de nylon (PHANIKUMAR; SINGLA, 2016), metacaulim (KHADKA *et al.*, 2020), resíduos de borracha de pneus (SEDA; LEE; CARRARO, 2012), e outros materiais similares.

Os estudos realizados com esses resíduos confirmaram a eficácia desses materiais como agentes estabilizadores da expansão do solo. Além disso, demonstraram melhorias significativas nas propriedades físicas (índices de Atterberg, índices de compactação e parâmetros de compressibilidade) e mecânicas do solo (resistência à compressão simples e ao cisalhamento). Isso reforça a relevância desses resíduos como aditivos alternativos que contribuem para mitigar os impactos ambientais. Na Tabela 11 a seguir, tem-se a descrição resumida dos principais resultados encontrados para solos estabilizados por alguns desses materiais alternativos.

Tabela 11: Principais resultados de aditivos alternativos na estabilização de solos expansivos.

Aditivo	Tratamento da expansão	Referência (continua)
Escória de forno elétrico (EFE)	Adição de 20% de EFE: redução na expansão em 77,5%. Com 15% de EFE após 90 dias de cura: aumento da resistência à compressão em 196%.	Shahsavani <i>et al.</i> (2021)
Pó de granito	Adição de 30%: redução na expansão em 76,8%. Adição de 20% após 28 dias de cura: aumento da resistência à compressão em 104%.	Abdelkader <i>et al.</i> (2022)
Pó de pedra de mármore	Adição de 50%: redução de até 37,5% na expansão, dependendo do peso específico.	Tenório (2019)
Pó de mármore (PM)	Adição de 25% e 40% de PM: redução da expansão em 81,2% e 94,8%, respectivamente. Adição de 20% de PM após 28 dias de cura: aumento na resistência à compressão em 161%.	Jain <i>et al.</i> (2020)
Pó de pedra + casca de ovo	Com uma combinação de 30% (PP+CO): redução na expansão livre em 83,3%.	Bapiraju e Prasad (2019)
Borracha de pneus	Com a adição de 20%: houve redução na expansão em 48,8% e na tensão de expansão em 75,2%.	Seda <i>et al.</i> (2012)

Aditivo	Tratamento da expansão	Referência (conclusão)
Fibra de <i>nylon</i> (FN)	Adição de 0,25% de FN: redução na expansão em 38,9% e na tensão de expansão em 34,9%.	Phanikumar e Singla (2016)
Óxido de magnésio (MgO)	A combinação de 1% do aditivo com 2% de cal resultou na redução da expansão em 87,1% e no aumento da resistência à compressão em 100%.	Seco <i>et al.</i> (2011)
Cinza da casca de arroz (CCA)	Adição de 14% de CCA: redução da expansão em 92,7% e da tensão de expansão em 95,2%.	Silva <i>et al.</i> (2020)
Cinza da casca de arroz (CCA)	Adição de 20% de CCA: redução da expansão em 45,4% e da tensão de expansão em 58,6% a 0 dias de cura. Após 90 dias de cura, a expansão chegou a 86% e a tensão de expansão em 94%. A resistência à compressão aumentou em 83% sem tempo de cura e aproximadamente 300% após 90 dias de cura.	Liu <i>et al.</i> (2019b)
Cinza da palha da cana-de-açúcar (CPCA)	Adição de 10% de CPCA e após 7 dias de cura: redução de 100% na expansão livre e um aumento de 63,2% na resistência à compressão.	Chakraborty <i>et al.</i> (2016)
Geotêxtil de coco (GO)	Adição de 2 camadas do geotêxtil (com 80 mm de comprimento cada): redução na expansão em 94,5% e na tensão de expansão em 81,9%.	Tiwari e Satyam (2020)
0,5% de fibra de coco e 20% de cinza de fundo	Redução da expansão em 84,5% e da tensão de expansão em 67,65%. Aumento da resistência à compressão simples em 265,4%.	Tiwari <i>et al.</i> (2021)
Cinza combustível de óleo de palmeira	Adição de 8%: redução da expansão em 52,3% e aumento da resistência à compressão de 42,4%.	Ramu e Dayakarbabu (2022)
Metacaulim com gesso	Adição de 6% do geopolímero de metacaulim e gesso: redução da expansão livre em 90,7%.	Khadka <i>et al.</i> (2020)

Fonte: Autoria própria.

2.5 Estabilização com cal e CBCA

Nesta seção, serão detalhadas as propriedades da cal e da CBCA, bem como seus comportamentos e os efeitos que produzem quando adicionados ao solo, uma vez que esses materiais serão utilizados na pesquisa deste trabalho.

2.5.1 Cal

De acordo com Silva *et al.* (2020), a cal é um aglomerante resultante da calcinação de calcários ou dolomitos, seguida de hidratação para formar o hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 . Esse composto possui diversas aplicações em várias atividades humanas. É importante destacar que

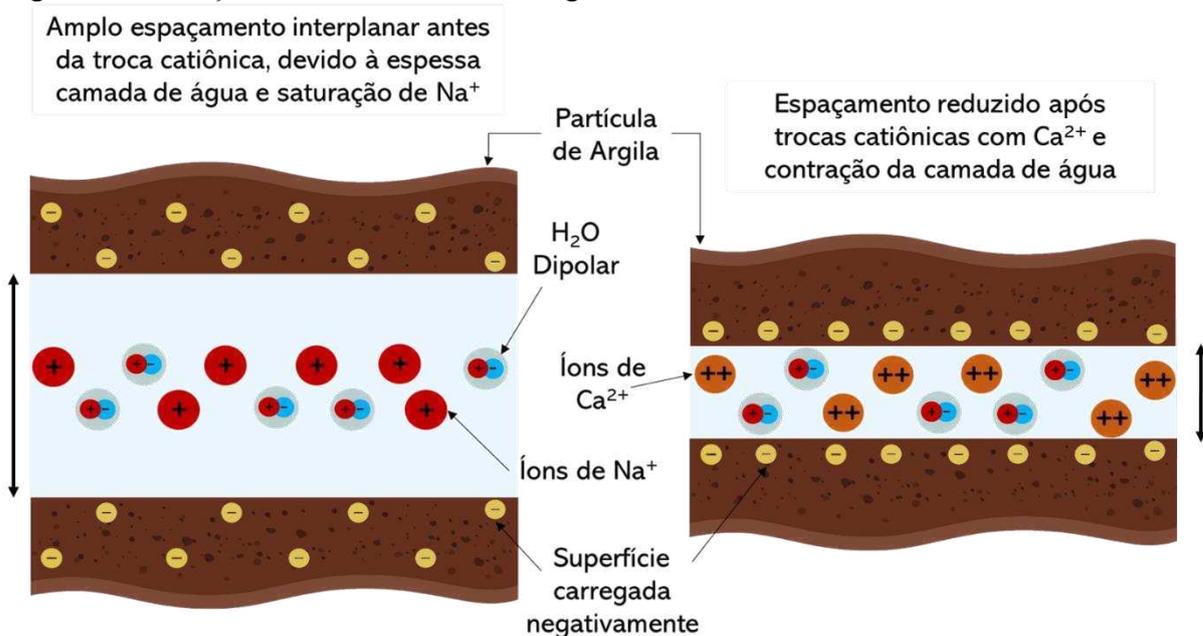
a cal não contém materiais pozzolânicos (TENÓRIO, 2019). No entanto, quando adicionada ao solo que é uma fonte de pozzolana, desencadeia reações como o aumento do pH, troca catiônica, floculação e aglomeração de partículas (devido ao efeito da Ca^{2+}), cimentação e reação pozzolânica (INGLES; METCALF, 1972; PRUSINSKI; BHATTACHARJA, 1999).

A troca de íons e a floculação são reações interdependentes que ocorrem imediatamente após a mistura da cal com o solo, resultando em alterações instantâneas nas propriedades do solo. O cálcio livre na cal substitui os cátions adsorvidos nos argilominerais, reduzindo o tamanho da camada dupla de água difusa. Isso permite que as partículas de argila se aproximem umas das outras, causando floculação ou aglomeração (MITCHELL; SOGA, 2005).

Durante a floculação, íons de cálcio livres da cal hidratada se ligam aos íons de magnésio e sódio presentes na argila, tornando-a menos plástica. Esse processo é instantâneo e causa um aumento no pH do solo, geralmente para valores acima de 12, devido à presença do hidróxido de cálcio na mistura. Os íons de cálcio também impedem a penetração da água nos vazios dos argilominerais, neutralizando suas cargas negativas e reduzindo a distância basal dos argilominerais. Esse conjunto de ações favorece ainda mais a floculação e a troca catiônica, diminuindo a tendência de expansão do solo (HERZOG; MITCHELL, 1963; TRB, 1987).

A Figura 12 representa um esquema da redução do espaçamento basal da argila após as trocas catiônicas que surgem com a adição de cal ao solo.

Figura 12: Redução da distância basal do argilomineral devido às trocas catiônicas.



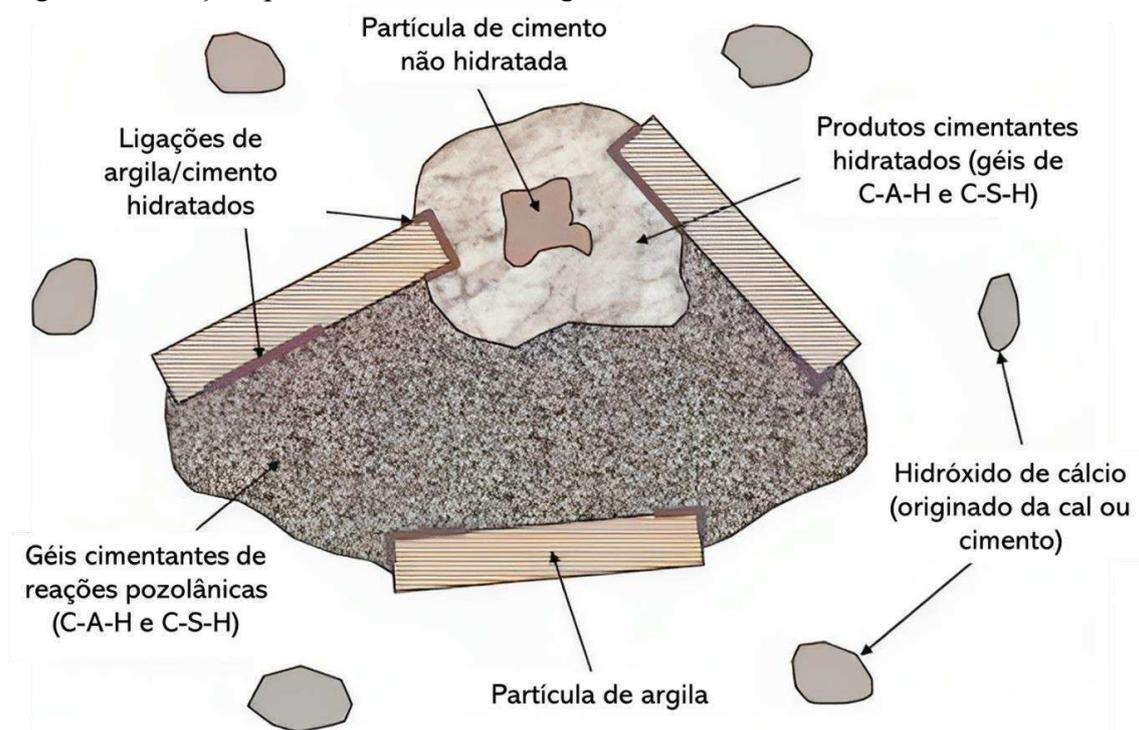
Fonte: Adaptado de Sargent (2015).

Após esses fenômenos, ocorrem reações subsequentes mais lentas, como a cimentação e reações pozolânicas. Essas reações contribuem para a estabilidade estrutural do solo, reduzindo a permeabilidade e o índice de vazios, e aumentando a resistência mecânica do solo. A reação pozolânica ocorre no solo estabilizado com cal, originando substâncias cimentantes devido à interação da cal com água, sílica, ferrosilicatos e aluminossilicatos amorfos presentes no solo (MITCHELL; SOGA, 2005).

O aumento do pH do solo provoca a dissolução dos silicatos e alumina da argila, formando um gel de silicatos de cálcio hidratados que envolve as partículas de argila e se cristaliza com o tempo. Essas reações de cimentação geram compostos, como C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e C-A-H (hidrato de aluminato de cálcio), que reduzem a expansão e a contração do solo. Isto deve-se à menor afinidade da argila pela água e à formação de uma matriz cimentante. Esses compostos cimentícios são responsáveis pelo aumento progressivo da resistência do solo ao longo de vários anos (NALBANTOĞLU, 2004).

Para que ocorra a reação pozolânica, é necessário que o material adicionado seja fino, contenha quantidades significativas de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) e possua uma estrutura mineralógica amorfa (FERREIRA *et al.*, 2018; SILVA; BELLO; FERREIRA, 2020; ÜNVER *et al.*, 2021). Na Figura 13, é apresentada uma representação das reações pozolânicas que ocorrem na argila.

Figura 13: Reações pozolânicas em uma argila



Fonte: Adaptado de Sargent (2015).

É relevante destacar que a reação pozolânica desencadeada pela cal no solo é um processo endotérmico, que consome calor. Portanto, o aumento da temperatura favorece essa reação, agindo como um catalisador durante o processo (CONSOLI; ROCHA; SILVANI, 2014a; SALDANHA; MALLMANN; CONSOLI, 2016). Embora o aumento da temperatura possa acelerar o processo da hidratação da mistura e, conseqüentemente, reduzir o tempo de cura, não há uma redução significativa na quantidade ideal de aditivo a ser utilizada (BARMAN; DASH, 2022; GOODARZI; AKBARI; SALIMI, 2016; IKEAGWUANI; NWONU, 2019).

A eficácia da cal no controle da expansão dos solos é amplamente respaldada pela literatura. Na Tabela 12 estão apresentados resultados de algumas pesquisas sobre tratamento de solos expansivos com cal.

Tabela 12: Pesquisas sobre solos expansivos tratados com cal e resultados relevantes.

Índices de Atterberg	Teor de adição	Melhorias no tratamento do solo expansivo	Referências
LL = 62,2 IP = 37,1	4% 5% 6%	Com 6% de cal, houve uma redução em 82,89% na expansão livre, diminuindo de 76% para 13%.	Ji-ru e Xing (2002)
LL = 80 IP = 52	2% 4%	O solo expandiu 27% com 330 kPa de tensão de expansão. Houve redução na expansão em 48% e 89% com adição de 2% e 4% de cal. Redução na tensão de expansão em 51,5% com 4% de cal.	Phanikumar (2009)
LL = 459,9 IP = 406,2	3% a 13%	Redução de LL e IP. Com 5% de cal houve redução na expansão em 99,26%. A resistência à compressão simples aumentou de 250 kPa para 3000 kPa com 9% de cal.	Dash e Hussain (2012)
LL = 57,5 IP = 29,2	3% 5% 7%	Houve redução significativa dos valores de IP e da atividade da argila. Com adição de 5% de cal, houve redução da expansão livre e da tensão de expansão em 100%.	Ferreira <i>et al.</i> (2018)
LL = 49 IP = 28	4% 6% 8%	Redução da expansão livre em 80,34%, de 8,14% para 1,6%, com 6% de cal. A resistência à compressão simples aumentou de 578 kPa com 4% cal, para 940 kPa com cal 6% e para 1144 kPa com 8% cal.	Tenório (2019)
LL = 50 IP = 30	3% a 13%	Expansão de 20% e tensão de expansão de 215 kPa. Com 9% de cal, a expansão reduziu em 98,93% e a tensão de expansão em 99,61%.	Silva <i>et al.</i> (2020)
LL = 49 IP = 28	2% 4% 6%	A expansão do solo tende a diminuir à medida que o teor de cal e a porosidade aumentam, destacando a correlação de $R^2 = 96\%$ para o índice η/L_{iv} .	Silvani <i>et al.</i> (2020)

Fonte: Autoria própria.

2.5.2 Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBCA)

A cana-de-açúcar é amplamente utilizada na produção de açúcar e álcool, gerando como subproduto o bagaço. Aproximadamente 95% desse bagaço é queimado nas caldeiras das próprias usinas para a geração de energia. Dessa queima, obtém-se a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) (UNICA, 2021). Segundo levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), para a safra de 2023/2024, estima-se que terão sido processadas 652.947 mil toneladas de cana-de-açúcar para a produção de açúcar e etanol (com destaque para 58.500 mil toneladas no Nordeste), resultando em cerca de 4 milhões de toneladas de CBCA (CONAB, 2023).

A disposição inadequada da CBCA no meio ambiente é uma preocupação constante e requer cuidados e destinação apropriada, o que nem sempre é realizado (BRINKMAN *et al.*, 2018; CACURO; WALDMAN, 2015; CORDEIRO *et al.*, 2008). Além disso, a fração fina da CBCA pode ser facilmente dispersada pelo ar, causando problemas respiratórios em pessoas que residem próximas a áreas onde a cinza é disposta de maneira inadequada (LE BLOND *et al.*, 2014).

A CBCA contém sílica, alumina, óxido de cálcio e magnésio em sua composição, elementos essenciais que desencadeiam reações pozolânicas. Nos últimos anos, diversos estudos têm explorado a aplicação da CBCA em cimentos e argamassas na fabricação de concreto, em que ela é usada como substituta da areia, demonstrando melhorias na resistência do concreto e abordando a natureza pozolânica da CBCA (BAHURUDEEN *et al.*, 2015; CHUSILP; JATURAPITAKKUL; KIATTIKOMOL, 2009; JOSHAGHANI; MOEINI, 2017; KHAN; KAMAL; HAROON, 2015; MOHAN *et al.*, 2021; ZAREEI; AMERI; BAHRAMI, 2018).

Algumas pesquisas têm investigado o emprego da CBCA em solos expansivos com o potencial de melhorar as propriedades físicas e mecânicas, a resistência à compressão, a resistência ao cisalhamento e o índice de suporte Califórnia (CBR), estabilizando o solo para aplicação em camadas de pavimentos (HASAN; KHABBAZ; FATAHI, 2018; JAMES; PANDIAN, 2018; LIMA *et al.*, 2022; PAULINUS, 2022; RAMÍREZ *et al.*, 2012; TEDDY; ANNETTE; AINOMUGISHA, 2021).

Recentemente, a CBCA tem sido objeto de pesquisa como potencial estabilizante químico de solos expansivos, apresentando resultados significativos na contenção da expansão e na melhoria das propriedades mecânicas do solo. Um estudo realizado por Hasan *et al.* (2016) constatou que a adição combinada de 18,75% de CBCA e 6,25% de cal reduziu a expansão

livre do solo em 65%. Além disso, a contração linear do solo diminuiu em 15,9% sem tempo de cura e 35% após 28 dias de cura.

Drumond (2019) variou a adição de CBCA em diferentes proporções (entre 5% e 40%) e observou que a expansão livre do solo, inicialmente em 10,35%, diminuiu em 47,34% com a incorporação de 30% de CBCA. A tensão de expansão também diminuiu de 192,5 kPa para 3,33 kPa com 30% de CBCA, enquanto a tensão cisalhante máxima suportada pelo solo aumentou de 47,5 kPa para 80 kPa com a mesma proporção de CBCA. Também foi observada uma redução nos valores do Índice de Plasticidade (IP).

Ewa *et al.* (2023) investigaram os efeitos da adição de CBCA em conjunto com pó calcário em diferentes proporções (variação de 0% a 50%). Os resultados demonstraram redução nos limites de Atterberg do solo, diminuição no potencial de expansão do solo de até 9,8%, e um aumento significativo na resistência à compressão simples, variando entre 23,8% e 38,1%. Além disso, a resistência ao cisalhamento e o CBR aumentaram em mais de 50%. A combinação de CBCA e pó calcário apresentou melhores resultados do que quando utilizados isoladamente.

Dang *et al.* (2021) investigaram o uso de CBCA e cal na estabilização de solos expansivos em diferentes tempos de cura. Os teores de CBCA variaram de 0% a 25%, e os de cal variaram de 0% a 6,25%. Houve melhorias significativas em todos os parâmetros avaliados com o aumento do tempo de cura (de 0 a 56 dias), com resultados superiores quando ambos os aditivos foram combinados em vez de utilizados separadamente. Os resultados mostraram um aumento de até 815% na resistência à compressão simples, passando de 138 kPa para 1400 kPa após 56 dias de cura, com a adição conjunta de 18,75% de CBCA e 6,25% de cal. Além disso, houve redução de 83% nas propriedades de compressibilidade do solo. Por fim, adições de 5% de cal, 25% de CBCA e a combinação de 6% de adição (4,5% CBCA e 1,5% de cal) reduziram a expansão livre do solo em 100%.

No estudo conduzido por Silvani *et al.* (2023), foram examinadas misturas compactadas de bentonita-areia e CBCA. Essas misturas foram moldadas com teores variados de CBCA (0%, 6,25%, 12,5%, 18,75%, 25%) e com cinco pesos específicos secos diferentes. A expansão livre da mistura bentonita-areia atingiu 16,15% na maior densidade, mas a adição de 6,25% ou mais de CBCA resultou em uma redução de cerca de 70% na expansão nas misturas. Ademais, ao adicionar 12,5% ou mais de CBCA, a expansão livre do solo diminuiu para menos de 0,5%, garantindo estabilidade volumétrica em todas as misturas. Além disso, a CTC diminuiu com adições de até 12,5% de CBCA, mas não houve alteração perceptível na CTC além desse ponto. Isto corrobora com o que foi discutido na seção 2.1, acerca de que quanto maior for o valor da

CTC de um solo, maior será o potencial expansivo, enquanto valores menores indicam um solo mais estável.

Por outro lado, Silvani *et al.* (2023) conduziram experimentos variando o teor de cal entre 4%, 6% e 8% em misturas de solo-CBCA, na proporção de 3:1, em diferentes densidades secas e utilizando água salobra e água de torneira. Os resultados indicaram que a resistência à compressão simples das misturas solo/CBCA/cal aumentou com o aumento do teor de cal, maior densidade seca e o uso de água salobra. Além disso, a utilização do parâmetro η/L_{iv} correlacionado com a resistência à compressão foi verificada, e o modelo encontrado serviu como um preditor do comportamento das misturas solo/CBCA/cal. Isso sugere que a água salobra pode ser uma alternativa viável à água de torneira ou destilada na estabilização de misturas expansivas de solo/CBCA/cal, contribuindo também para o aumento da resistência à compressão simples.

Todavia, apesar dos benefícios proporcionados pelo uso da CBCA, alguns fatores precisam ser avaliados para o seu uso em larga escala como aditivo. É importante considerar que a reatividade da CBCA pode ser influenciada por fatores como a temperatura de calcinação e queima, a presença de impurezas, como o carbono, e a ocorrência de combustão imperfeita em certos materiais. Esses fatores podem limitar a reação do hidróxido de cálcio com a sílica, resultando na formação de compostos instáveis. A queima do bagaço, por exemplo, ocorre de forma descontrolada nas caldeiras, resultando em cinzas com composição química e tamanho de partícula variados (DANG; KHABBAZ; NI, 2021; FAIRBAIRN *et al.*, 2010).

Além disso, é comum a presença de contaminantes, geralmente provenientes do solo ou fertilizantes. Um exemplo relevante seria o excesso de carbono, que resulta na formação de estruturas planares, aumentando a distância interplanar e facilitando a absorção de água. Isso reduz a disponibilidade de água para a hidratação do aditivo e a reação pozolânica, inibindo a formação de compostos de cimentação, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o hidrato de aluminato de cálcio (C-A-H) (CHAGAS *et al.*, 2022; RAMÍREZ *et al.*, 2012).

Portanto, para obter uma CBCA com alta atividade pozolânica, caracterizado por sílica amorfa, baixa quantidade de carbono e alta ASE, é essencial manter um rigoroso controle técnico durante os processos de queima e calcinação. Além disso, a redução do tamanho das partículas por meio da pulverização tem se mostrado eficaz nesse contexto (CHUSILP; JATURAPITAKKUL; KIATTIKOMOL, 2009; CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009; RAMÍREZ *et al.*, 2012).

Outros procedimentos, como moagem, fracionamento densimétrico e lixiviação ácida, têm sido empregados para aumentar a uniformidade e a concentração de sílica amorfa nas

cinzas. A redução do tamanho das partículas garante o aumento da ASE da cinza, o que está diretamente associado a melhorias nas propriedades mecânicas e na durabilidade do efeito cimentante no solo (CHAGAS *et al.*, 2022).

Portanto, diante do exposto, a aplicação da CBCA no tratamento de solos pode oferecer vários benefícios para a engenharia e a sustentabilidade ambiental, incluindo o seu uso como aditivo para a estabilização de solos expansivos, proporcionando uma destinação adequada para esse resíduo e agregando valor industrial a esse subproduto da cana-de-açúcar.

2.6 Parâmetro η/L_{iv}

Uma das abordagens promissoras desenvolvidas para modelar o comportamento de solos estabilizados baseia-se no índice porosidade/teor volumétrico do agente estabilizador. Nesse contexto, Consoli *et al.* (2007) introduziram uma metodologia baseada na porosidade e no teor de agente cimentante para determinar a dosagem apropriada de solo-cimento, envolvendo o cálculo da relação entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cimento (C_{iv}). Essa abordagem se inspira no índice água/cimento (a/c) utilizado no dimensionamento de argamassas e concretos. É importante ressaltar que o fator água/cimento, como destacado por Consoli *et al.* (2007), não é aplicável a solos estabilizados quimicamente, uma vez que esses materiais não são saturados, ao contrário do concreto, onde a porosidade corresponderia ao volume de água presente. No entanto, é viável substituir a quantidade de água pela porosidade (η) e a massa de cimento pelo teor volumétrico de cimento (C_{iv}).

Desse modo, Consoli *et al.* (2007) conseguiram prever a resistência à compressão simples de solos de areia argilosa estabilizados com cimento Portland. Eles propuseram o uso de um expoente no denominador (C_{iv}^a) como uma abordagem para compatibilizar e otimizar a relação entre as variáveis investigadas. Posteriormente, Consoli *et al.* (2009) empregaram o índice de porosidade/teor de aditivo para prever a resistência do solo estabilizado com cal.

Pesquisas subsequentes demonstraram que este índice também pode se correlacionar com a resistência à tração, o módulo de cisalhamento inicial, os parâmetros de resistência efetiva de Mohr-Coulomb, durabilidade, módulo resiliente e expansão unidimensional para diferentes tipos de solos estabilizados com cimento Portland, cal, pó de pedra e cimento alcali-ativado (CONSOLI *et al.*, 2009, 2019a, 2020a, 2020c; CONSOLI; ROCHA; SILVANI, 2014b; LUCENA *et al.*, 2023; SAMANIEGO *et al.*, 2023; SILVANI *et al.*, 2023).

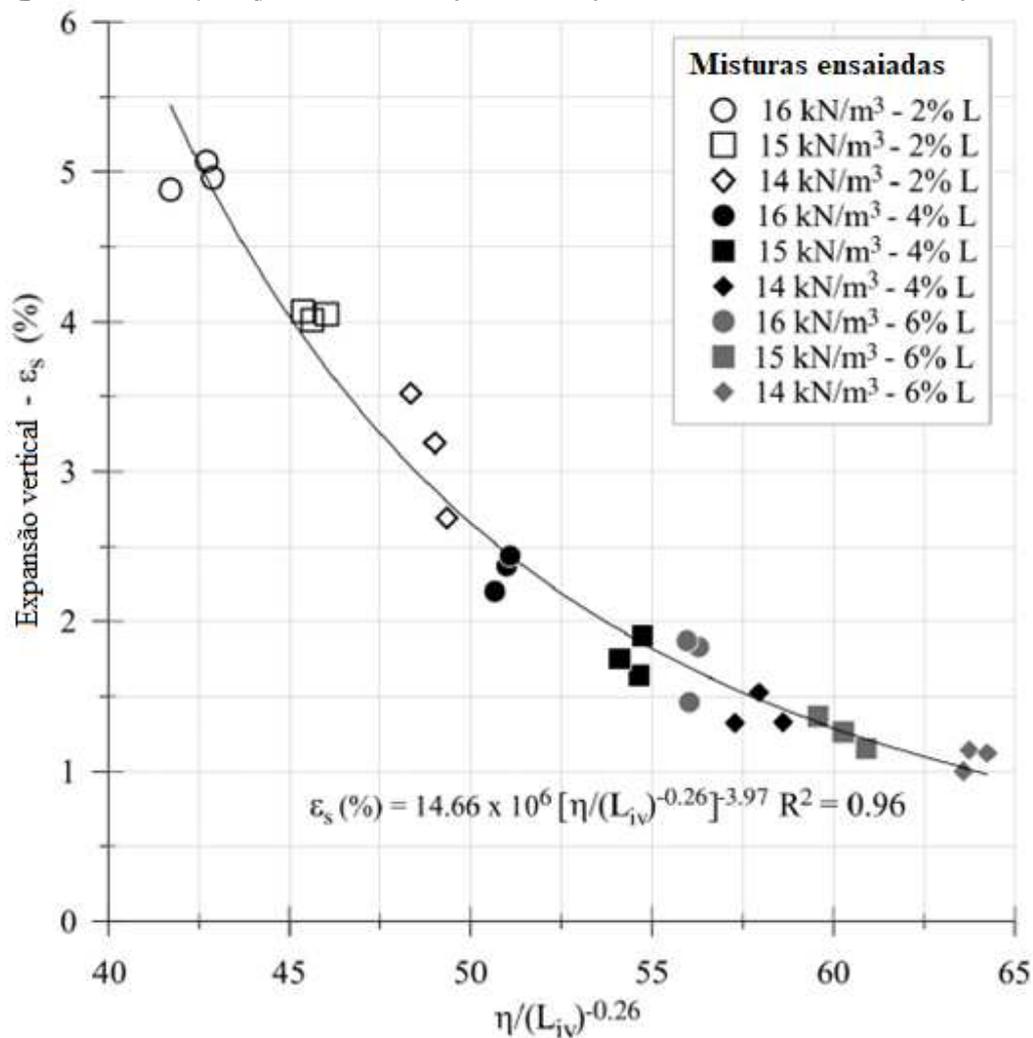
No estudo conduzido por Silvani *et al.* (2020), foi observado que as variáveis porosidade (η) e o teor volumétrico de cal (L_{iv}) exercem diferentes graus de influência na expansão

unidimensional do solo e para a resistência à compressão simples. Para tornar compatíveis os efeitos da variação da porosidade e do teor volumétrico de um aditivo na expansão vertical, pode-se elevar o expoente do teor de aditivo a uma potência.

Tenório (2019) e Silvani *et al.* (2020) utilizaram um coeficiente de -0,26 no expoente para prever a expansão vertical de um solo estabilizado com cal, argumentando que esse valor proporciona uma melhor compatibilização entre as variáveis de expansão, η e L_{iv} , resultando em um ajuste mais preciso para a relação η/L_{iv} .

A Figura 14 ilustra uma relação entre o parâmetro $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ e a expansão vertical estabelecida na pesquisa conduzida por Silvani *et al.* (2020) sobre o tratamento de um solo expansivo com cal. Nota-se que a equação ajustada da relação demonstra um bom coeficiente de correlação, com $R^2 = 0,96$, o que indica uma forte associação entre o parâmetro $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ e a expansão livre vertical.

Figura 14: Relação ajustada entre o parâmetro porosidade/teor de cal e a expansão vertical.

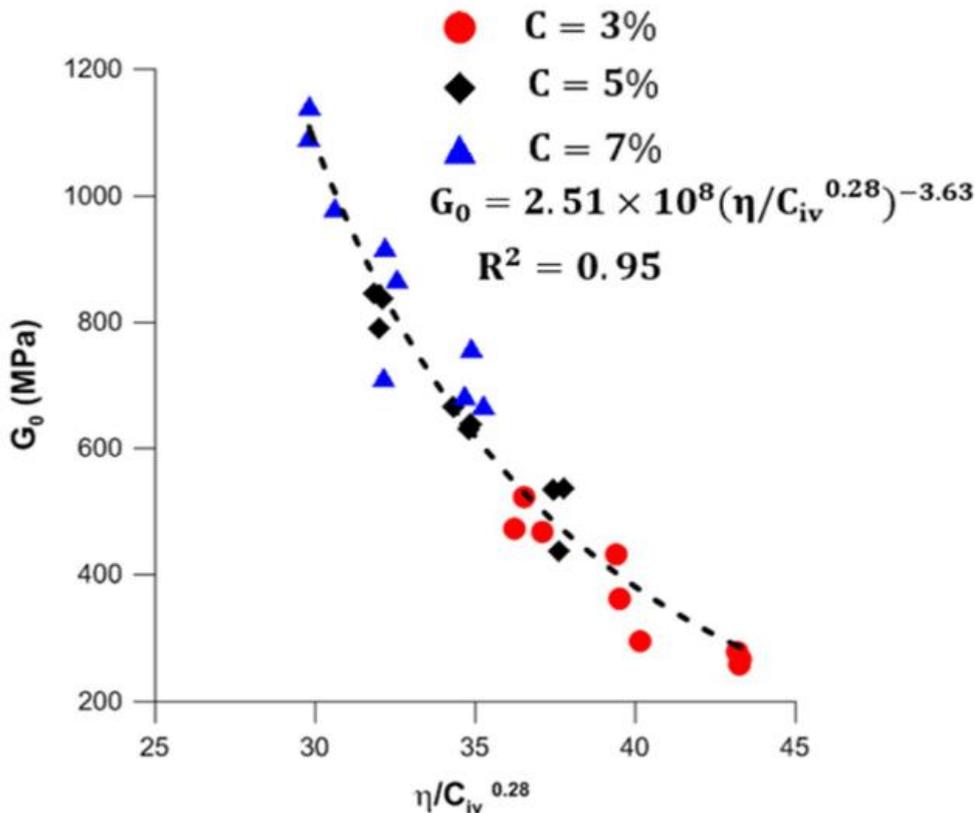


Fonte: Adaptado de Silvani *et al.* (2020).

Por outro lado, Guedes *et al.* (2021) adotaram o mesmo expoente na forma positiva (0,26) para prever a resistência à compressão simples (q_u) de um solo estabilizado com cimento, enquanto Silvani *et al.* (2023) utilizou o valor de 0,26, na forma positiva, para relacionar o parâmetro η/L_{iv} e a resistência à compressão do mesmo solo anterior estabilizado com cal e cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Conforme observado por Silvani *et al.* (2020) e Consoli *et al.* (2020c), a diferença no sinal do expoente ocorre porque o parâmetro no denominador aumenta a resistência à compressão, mas diminui a expansão vertical. Em ambas as situações, um aumento na porosidade diminui tanto o q_u quanto a expansão vertical.

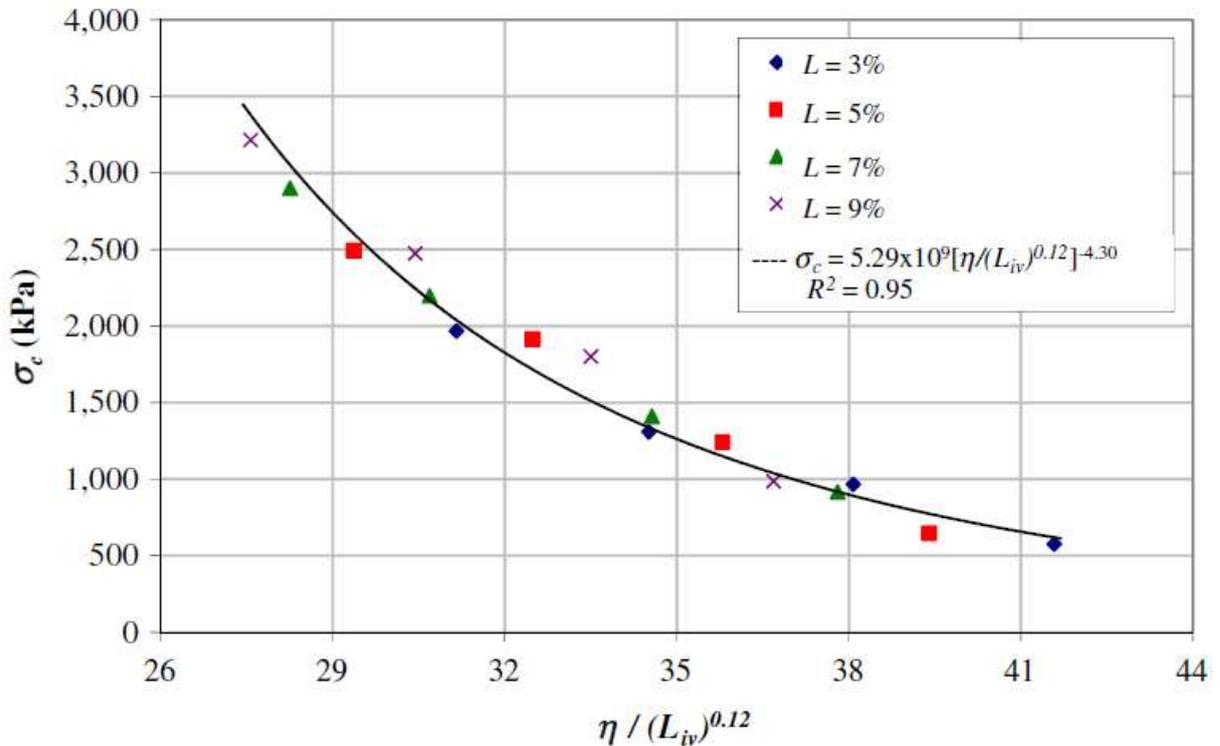
Portanto, é comum observar que um expoente positivo do $(L_{iv})^a$ está associado a características de resistência mecânica, enquanto um expoente negativo está relacionado com a expansão vertical livre do solo. A Figura 16 mostra a relação entre $\eta/(L_{iv})^a$ com um expoente positivo de 0,12 e a q_u (representada por σ_c) de um solo estabilizado com cal. Por outro lado, a Figura 15 ilustra a correlação entre o parâmetro porosidade/teor de cimento (η/C_{iv}) e o módulo de cisalhamento inicial de uma mistura de rejeitos de ouro tratado com cimento, nos teores de 3%, 5% e 7%. Consoli *et al.* (2017) optaram por elevar o coeficiente C_{iv} ao expoente positivo de 0,28 para melhor compatibilizar as variáveis analisadas.

Figura 15: Relação entre η/C_{iv} e módulo de cisalhamento inicial.



Fonte: Adaptado de Consoli *et al.* (2017).

Figura 16: Relação entre $\eta/(L_{iv})^a$ e a resistência à compressão simples de um solo expansivo.



Fonte: Adaptado de Consoli *et al.* (2014).

Desse modo, a abordagem que utiliza o índice porosidade/teor de aditivo oferece amplas possibilidades de aplicação em diferentes tipos de solos, diversos parâmetros e vários tipos de aditivos. Notavelmente, o efeito das variáveis age de maneira distinta em relação ao parâmetro analisado, resultando em expoentes com sinais diferentes para o coeficiente “teor de aditivo”, como discutido anteriormente.

2.7 Relação entre expansão livre e tensão de expansão

O fenômeno da expansão do solo representa um desafio para a engenharia civil, devido ao risco potencial de movimentos ascendentes imprevisíveis de estruturas construídas sobre solos expansivos (CARVALHO *et al.*, 2015; IKEAGWUANI; NWONU, 2019; ZHAO *et al.*, 2014).

Diversos estudos têm sido conduzidos com o objetivo de estabelecer correlações entre as propriedades físicas do solo e o fenômeno de expansão. Várias dessas pesquisas foram abordadas na seção 2.2 deste trabalho. No entanto, as correlações estabelecidas são em grande parte semiempíricas e baseadas em análises estatísticas (ERZIN; GUNES, 2013; YILMAZ, 2006).

Além disso, a determinação das propriedades de expansão do solo (porcentagem de expansão livre e tensão de expansão), é um processo demorado, dispendioso e envolve ensaios destrutivos. Diante disso, existe uma necessidade de desenvolver modelos de previsão confiáveis que possam ser aplicados de forma rápida, econômica e não destrutiva. Isso seria particularmente importante nas fases iniciais do projeto de uma estrutura (ERZIN; GUNES, 2013; KAYABALI; DEMIR, 2011).

A tensão de expansão, na prática, pode ser compreendida como a pressão ascendente gerada pelo solo quando ele se expande. Em laboratório, pode ser determinada de algumas formas, duas delas foram discutidas na seção 2.2 deste trabalho. Todavia, também pode ser interpretada como a pressão necessária para manter o solo em seu estado não expandido ou para restaurá-lo ao estado inicial (índices físicos inalterados e sem deformação volumétrica) antes da ocorrência da expansão (GAWRIUCZENKOW; WÓJCIK, 2018; YILMAZ, 2006).

A Tabela 13 apresenta vários modelos que relacionam os parâmetros de expansão entre si, a expansão livre com a tensão de expansão. Enquanto a Tabela 14 mostra alguns modelos de previsão que correlacionam os parâmetros de expansão com diversos índices físicos do solo propostos por diversos autores.

Tabela 13: Correlações de previsão entre expansão livre e tensão de expansão.

Relação	Coefficiente de correlação	Referência
$Sp = 1,9319 * FS^{1,2897}$	$R^2 = 0,94$	Erzin e Gunes (2013), para valores de tensão abaixo de 300 kPa.
$Sp = 93,3 * FS - 53,4$	$R^2 = 0,93$	Kayabali e Demir (2011), para valores de tensão abaixo de 300 kPa.
$Sp = 8,8553 * FS$	$R^2 = 0,90$	Gawriuczenkow e Wojcik (2018), para valores de tensão abaixo de 400 kPa.
$Sp = 63,78 * e^{0,1528 * FS}$	$R^2 = 0,90$	Sridharan & Gurtug (2004), para
$Sp = 48,32 * FS$	$R^2 = 0,98$	valores de tensão abaixo de 1000 kPa.

***Sendo: Sp = tensão de expansão; FS = expansão livre**

Fonte: Autoria própria.

Tabela 14: Correlações entre índices físicos e parâmetros de expansão do solo.

Relação entre parâmetros	Referência
$FS = 2,16 \times 10^{-3} x (IP)^{2,44}$	Seed <i>et al.</i> (1962)
$\text{Log}(FS) = 2,132 + 0,0208(LL) + 5,65 \times 10^{-4}(\gamma d) - 0,0269w$	Komornik e David (1969)
$Sp = 2,29 \times 10^{-2}(IP)^{1,45}(C/w) + 6,38$	Nayak e Christensen (1971)
$\text{Log}(FS) = 0,0833(0,4LL - w + 5,5)$ $\text{Log}(FS) = 0,051282(6,242\gamma d + 0,65LL - 130,5)$	Vijayvergiya e Ghazzally (1973)
$\text{Log}(FS) = 0,0562\gamma d + 0,033LL - 6,8$	Vijayvergiya e Sulvian (1973)
$\text{Log}(Sp) = 0,9(IP/w) - 1,19$	Schneider e Poor (1974)
$FS = 2,77 + 0,131LL - 0,27w$	O'Neil e Ghazzally (1977)
$\text{Log}(FS) = 0,036LL - 0,0833w + 0,458$	Johnson e Snethen (1978)
$Sp = 0,0446LL - 1,572$	Nayak (1979)
$FS = 0,000195LL^{4,17}(w)^{-2,33}$	Weston (1980)
$FS = 0,2558e^{0,0838(IP)}$	Chen (1988)
$FS = 41,161Ac + 0,6236$ $FS = 0,0763\psi - 339,03$	Cokca (2002)
$\text{Log}(Sp) = -4,812 + 0,01405(IP) + 2,394\gamma d - 0,0163w$	Erzin e Erol (2004)
$FS = 1,0 + 0,06(C + IP - w)$ $Sp = 135 + 2(C + IP - w)$	Sabtán (2005)
$Sp = 25(0,001\psi)^{0,25}$	Thakur e Singh (2005)
$FS = -432,06 + 7,73C + 0,12CTC + 0,46IP + 4,31\gamma d - 1,18w$ $Sp = -1346,2 + 257,1C + 43,13CTC - 18,18IP + 33,43\gamma d -$ $25,21w - 3,41FS$	Erzin e Gunes (2011)
$FS = -9,567 + 0,606C + 0,636IP - 0,792w - 0,487\gamma d + 6,289LL$	Erzin e Gunes (2013)

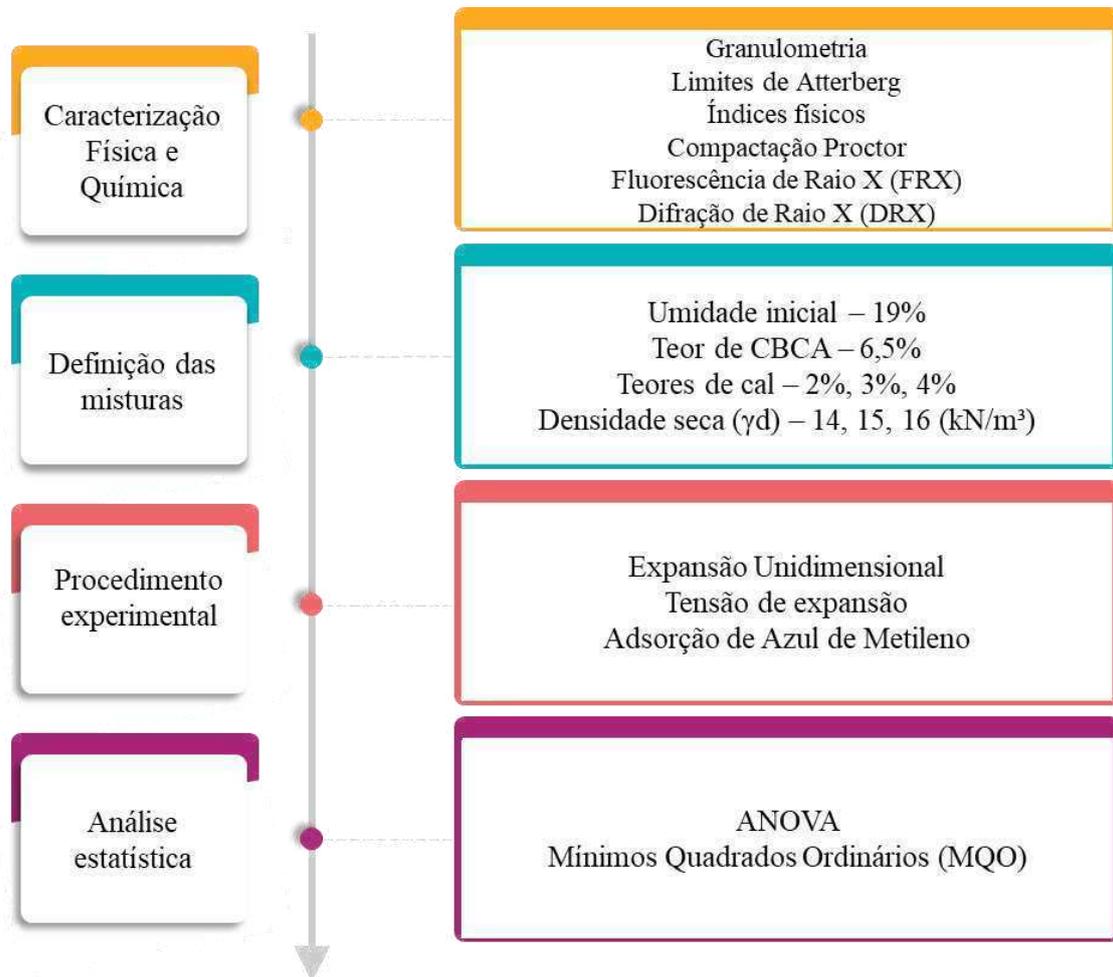
Sendo: FS = expansão livre; Sp = tensão de expansão; IP = índice de plasticidade; LL = limite de liquidez; γd = peso específico seco; w = umidade; C = teor de argila; Ac = atividade da argila; ψ = sucção; CTC = capacidade de troca catiônica.

Fonte: Adaptado de Erzin e Gunes (2013) e Gawriuczenkow e Wojcik (2018).

3 METODOLOGIA

Nesta seção será apresentada a abordagem metodológica adotada nesta pesquisa, detalhando os materiais e procedimentos experimentais utilizados, com o objetivo de avaliar a influência da cal e da CBCA como aditivos no tratamento de um solo expansivo e determinar a tensão de expansão gerada durante a expansão livre desse solo. A Figura 17 representa um fluxograma das principais etapas metodológicas.

Figura 17: Fluxograma das etapas metodológicas.



Fonte: Autoria própria.

A pesquisa teve início com os ensaios de caracterização físico-química do solo expansivo e da CBCA. Utilizaram-se os resultados obtidos nos ensaios conduzidos por Tenório (2019) e Silva (2022) para caracterização do solo e da CBCA, respectivamente. Essa etapa visou estabelecer as propriedades fundamentais dos materiais envolvidos neste estudo. Com base nos resultados da caracterização, foram selecionados os teores de cal e CBCA aplicados

nesta pesquisa, bem como os diferentes pesos específicos das misturas. Essa escolha foi baseada em garantir que os aditivos fossem usados em quantidades representativas e relevantes, seguindo as recomendações de pesquisas similares.

O procedimento experimental foi conduzido, abrangendo desde a moldagem dos corpos de prova até as condições dos ensaios e os critérios de validação de dados. Em seguida, procedeu-se com os ensaios de determinação da expansão livre das misturas solo/CBCA/cal, bem como a medição da tensão de expansão gerada durante a expansão das misturas. Esses ensaios foram essenciais para compreender o comportamento do solo sob diferentes condições.

Após a realização dos ensaios, procedeu-se à análise dos resultados, incluindo cálculos e gráficos que demonstraram a eficiência dos aditivos na estabilização química do solo expansivo. Além disso, foi conduzida uma análise estatística abrangente, utilizando análise de variância ANOVA e o modelo de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) para validar os dados obtidos, assegurando a significância dos resultados e confiabilidade da pesquisa.

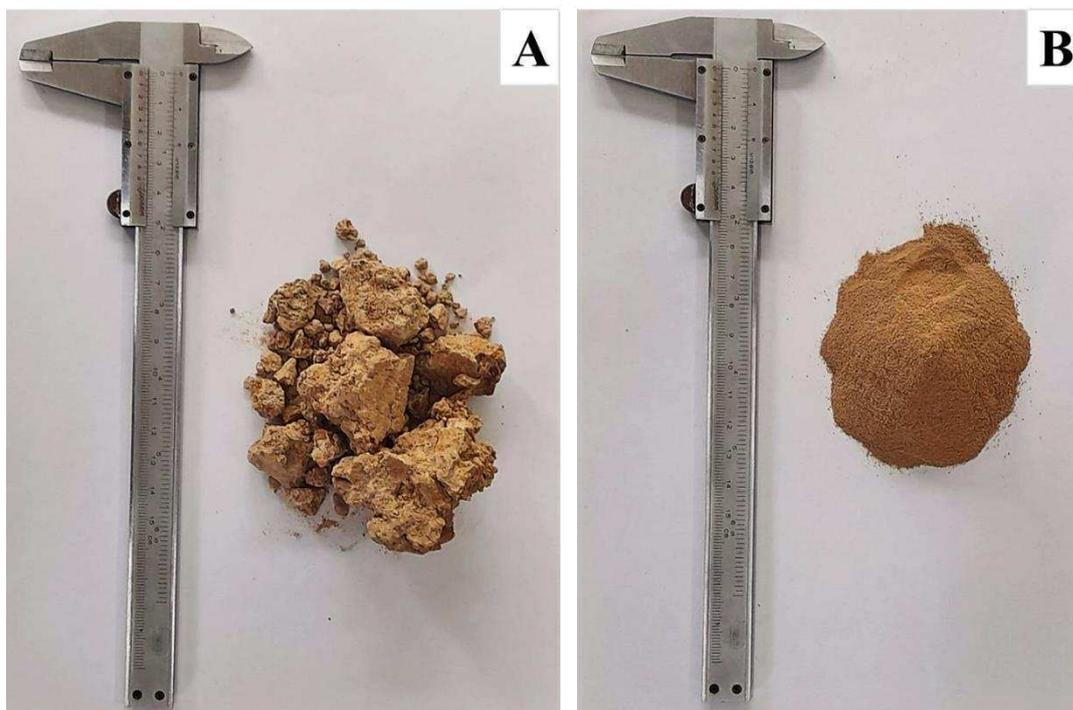
3.1 Materiais

3.1.1 Solo expansivo

O solo utilizado nesta pesquisa foi coletado na zona rural do município de Paulista-PB. As amostras deformadas foram extraídas de uma vala com dimensões de 2 metros de comprimento, 1 metro de largura e 1,4 metros de profundidade, seguindo as recomendações da norma NBR 9820 (ABNT, 1997). Posteriormente, essas amostras foram transportadas para o Laboratório de Engenharia de Pavimentação (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

O solo expansivo passou pelo processo de destorroamento em partículas menores, ilustrado pela Figura 18, sendo posteriormente passado pela peneira de 0,42 mm. Em seguida, foi armazenado adequadamente em um recipiente protegido contra a umidade.

Figura 18: Processo de destorroamento: (A) inicialmente; (B) após peneiramento.



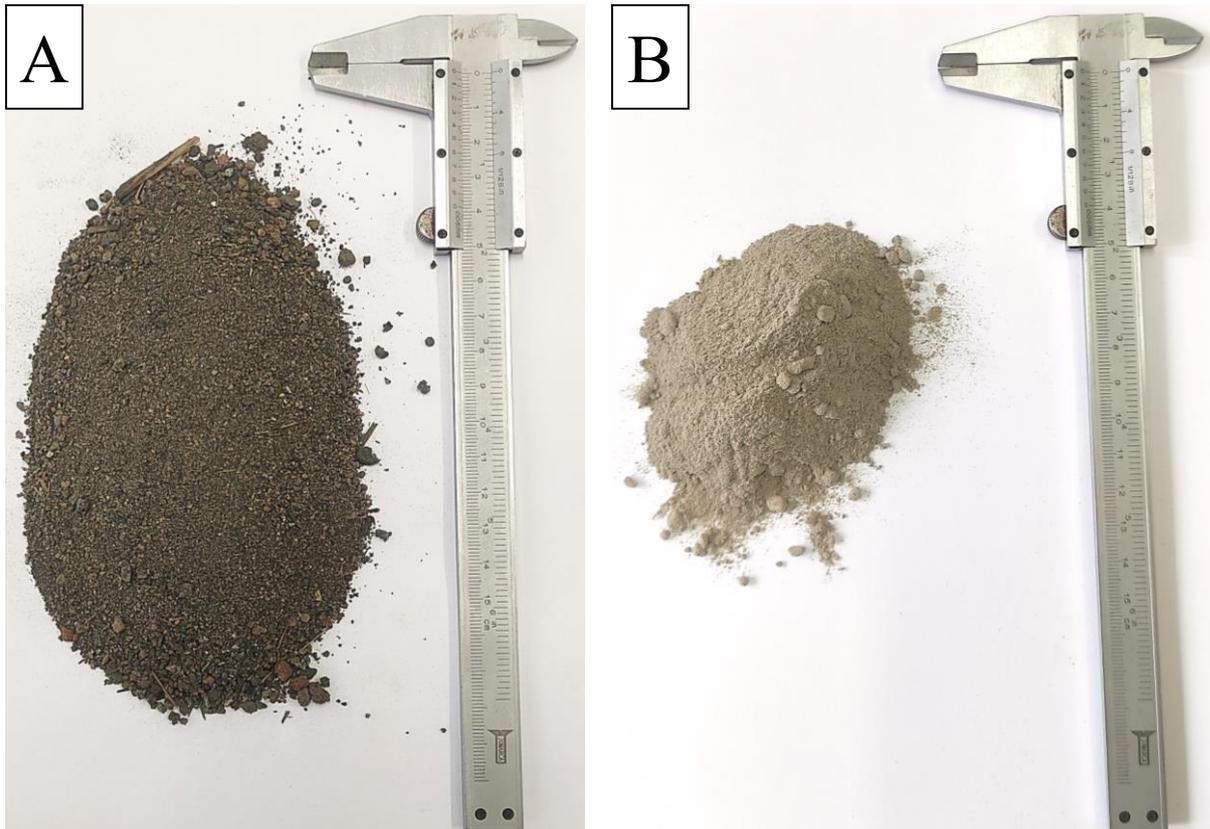
Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar

A cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBCA) utilizada foi coletada em uma usina sucroalcooleira de pequeno porte, localizada na Fazenda Floresta, BR 230, KM 134, zona rural, distrito de Galante, município de Campina Grande-PB. Essa usina utiliza o bagaço da cana-de-açúcar, um subproduto da extração de melaço, como combustível para sua caldeira, gerando a cinza (CBCA) como resíduo. Silva (2022) realizou medições da temperatura de queima no interior da caldeira e constatou falta de uniformidade na queima do bagaço, atingindo no máximo uma temperatura de queima de 600°C.

A CBCA foi transportada para o Laboratório de Engenharia de Pavimentação (LEP) da UFCG, onde foi peneirada com peneira de 0,42 mm e passou por um processo de requeima em mufla, mantendo uma temperatura constante de 700°C durante 90 minutos. Este processo foi realizado por Chusilp, Jaturapitakkul e Kiattikomol (2009), Cordeiro *et al.* (2008), Cordeiro, Andreão e Tavares (2019), Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009) e Silva (2022), que também adotaram a mesma temperatura de requeima com o objetivo de homogeneizar o material, uniformidade na temperatura de queima, bem como preservar suas propriedades químicas. Após a requeima, a CBCA foi devidamente armazenada em um recipiente protegido contra a umidade. A Figura 19A ilustra a CBCA quando coletada *in natura* e a Figura 19B após o processo de peneiramento e requeima na mufla.

Figura 19: Estado da CBCA: (A) *in natura*; (B) após peneiramento e requieima.



Fonte: Autoria própria.

3.1.3 Cal

Foi utilizada cal hidratada da marca “MegaO”, adquirida no comércio local de Campina Grande-PB. A cal é frequentemente utilizada pelo grupo de pesquisa de geotecnia da UFCG e, conforme estabelecido por Tenório (2019), possui um peso específico de 24 kN/m^3 . A cal foi armazenada em um recipiente devidamente protegido contra a umidade.

3.2 Métodos

3.2.1 Preparação das amostras

A preparação das amostras (secagem, destorroamento e peneiramento) dos materiais utilizados nesta pesquisa, seguiu as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 6457 (ABNT, 2016b), para os ensaios de caracterização físico-química e a moldagem dos corpos de prova.

3.2.2 Caracterização física

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física conduzidos tanto para o solo por Tenório (2019), quanto para a CBCA por Silva (2022) foram empregados, uma vez que se trata dos mesmos materiais utilizados nesta pesquisa. Um resumo das características físicas do solo e da CBCA é apresentado na Tabela 15, seguindo as normas específicas correspondentes.

Tabela 15: Propriedades físicas do solo expansivo e CBCA e as normas técnicas referentes.

Propriedade física	Solo	CBCA	Norma Técnica
Peso Específico Real	26,5 kN/m ³	25,01 kN/m ³	NBR 6458 (ABNT, 2016c)
Areia Grossa (0,6 mm < d < 2 mm)	1,66%	0,00 %	
Areia Média (0,2 mm < d < 0,6 mm)	2,96%	0,00 %	
Areia Fina (0,06 mm < d < 0,2 mm)	28,34%	20,54 %	NBR 7181 (ABNT, 2016f)
Silte (0,002 mm < d < 0,06 mm)	21,58%	53,40 %	
Argila (d < 0,002 mm)	45,46%	26,06 %	
Diâmetro Efetivo (D10)	0,005 mm	0,004 mm	
Limite de Liquidez	49%	-	NBR 6459 (ABNT, 2016d)
Limite de Plasticidade	21%	-	NBR 7180 (ABNT, 2016e)
Índice de Plasticidade	28%	NP*	
Classificação SUCS	CL-CH	ML	ASTM D2487-17 (ASTM, 2017)
Atividade da argila	0,62	-	

*NP – Não Plástica

Fonte: Adaptado de Tenório (2019) e Silva (2022).

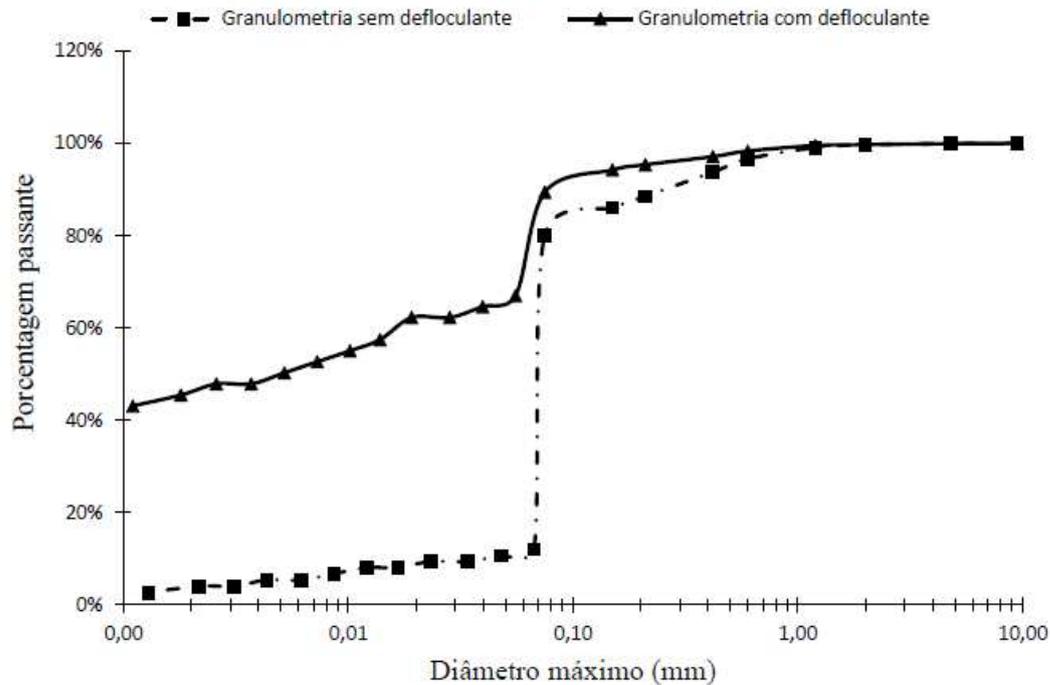
O índice de plasticidade de 28% indica que o solo exibe propriedades plásticas, o que é comum em solos coesivos. A distribuição do tamanho das partículas do solo em estudo está ilustrada na Figura 20. Observou-se uma variação significativa na curva com e sem defloculante. Isso sugere que a granulometria do solo pode não refletir sua real condição. Essa discrepância pode levar a interpretações equivocadas em campo das propriedades do solo.

Com base na distribuição granulométrica do solo, pode-se concluir que ele é predominantemente fino. Utilizando a granulometria com defloculante, o material possui 10,58% de areia, 43,96% de silte e 45,46% de argila, conforme a escala da norma NBR 7181 (ABNT, 2016f). Em relação à distribuição sem defloculante, o solo apresenta-se com 19,84% de areia, 76,14% de silte e 4,02% de argila, caracterizando assim um solo siltoso arenoso.

Quanto à classificação do solo, segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) de acordo com a norma ASTM D2487-17 (ASTM, 2017), ele pode ser categorizado como uma argila de baixa compressibilidade (CL) ou argila de alta compressibilidade (CH).

Pelo sistema rodoviário, ou *Highway Research Board* (HRB), o solo é classificado como A-7-6 de acordo com a norma ASTM D3282-15 (ASTM, 2015), indicando um solo fino argiloso com alta compressibilidade.

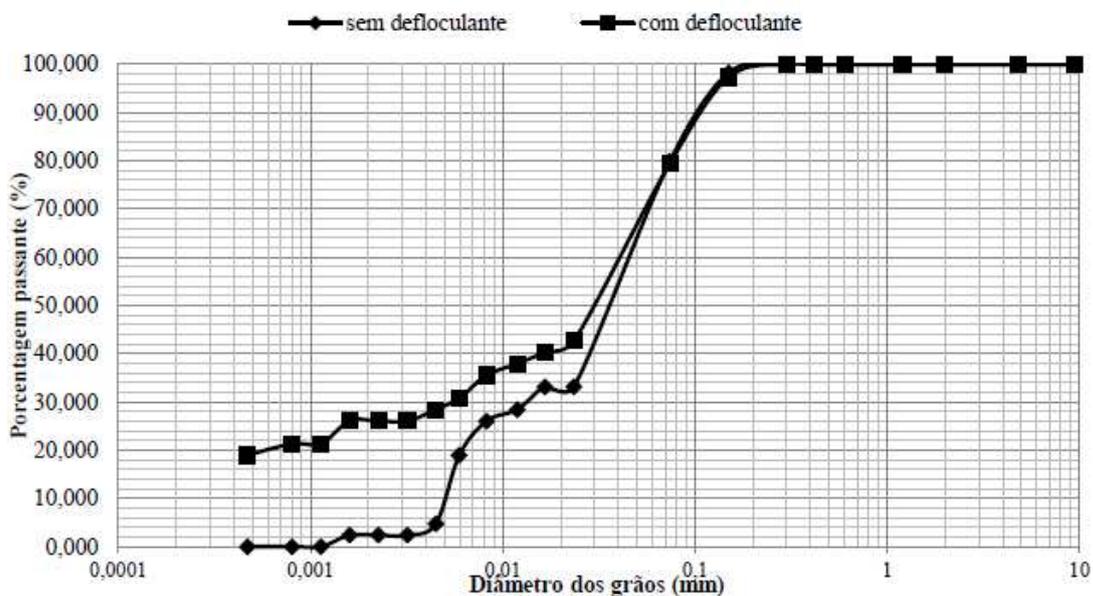
Figura 20: Distribuição granulométrica do solo expansivo com e sem defloculante.



Fonte: Adaptado de Tenório (2019).

Na Figura 21, apresenta-se a curva granulométrica da CBCA, obtida pelos ensaios de sedimentação e peneiramento, com e sem defloculante.

Figura 21: Distribuição granulométrica com e sem defloculante da CBCA.

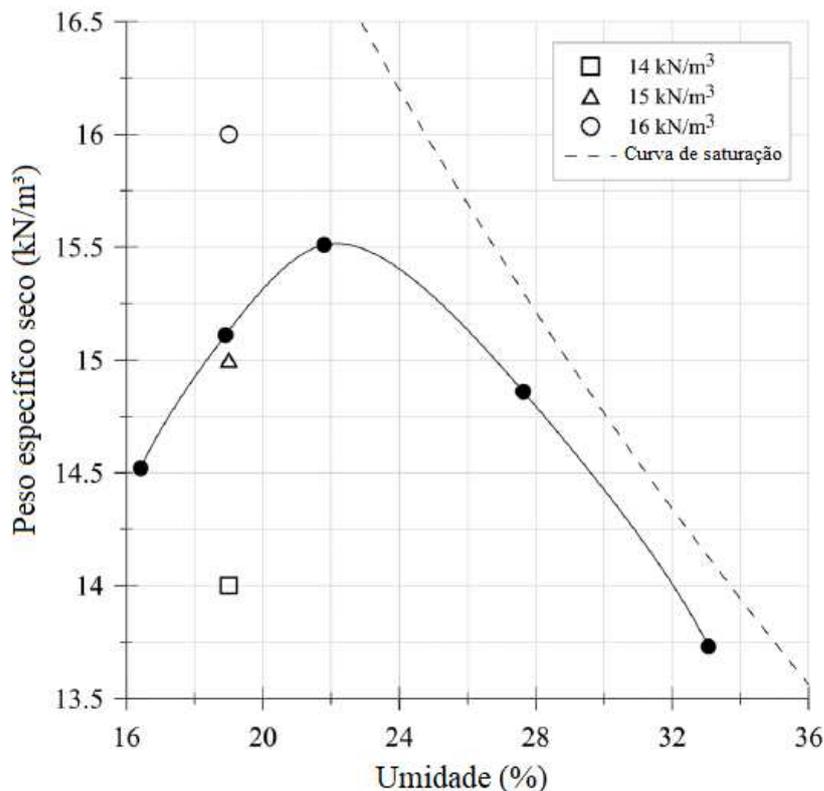


Fonte: Adaptado de Silva (2022).

Com base na avaliação do índice de plasticidade, a CBCA foi classificada como uma cinza não plástica (NP), uma característica comum em 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, considerando o SUCS, a CBCA é classificada como um silte de baixa compressibilidade (ML).

A Figura 22 exibe a curva de compactação do solo, obtida por meio do ensaio de Proctor. O ensaio foi realizado com a energia de compactação normal, reutilização de material e o cilindro pequeno. O solo em análise apresentou umidade ótima de 23% e densidade seca máxima de 15,4 kN/m³.

Figura 22: Curva de compactação Proctor do solo expansivo.



Fonte: Adaptado de Tenório (2019).

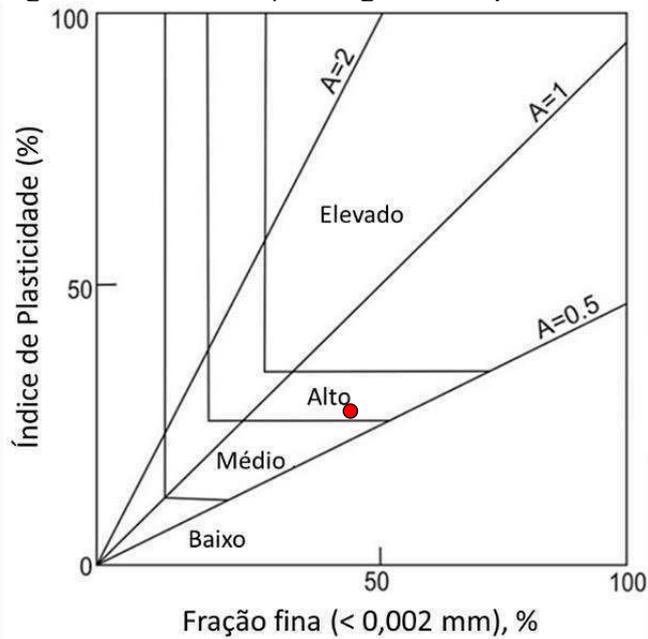
Com base nas propriedades físicas obtidas, foi realizada uma classificação do potencial de expansão do solo utilizando os métodos indiretos apresentados na seção 2.2. De acordo com os índices $LL = 49$, $IP = 28$, fração de finos (45,46%) e atividade da argila de 0,62, a classificação do solo está apresentada na Tabela 16 e nas Figuras 23, 24 e 25. Nas Figuras, o solo está representado por pontos vermelhos nos gráficos e pode-se observar que o solo possui um potencial de expansão entre médio e alto, com base nos critérios adotados pelos referidos autores.

Tabela 16: Classificação do potencial de expansão de um solo.

Referência	LL	IP	% finos
Chen (1988)	Alto	Médio/alto	-
Dakshanamurthy e Raman (1973)	Médio	Médio	-
Holtz e Gibbs (1956)	-	Médio/alto	Elevado
Sridharan e Prakash (2000)	-	Médio	-
Seed <i>et al.</i> (1962)	-	Alto	-
Cuellar (1978)	-	Alto	-

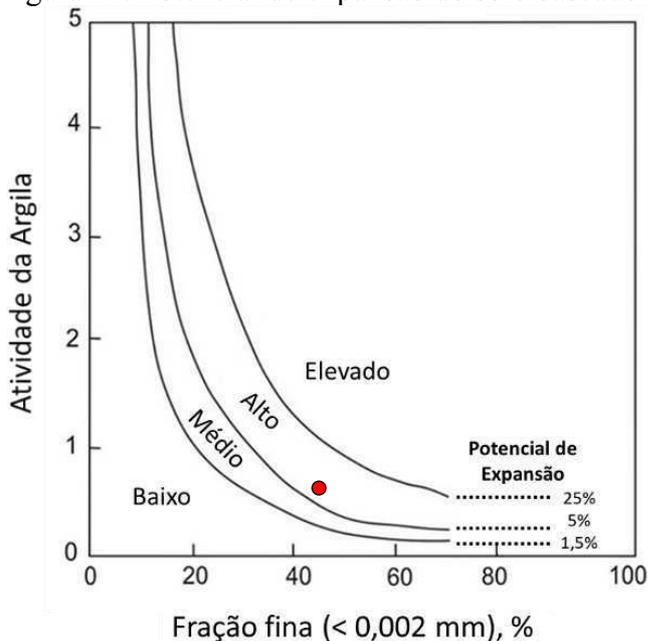
Fonte: Autoria Própria.

Figura 23: Classificação do grau de expansão do solo baseado no IP e na fração fina.



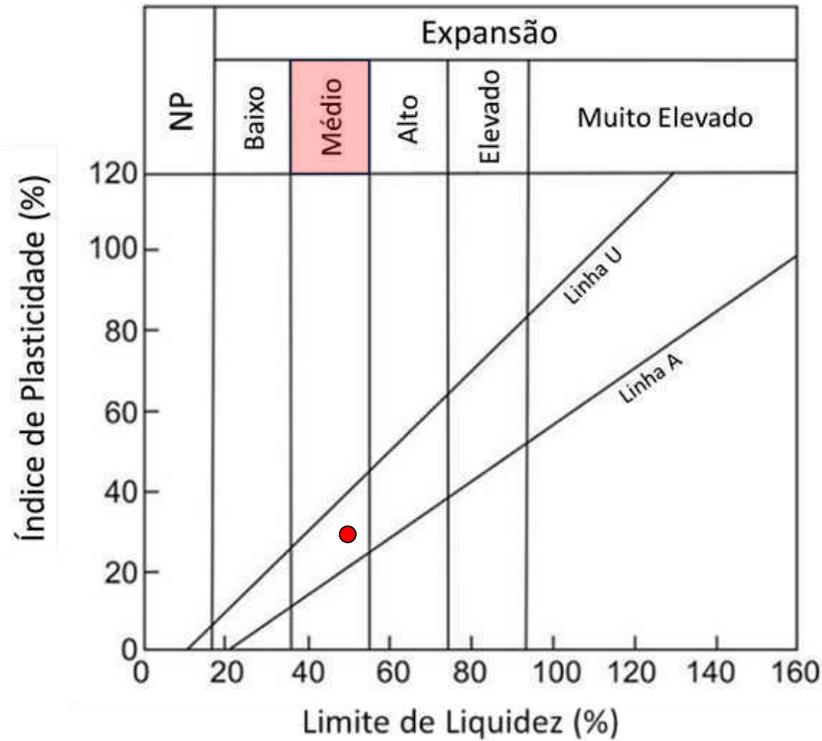
Fonte: Adaptado de Skempton (1953) e Merwe (1964).

Figura 24: Potencial de expansão do solo baseado na quantidade e atividade dos finos.



Fonte: Adaptado de Seed *et al.* (1962).

Figura 25: Grau de expansão do solo baseado nos índices de consistência.



Fonte: Adaptado de Dakshanamurthy e Raman (1973).

3.2.3 Caracterização química

A análise das propriedades químicas e composição do solo, cal e CBCA foi realizada com base nos resultados obtidos por meio dos ensaios conduzidos por Tenório (2019) e Silva (2022), de acordo com suas respectivas normas e descritos abaixo:

- Fluorescência de Raios-X (FRX): NBR 16137 (ABNT, 2016a)
- Difração de Raios-X (DRX)
- Adsorção de azul de metileno: ASTM C837-09 (ASTM, 2019a)

Os resultados do ensaio de fluorescência de raios-X estão detalhados na Tabela 17. Este ensaio foi conduzido sob atmosfera de vácuo, utilizando cátodos de cobre. Os principais componentes do solo incluem dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3). A sílica representa cerca de 55% do solo, enquanto os óxidos de ferro e alumínio representam 30% dos constituintes do solo. Esses componentes são os mais relevantes e permitem que o solo reaja com a cal, desenvolvendo reações pozolânicas (NALBANTOĞLU, 2004; MITCHELL; SOGA, 2005; ÜNVER *et al.*, 2021).

Tabela 17: Ensaio de FRX do solo expansivo.

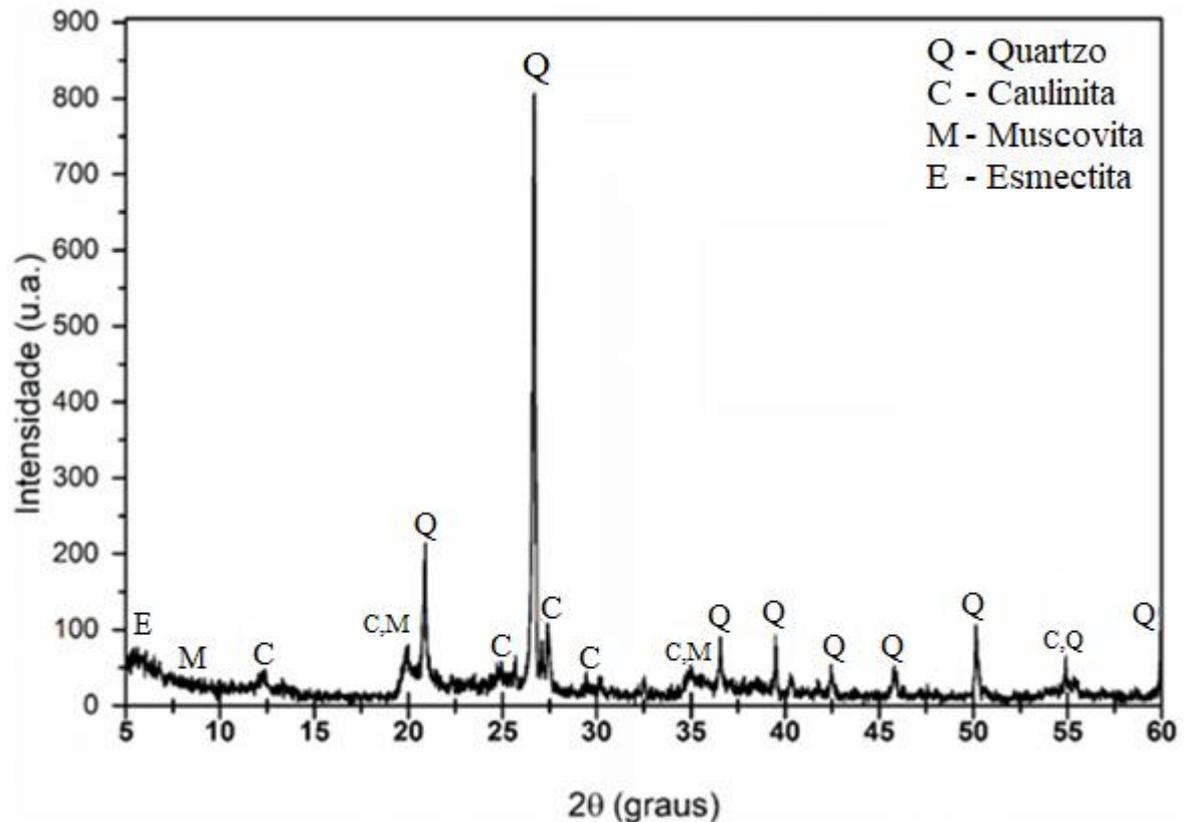
Fluorescência de raios-X do solo puro

Composto	Fração (%)
SiO ₂	54,94
Al ₂ O ₃	25,09
Fe ₂ O ₃	4,68
K ₂ O	2,35
MgO	1,34
TiO ₂	0,85
SO ₃	0,18
Outros	0,12
Perda ao Rubro	10,45

Fonte: Adaptado de Tenório (2019).

A Figura 26 apresenta a difração de raios-X (DRX) do solo. O ensaio foi realizado com uma amplitude de 5° a 60° e uma velocidade de varredura de 2°/min em equipamento com cátodo de cobre, diferença de potencial de 40 kV e corrente de 30 mA. O difratograma revelou picos de quartzo, caulinita e muscovita, juntamente com uma banda de esmectita. A banda de esmectita, que são argilominerais expansivos, indica que se trata de um solo expansivo.

Figura 26: Difratograma do solo expansivo.



Fonte: Adaptado de Tenório (2019).

A Tabela 18 apresenta os principais elementos químicos da análise da CBCA realizada por meio da espectrometria de Fluorescência de Raio-X (FRX). Esse ensaio foi conduzido de acordo com a norma NBR 16137 (ABNT, 2016a), com atmosfera a vácuo e cátodos de cobre.

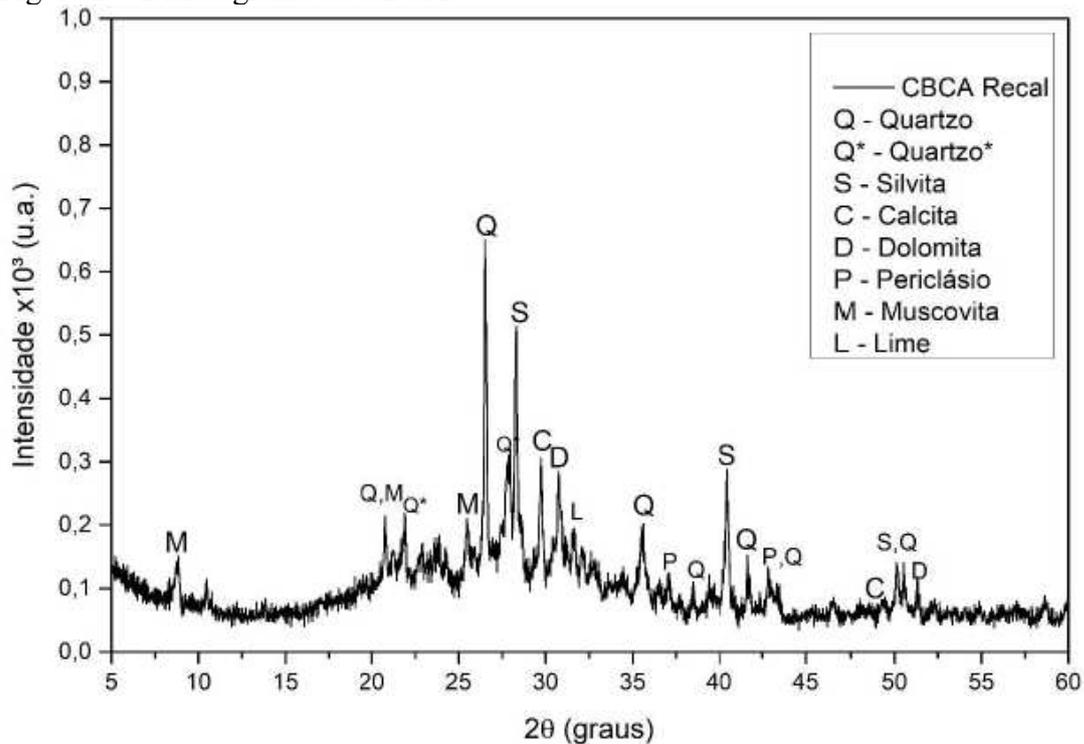
Tabela 18: Ensaio de FRX da CBCA.
Fluorescência de raios-X da CBCA

Composto	Fração (%)
SiO ₂	47,53
MgO	16,12
K ₂ O	8,81
Al ₂ O ₃	7,75
CaO	6,89
P ₂ O ₅	5,08
SO ₃	2,68
Fe ₂ O ₃	2,46
Cl	1,98
Outros	0,70
Perda ao rubro	0,00

Fonte: Adaptado de Silva (2022).

Os resultados da análise por difração de Raio-X (DRX) da CBCA estão representados na Figura 27. O ensaio de DRX foi conduzido com uma amplitude de 5° a 60° e uma velocidade de varredura de 2°/min, utilizando um equipamento com cátodo de cobre.

Figura 27: Difratoograma da CBCA.



Fonte: Adaptado de Silva (2022).

A análise química revelou que a CBCA é predominantemente composta por altos teores de sílica, bem como óxidos de magnésio (MgO), potássio (K₂O) e cálcio (CaO). A presença desses materiais é confirmada pelos picos de Quartzo, Periclásio, Silvita e Dolomita/*Lime* (Cal), respectivamente, encontrados no DRX.

Ao observar o valor considerável do teor de óxido de magnésio (MgO), é possível indicar um potencial significativo de reação da CBCA com o solo. Isso ocorre porque os cátions de Mg²⁺ podem substituir os cátions com menor valência presentes no solo, resultando em floculação e, aliado ao óxido de cálcio (CaO), são potenciais estabilizadores da expansão do solo (GRIM, 1953).

Com o teste de adsorção do azul de metileno é possível medir a capacidade de troca catiônica (CTC) pela Equação 2 e estimar o valor da área de superfície específica (ASE) com a Equação 3. O ensaio de adsorção do azul de metileno foi realizado para as misturas (solo/CBCA/cal) e seguiu as diretrizes da norma ASTM C837-09 (ASTM, 2019a). Para isso, foram utilizados: uma solução de azul de metileno com concentração molar de 10g/L, uma bureta graduada, 1g da mistura a ser ensaiada, água destilada e um béquer com capacidade nominal de 1 litro. Foram realizados os ensaios, em triplicata, para o solo puro e para as misturas do solo com 6,5% de CBCA, variando os teores de cal em 2%, 3% e 4%. A partir desses dados e utilizando as Equações 2 e 3, foram calculadas a CTC e a ASE das misturas.

Silva (2022) encontrou um valor de 121,98 m²/g para a ASE da CBCA, enquanto os valores obtidos por Tenório (2019) para a CTC e da ASE do solo foram de 59,20 meq/100g e 462,01 m²/g, respectivamente. A elevada superfície específica indica que o solo é capaz de reagir com a cal e desencadear reações pozolânicas.

$$CTC = \frac{C \times V}{m} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

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

C: concentração molar da solução (g/L);

V: volume em mL da solução de azul de metileno utilizado no ensaio;

m: massa da amostra seca (g).

$$ASE = CTC \times 7,8043 \quad (3)$$

Sendo:

ASE: Área de Superfície Específica (m²/g);

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

3.2.4 Planejamento experimental

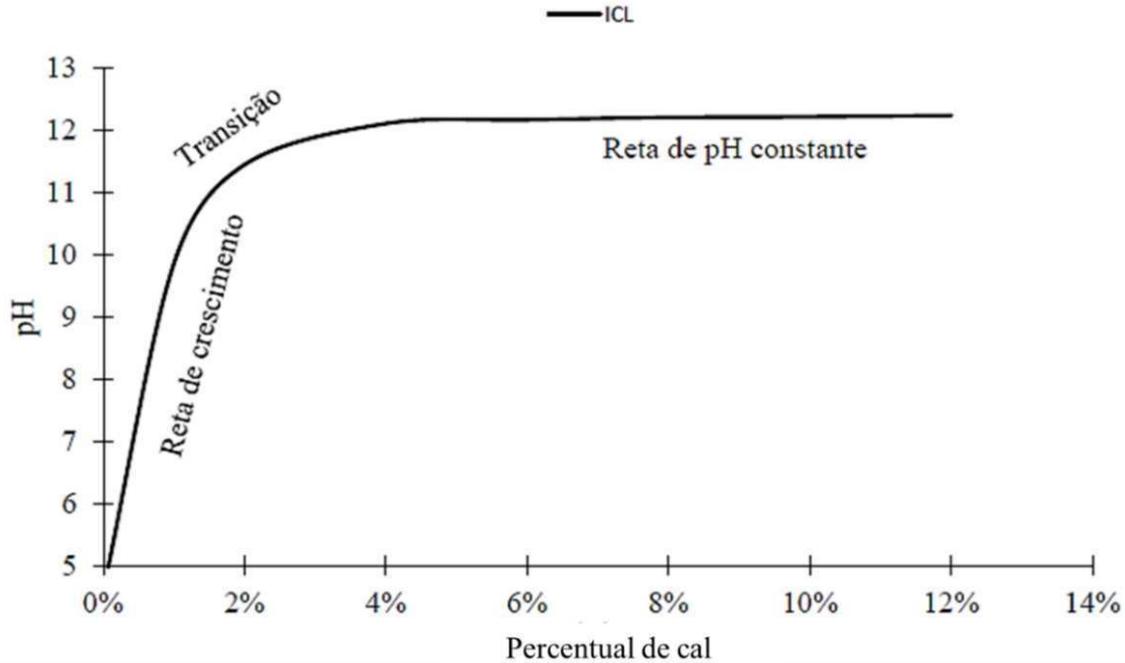
O teor de CBCA a ser adicionado ao solo foi baseado nos resultados obtidos por Silva (2022), que concluiu que uma adição de 6,5% de CBCA (mesmo material utilizado nesta pesquisa) a um solo expansivo (com base de bentonita + areia) seria suficiente para minimizar a expansão.

Os valores de pesos específicos secos adotados foram em conformidade com a pesquisa de Tenório (2019), que utilizou valores de 14, 15 e 16 kN/m³ ao investigar a estabilização de um solo expansivo (o mesmo solo utilizado nesta pesquisa) com adição de cal e pó de mármore. Esses pesos específicos secos foram selecionados com base na curva de compactação do ensaio Proctor com energia normal, mostrado na Figura 22. A escolha desses valores visou garantir a exequibilidade dos corpos de prova, optando-se por valores próximos ao peso específico máximo. Além disso, a variação da porosidade foi considerada ao variar o peso específico seco, permitindo testar o método de dosagem utilizando o coeficiente porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv}).

A seleção do teor de umidade inicial para a moldagem das misturas também foi baseada em Tenório (2019), que adotou o valor de 19% de umidade. A umidade foi escolhida com base na curva de compactação e na premissa de garantir uma amplitude de expansão que pudesse ser mensurada, pois com 19% de umidade a saturação dos corpos de prova variou entre 50% e 75%.

A determinação dos teores de adição de cal foi baseada na experiência adquirida ao realizar ensaios de tentativa e erro e com base nos resultados obtidos pelo ensaio de consumo inicial de cal (ICL) por Tenorio (2019). A Figura 28 apresenta os resultados do ensaio de consumo inicial de cal (ICL) utilizando cal e o solo em estudo, conforme a norma ASTM D6276-19 (ASTM, 2019b). Neste ensaio, foram adicionados os teores de cal de 1%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10% e 12% de massa seca do solo. O pH constante foi atingido para o teor de 6%. Portanto, em teores iguais ou superiores a 6%, a expansão do solo deve ser próxima a zero.

Figura 28: Ensaio de ICL do solo expansivo com a cal.



Fonte: Adaptado de Tenório (2019).

De acordo com Tenório (2019) e na Figura 28, os valores de teor de cal de 2%, 3% e 4% se encontram na zona de transição e início da reta de pH constante do ensaio de ICL. Além disso, observou-se que com 1% de cal adicionada à mistura solo/CBCA, a expansão do solo não era controlada, resultando em uma expansão contínua. Por outro lado, com valores acima de 4% de cal, o solo/CBCA não apresentava expansão, praticamente eliminando o potencial de expansão. No entanto, uma vez que um dos objetivos da pesquisa era avaliar a influência dos aditivos na expansão e não determinar a dosagem necessária para eliminar completamente o potencial de expansão, os teores de 2%, 3% e 4% foram adotados.

Portanto, a Tabela 19 mostra todas as variáveis e parâmetros fixos ou controláveis que foram adotadas para a dosagem dos corpos de provas.

Tabela 19: Variáveis fixas e controladas das misturas para os ensaios.

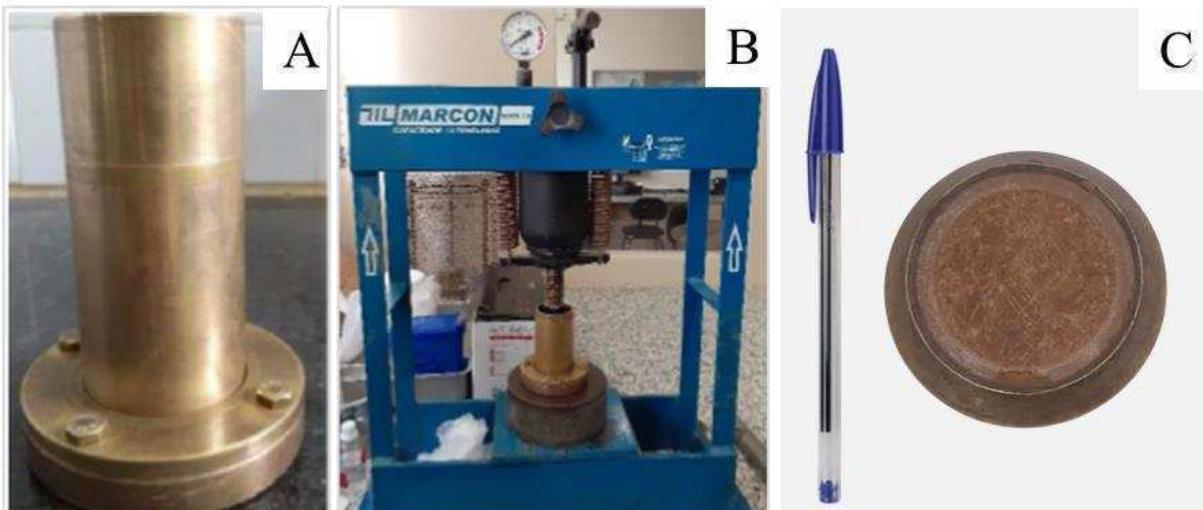
Característica	Condição	Valores
Umidade inicial	Fixo	19%
Teor de CBCA	Fixo	6,5%
Teor de cal	Variável	0%, 2%, 3%, 4%
Peso específico seco	Variável	14, 15, 16 (kN/m ³)

Fonte: Autoria própria.

3.2.5 Moldagem dos corpos de prova

O processo de moldagem das misturas com as dosagens de aditivos selecionadas seguiu o procedimento descrito a seguir: inicialmente, o solo expansivo era colocado em um recipiente e adicionava-se água até atingir a umidade inicial de 19%, realizando uma mistura para homogeneização. Em seguida, a cal e a CBCA eram adicionadas nas dosagens escolhidas e misturadas completamente até uniformidade. A mistura resultante era então inserida em um molde e encaminhada para uma prensa, onde seria compactada estaticamente até atingir o peso específico seco selecionado. Os corpos de prova obtidos possuíam dimensões com altura de 20 mm e diâmetro de 50 mm. Estes eram inseridos no anel edométrico e utilizados imediatamente para a realização do ensaio de expansão, sem tempo de cura (o ensaio ocorria no mesmo dia da moldagem). A Figura 29 ilustra o processo de inserir a mistura no molde (A), para ser compactado estaticamente na prensa (B) e depois inserido no anel edométrico (C).

Figura 29: Moldagem dos corpos de prova: (A) molde cilíndrico; (B) prensa; (C) amostra moldado no anel edométrico.



Fonte: Autoria própria.

3.2.6 Ensaios de expansão livre e tensão de expansão

Para caracterizar a expansão das misturas solo/CBCA/cal e a eficácia dos aditivos na estabilização, foram conduzidos ensaios de expansão unidimensional em células edométricas convencionais, conforme a norma ASTM D4546-21 (ASTM, 2021). Uma sobrecarga inicial de 10 kPa (carga de assentamento) foi adotada, seguindo a prática comum também adotada por Silva (2022), Tenório (2019) e outras pesquisas (CONSOLI *et al.*, 2020a; FERREIRA *et al.*, 2018; PAIVA *et al.*, 2016; SILVA; BELLO; FERREIRA, 2020; SILVANI *et al.*, 2020;

SILVANI; SILVA; GUEDES, 2023). A célula de adensamento, com o corpo de prova acoplado, foi posicionada no equipamento edométrico, e a sobrecarga de 10 kPa foi aplicada por 10 minutos. Após esse período, a célula de adensamento era inundada por água, e a deformação do corpo de prova era monitorada por um extensômetro instalado no equipamento. As leituras eram realizadas nos intervalos de 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 15; 30; 60; 120; 240 e 480 minutos, em que foi observado a estabilização das misturas, conforme preconizado na norma ASTM D2435-11 (ASTM, 2020).

No que se refere à tensão de expansão das misturas solo/CBCA/cal, foi determinada da seguinte maneira: após a expansão da mistura ter cessado, uma sobrecarga foi gradualmente adicionada ao equipamento, promovendo o adensamento do corpo de prova. Esse processo continuou até que o corpo de prova retornasse à sua deformação inicial zero (altura inicial do corpo de prova), antes da expansão por inundação. Ao final do ensaio, eram somadas todas as sobrecargas aplicadas ao corpo de prova.

A carga inicial aplicada ao corpo de prova constitui do somatório do peso do cabeçote do anel edométrico e do peso das pedras porosas, dividido pela área do corpo de prova (19,63 cm²) e multiplicado pelo braço da alavanca do equipamento edométrico. Esta carga é somada então com a sobrecarga inicial de assentamento, totalizando uma carga inicial de aproximadamente 10 kPa. Então, a tensão de expansão total adotada nos cálculos desta pesquisa considera a soma desta carga inicial mais o somatório das sobrecargas adicionais aplicadas durante o ensaio. Toda essa carga representa a tensão de expansão gerada pelo solo durante a expansão vertical livre.

3.2.7 Porosidade e parâmetro η/L_{iv}

A porosidade inicial (η) pode ser calculada como a razão entre o volume de vazios e o volume total do corpo de prova. Essa razão foi ajustada em função do peso específico seco (γ_d) da mistura, o teor de cal (L), o teor de solo expansivo (S), o teor de CBCA (CBCA), o volume total do corpo de prova (V_s) e os pesos específicos real do solo ($\gamma_{sS} = 26,5 \text{ kN/m}^3$), da CBCA ($\gamma_{sCBCA} = 23,8 \text{ kN/m}^3$) e da cal ($\gamma_{sL} = 24,1 \text{ kN/m}^3$). Essa relação é calculada pela Equação 4.

O teor volumétrico de cal é uma razão que considera o volume de cal, V_L (massa de cal, m_L , dividida pelo peso específico real da cal, γ_{sL}) e o volume total do corpo de prova (V_s). Esse índice é calculado pela Equação 5. Por fim, a partir das Equações 4 e 5, o parâmetro η/L_{iv} pode ser calculado.

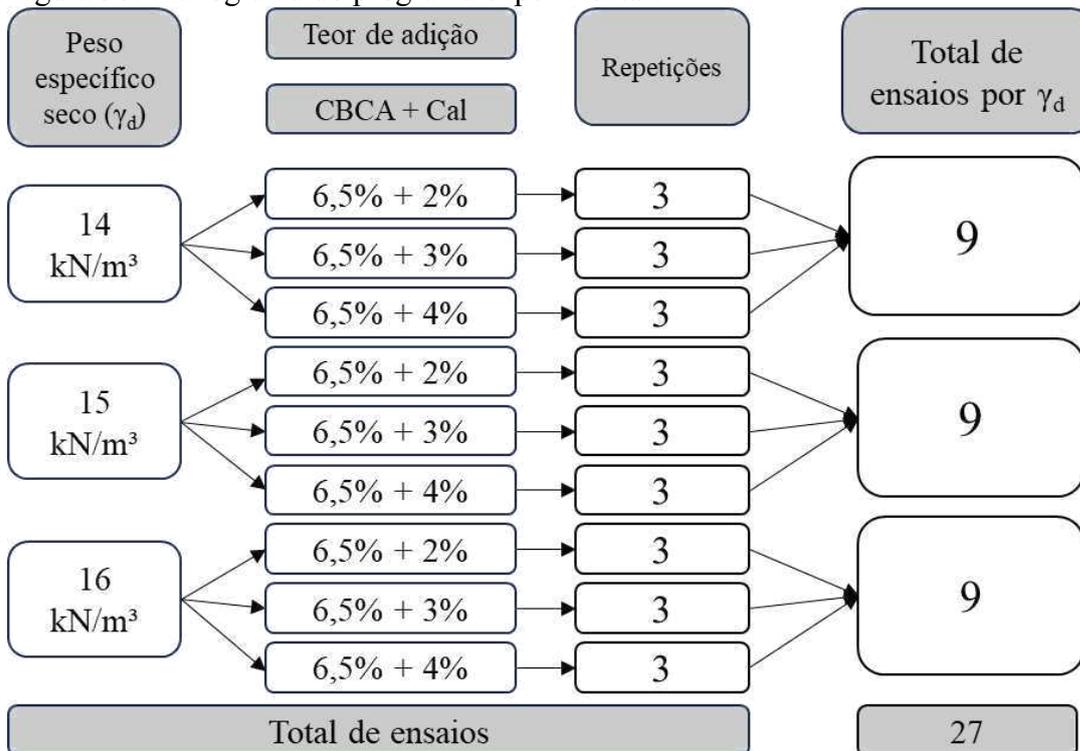
$$\eta = 100 - \frac{100 \left\{ \frac{\gamma_d V_S}{1 + \frac{L}{100}} x \left(\frac{S}{100} \right) + \frac{\gamma_d V_S}{1 + \frac{L}{100}} x \left(\frac{CBCA}{100} \right) + \frac{\gamma_d V_S}{1 + \frac{L}{100}} x \left(\frac{L}{100} \right) \right\}}{V_S} \quad (4)$$

$$L_{iv} = \frac{V_L}{V_S} = \frac{m_L / \gamma_{sL}}{V_S} \quad (5)$$

3.2.8 Programa experimental

O procedimento dos ensaios de expansão unidimensional para determinar a expansão livre e a tensão de expansão seguiu o fluxograma apresentado na Figura 30. Todos os ensaios foram realizados em triplicata, sob condições controladas de densidade e umidade, em diferentes teores de cal, totalizando 27 ensaios e, portanto, na produção de 27 corpos de prova. Mais detalhes sobre a dosagem desses 27 CP's estão disponíveis na Tabela A1 do Apêndice.

Figura 30: Fluxograma do programa experimental.



Fonte: Autoria própria.

3.2.9 Análise estatística

Para avaliar a significância dos modelos e a possibilidade de previsão, foram conduzidas análises de regressão linear múltipla. Os métodos de estimação e análise de significância

estatística seguiram os princípios dos Modelos de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) e Análise de Variância (ANOVA). Essas análises foram realizadas após a verificação da Matriz de Correlação, a qual é empregada para identificar correlações negativas ou positivas entre as variáveis. Para a realização dessas análises foram utilizadas 27 observações.

Os regressores considerados foram o percentual de teor de cal e o peso específico seco. Foram analisados três modelos distintos, denominados como: Modelo Expansão, Modelo Tensão e Modelo Tensão x Expansão. A Tabela 20 apresenta as variáveis dependentes e independentes de cada modelo.

Tabela 20: Modelos de Regressão analisados.

Modelo	Variáveis dependentes	Variáveis independentes
Modelo Expansão	Expansão livre	Teor de Cal Peso específico seco
Modelo Tensão	Tensão de expansão	Teor de Cal Peso específico seco
Modelo Tensão x Expansão	Tensão de expansão	Teor de Cal Peso específico seco Expansão livre

Fonte: Autoria própria.

A regressão é um procedimento que visa determinar uma equação que descreva o comportamento de uma variável dependente com base em uma ou mais variáveis independentes, com o intuito de compreender a relação entre elas.

Na análise de variância ANOVA, foram examinados o teste F, que tem como finalidade verificar a significância estatística do modelo estudado para fins de previsão, sendo o p-valor utilizado para concluir a análise do teste F. Além disso, foi analisado o coeficiente de correlação (R^2), medindo a variação de Y explicada por X. Um R^2 mais próximo de 1,0 (um) indica uma forte relação entre as variáveis. Nesse contexto, a hipótese considerada foi que a expansão e a tensão são influenciadas pelo percentual de cal adicionado na mistura e pelo peso específico seco de compactação.

Todas as análises foram realizadas utilizando o *software Gretl*, que compila e interpreta dados econométricos, permitindo verificar a relação entre as variáveis e determinar modelos estatisticamente significativos e preditivos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão discutidos os resultados do programa experimental conduzido para a realização desta pesquisa. A discussão desses resultados abrange os dados obtidos dos ensaios de adsorção de azul de metileno, ensaios de expansão unidimensional para medição da expansão livre e tensão de expansão, bem como os resultados obtidos da análise estatística dos dados da pesquisa.

4.1 Adsorção de azul de metileno

Os resultados do ensaio de Adsorção de azul de metileno sobre o solo puro (sem aditivos) e as misturas solo/CBCA/cal estão apresentados na Figura 31 para o CTC e na Figura 32 para a ASE. Observa-se uma redução de 51,92% do valor médio de CTC do solo, de 173,33 (meq/100g) para 83,33 (meq/100g), com a adição de 6,5% de CBCA e 4% de cal. Ao mesmo tempo, há uma redução em 51,92% do valor médio de ASE do solo, de 1352,75 (m²/g) para 650,36 (m²/g), quando adicionados 6,5% de CBCA e 4% de cal.

Figura 31: Valores de CTC do solo puro e das misturas com CBCA e cal.

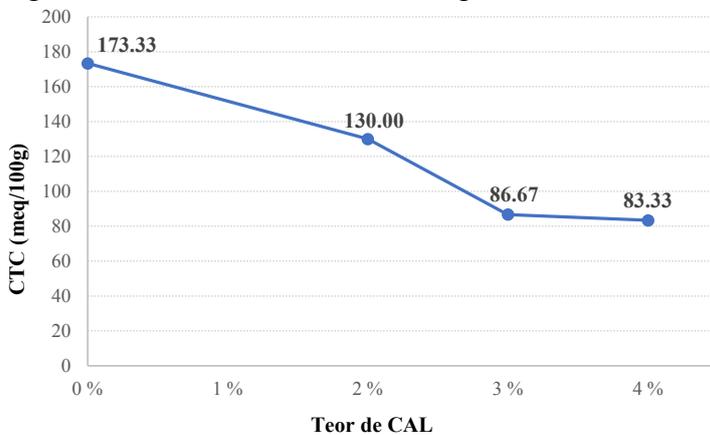
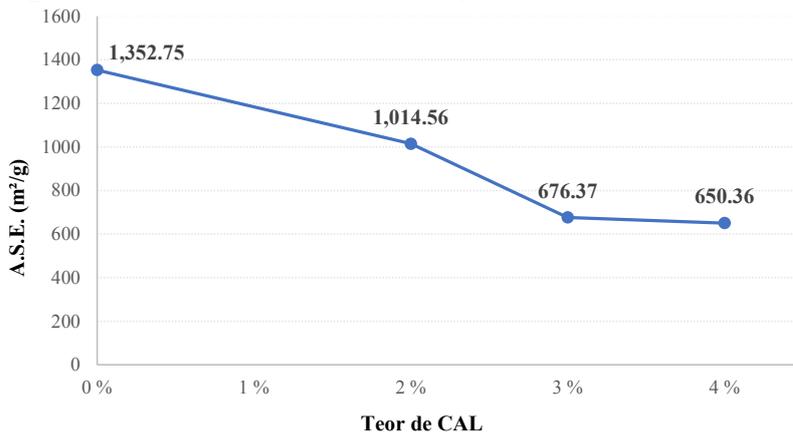


Figura 32: Valores de ASE do solo puro e das misturas com CBCA e cal.



Na seção 2.1, foi discutido que a CTC se refere à quantidade de cátions trocáveis necessária para neutralizar a carga nas partículas de argila. Solos com alta CTC geralmente exibem maior atividade superficial, resultando em maior capacidade de absorção de água (MITCHELL; SOGA, 2005; NALBANTOĞLU, 2004).

A introdução de aditivos no solo provoca trocas catiônicas entre a superfície negativa da argila e os cátions trocáveis presentes, cuja intensidade depende da química do cátion (carga, posição e valência). Desse modo, a estabilização química reduz os valores de CTC e promove a floculação (MITCHELL; SOGA, 2005; TANYILDIZI; UZ; GÖKALP, 2023). Isso se deve à formação de partículas mais granulares, resultando em menor área superficial, menor capacidade de absorção de água e, conseqüentemente, uma redução na expansão do solo (NALBANTOĞLU, 2004; ÜNVER *et al.*, 2021). Assim, valores elevados de CTC e ASE indicam um alto potencial de expansão. Logo, ao estabilizar quimicamente esses solos, espera-se uma redução nos valores de CTC e ASE, indicando um potencial de expansão reduzido ou nulo (MITCHELL; SOGA, 2005).

A redução nos valores de CTC e ASE evidenciada nos ensaios reflete o comportamento esperado ao adicionar estabilizantes químicos em solos expansivos, corroborando a literatura existente (FERREIRA, 1995; OLIVEIRA; JESUS; MIRANDA, 2006). Essa diminuição observada nos valores de CTC e ASE nas misturas com cal e CBCA confirma a relação direta entre esses parâmetros e a redução do potencial de expansão do solo, sendo consistente com as descobertas de Silva (2022) e Silvani *et al.* (2023), que conduziram ensaios de adsorção de azul de metileno em misturas de solo com CBCA e de solo/CBCA/cal, respectivamente.

Com base nos valores obtidos de CTC e ASE do solo, é possível classificar o tipo de argilomineral predominante no solo por meio de um método indireto apresentado na seção 2.2, seguindo critérios estabelecidos por diversos autores. Essa classificação está apresentada na Tabela 21, corroborando os resultados do DRX do solo, que identificou bandas de esmectita, grupo ao qual a montmorilonita pertence.

Tabela 21: Classificação do solo quanto ao tipo de argilomineral pelos valores de CTC e ASE.

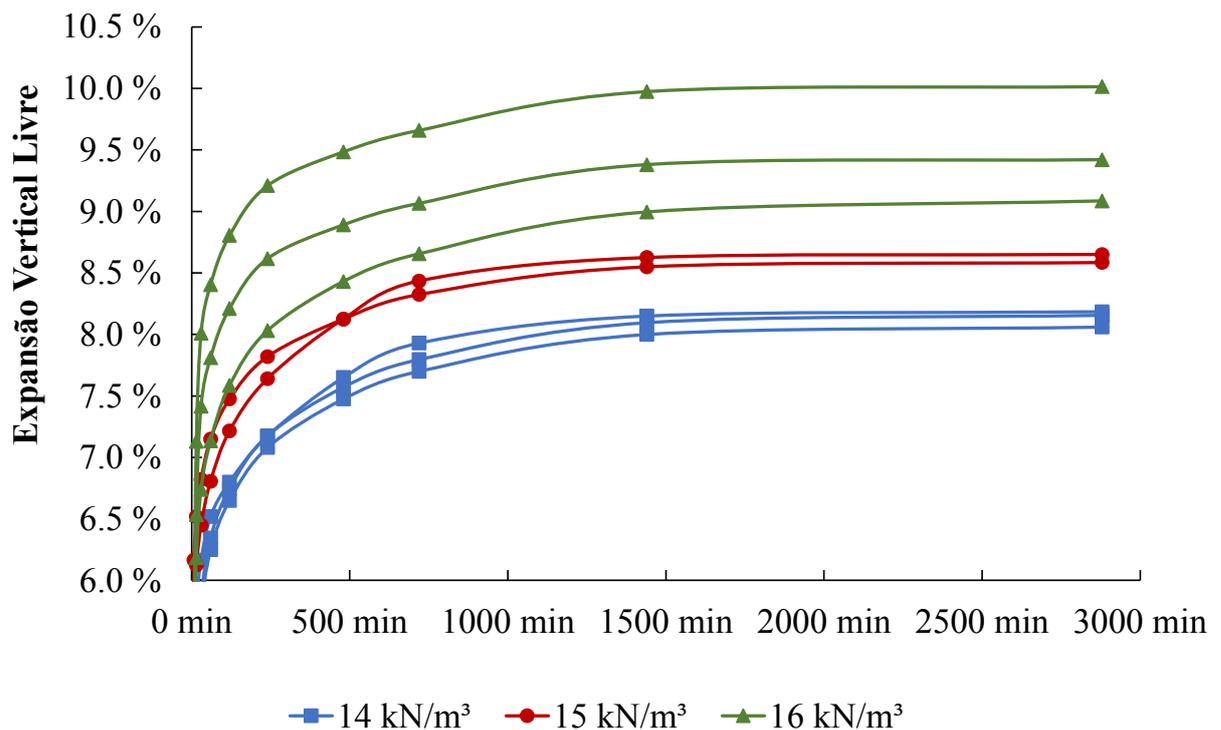
Referência	CTC	ASE
Santos (1975)	Montmorilonita	-
Reichert (2009)	Montmorilonita/ vermiculita	Montmorilonita/ vermiculita
Silva <i>et al.</i> (2018)	Montmorilonita	-
Kumari e Mohan (2021)	Montmorilonita/ vermiculita	Montmorilonita/ vermiculita
Kuo e Liao (2006)	-	Montmorilonita

4.2 Ensaio de expansão unidimensional do solo

Foram conduzidos ensaios de expansão unidimensional para o solo puro (sem aditivos), em triplicata, variando em três pesos específicos seco de compactação (14, 15 e 16 kN/m³) e umidade inicial dos corpos de prova de 19%.

Os resultados, ilustrados na Figura 33, indicam um aumento no valor médio da expansão livre do solo conforme o γ_d aumenta, passando de 8,13% para 8,62% e atingindo 9,51% para um γ_d de 16 kN/m³. Essa relação proporcional entre a expansão e o peso específico seco é esperada e consistentemente observada em várias pesquisas, como descrito nos estudos de Tenório (2019), Silva (2022), Silvani *et al.* (2020) e Consoli *et al.* (2020a). Todos os resultados dos ensaios de expansão unidimensional para o solo estão listados na Tabela A1 no Apêndice.

Figura 33: Ensaio de expansão unidimensional para o solo puro.



Considerando os resultados da expansão livre dos corpos de prova, realizou-se uma classificação do grau de expansão do solo, seguindo critérios estabelecidos por diversos autores. Esta classificação está detalhada na Tabela 22 e foi feita considerando os valores médios de expansão livre do solo para os três valores de peso específico seco.

Tabela 22: Classificação do grau de expansão do solo segundo os valores de expansão livre.

Referência	Grau de expansão
Sridharan e Prakash (2000)	Médio
Ortiz (1975)	Alto
Holtz e Gibbs (1956)	Baixo
Seed <i>et al.</i> (1962)	Alto
Cuellar (1978)	Alto
Vijayvergiya e Ghazzaly (1973)	Alto

Fonte: Autoria própria.

4.3 Ensaio de expansão unidimensional das misturas solo/CBCA/cal

Foram realizados ensaios de expansão unidimensional em triplicata usando um aparelho edométrico para medir a expansão livre e a tensão de expansão das misturas solo/CBCA/cal, conforme as dosagens adotadas nesta pesquisa. Os resultados desses ensaios estão ilustrados nas Figuras 34 e 35, enquanto a Tabela A1 no Apêndice detalha esses resultados, incluindo a nomenclatura dos corpos de prova, os dados dos CP's, os resultados da umidade e do γ_d , e os valores médios.

Os gráficos ilustram o comportamento da expansão livre ao longo do tempo em relação ao teor de cal e ao peso específico seco das misturas. Na Figura 34, a expansão livre em relação ao teor de cal é apresentada, diferenciando-se pelas faixas do γ_d , enquanto as Figuras A1, A2 e A3 no Apêndice mostram o comportamento desses ensaios em relação ao peso específico seco.

Além disso, foram gerados gráficos que representam o comportamento dos incrementos de tensão de expansão em relação à expansão livre, tanto em função do peso específico seco quanto do teor de cal. Esses gráficos estão apresentados na Figura 35 e ilustram os incrementos de sobrecarga do ensaio até a estabilização dos corpos de prova, até retornarem ao tamanho inicial (expansão 0%).

Figura 34: Gráficos da expansão livre pelo teor de cal, separados pelo peso específico seco: (a) $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$; (b) $\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3$; (c) $\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$.

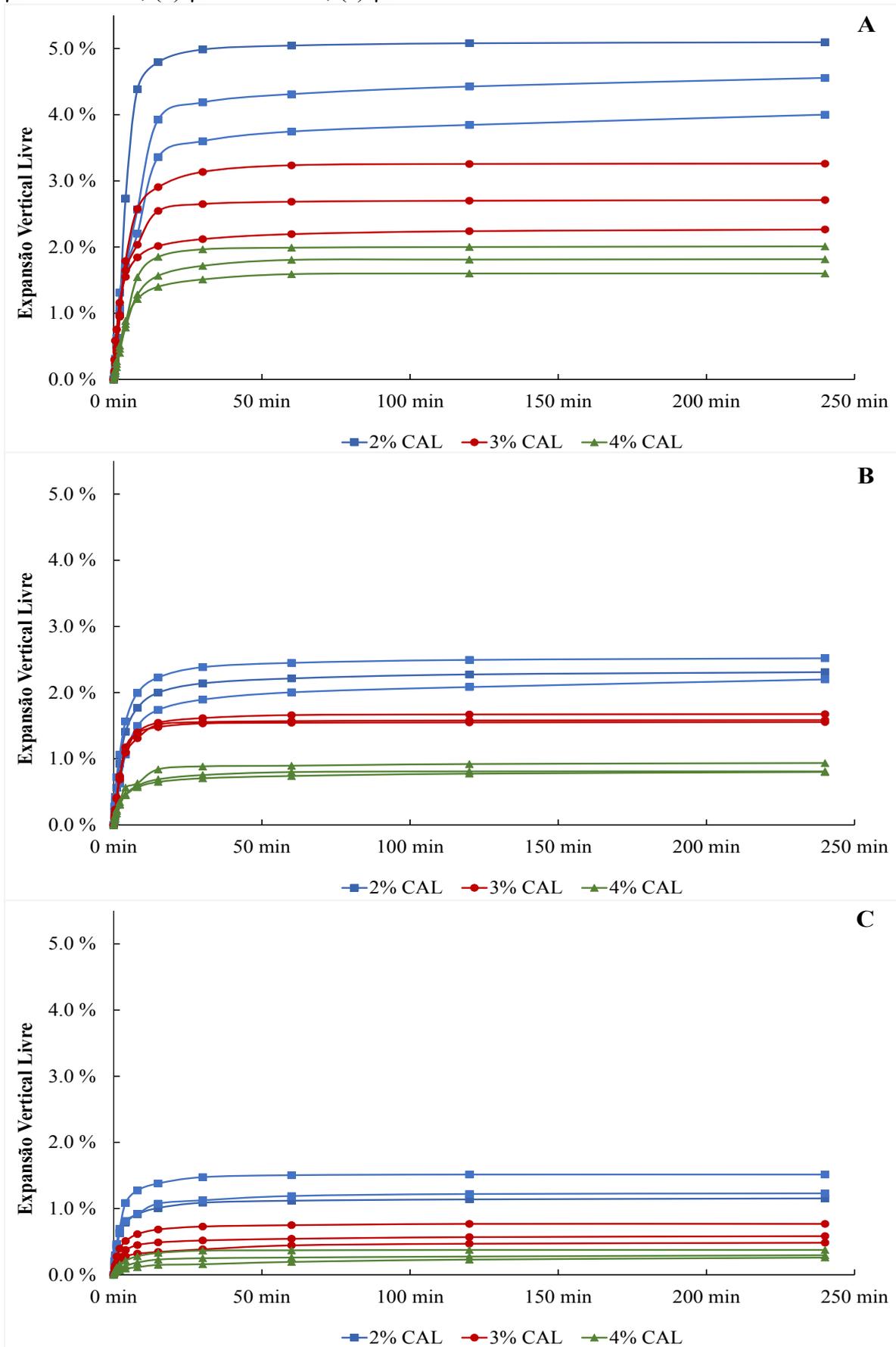
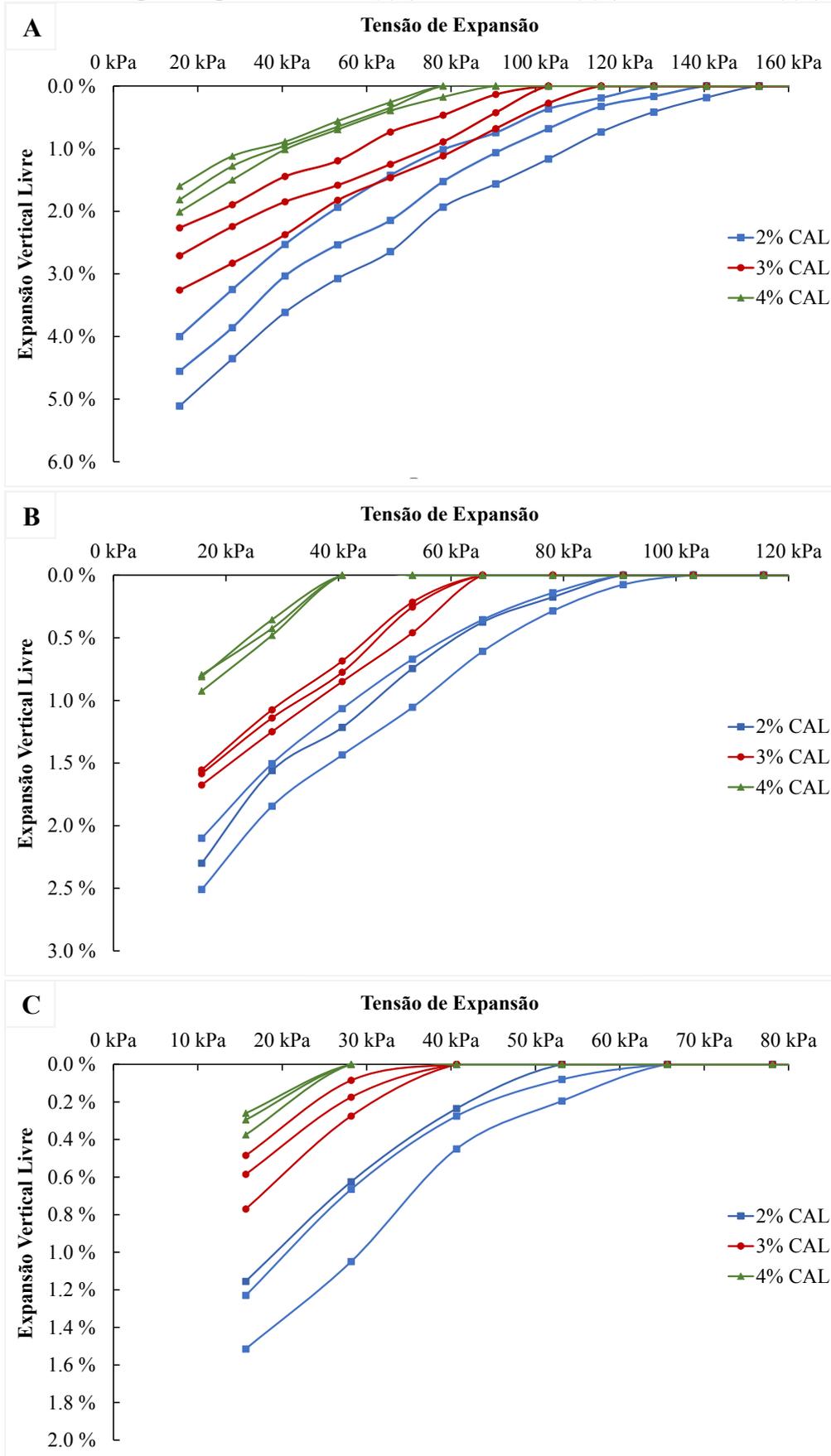


Figura 35: Gráficos dos incrementos de tensão de expansão por expansão livre, separados pelo teor de cal e peso específico seco: (a) $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$; (b) $\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3$; (c) $\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$.



Pela Figura 34, pode-se inferir que os valores de expansão livre diminuem com o aumento do teor de cal e para valores menores do γ_d . Esse padrão é esperado e está alinhado com as descobertas de Tenório (2019) e Silva (2022), evidenciando a eficácia da cal e do CBCA como agentes estabilizadores de solos expansivos.

Na Figura 35, nota-se uma tendência semelhante ao analisar a tensão de expansão, evidenciando uma relação diretamente proporcional entre os parâmetros. Os valores médios de expansão livre e a tensão de expansão aumentam com o aumento do peso específico seco, para um mesmo teor de cal. Além disso, ambos os parâmetros diminuem com o aumento do teor de cal adicionado.

Ao examinar a Figura 34, é possível acompanhar o comportamento da expansão livre das misturas. Observa-se que os valores próximos dos máximos são atingidos dentro da primeira hora do ensaio, seguidos por uma tendência de estabilidade ao longo do tempo, mantida até o término do ensaio com duração de 4h. Essa tendência foi consistente em todos os ensaios iniciais, tornando desnecessária a observação do corpo de prova ao longo de 48h, conforme sugerido pela norma ASTM D4546-21 (ASTM, 2021).

Com base nos resultados de tensão de expansão, é possível classificar o solo quanto ao seu potencial de expansão e aos danos que pode causar às estruturas, de acordo com critérios definidos por alguns autores. Nota-se que ao adicionar cal e CBCA, houve uma redução nos valores da tensão de expansão à medida que a expansão livre do solo diminuiu, culminando na estabilização dos corpos de prova. Desse modo, a Tabela 23 mostra a classificação do solo para as misturas (CP7, CP8 e CP9) que apresentaram o maior valor médio de tensão registrado (138,05 kPa) e para as misturas (CP19, CP20 e CP21) com o menor valor médio de tensão encontrado (24,01 kPa). Informações adicionais sobre a dosagem dessas misturas dos corpos de prova estão detalhadas na Tabela A1, localizada no Apêndice.

Tabela 23: Classificação do solo quanto ao grau de expansão e danos possíveis às estruturas.

Referência	CP7, CP8 e CP9 – 138,05 kPa		CP19, CP20 e CP21 – 24,01 kPa	
	Grau de expansão	Danos às estruturas	Grau de expansão	Danos às estruturas
Cuellar (1978)	Alto	Danos graves	Baixo	Fissuras pequenas
Salas (1980)	Alto	Danos graves	Baixo	Fissuras pequenas
Ortiz (1975)	Alto	Danos graves	Baixo	Fissuras pequenas

Fonte: Autoria própria.

Existe também uma relação com a umidade inicial do corpo de prova, em que os valores dos parâmetros de expansão e tensão tendem a ser maiores com um valor menor de umidade, para um mesmo valor de peso específico seco e para um mesmo valor de teor de cal. Todavia, é importante ressaltar que a análise do comportamento expansivo do solo em relação à umidade não foi considerada e não faz parte do escopo desta pesquisa.

Foi elaborado o gráfico dos valores de tensão de expansão em relação ao teor de cal das misturas, destacando-se o R^2 obtido pelas equações de potência das curvas de tendência na Figura 36, separados pela faixa do γ_d . Na Figura 37, a tensão de expansão em relação ao peso específico seco das misturas é apresentada, separados pela faixa do teor de cal, também destacando o R^2 obtido pelas equações de potência das curvas de tendência.

Figura 36: Tensão de expansão pelo teor de cal, separado pelo peso específico seco.

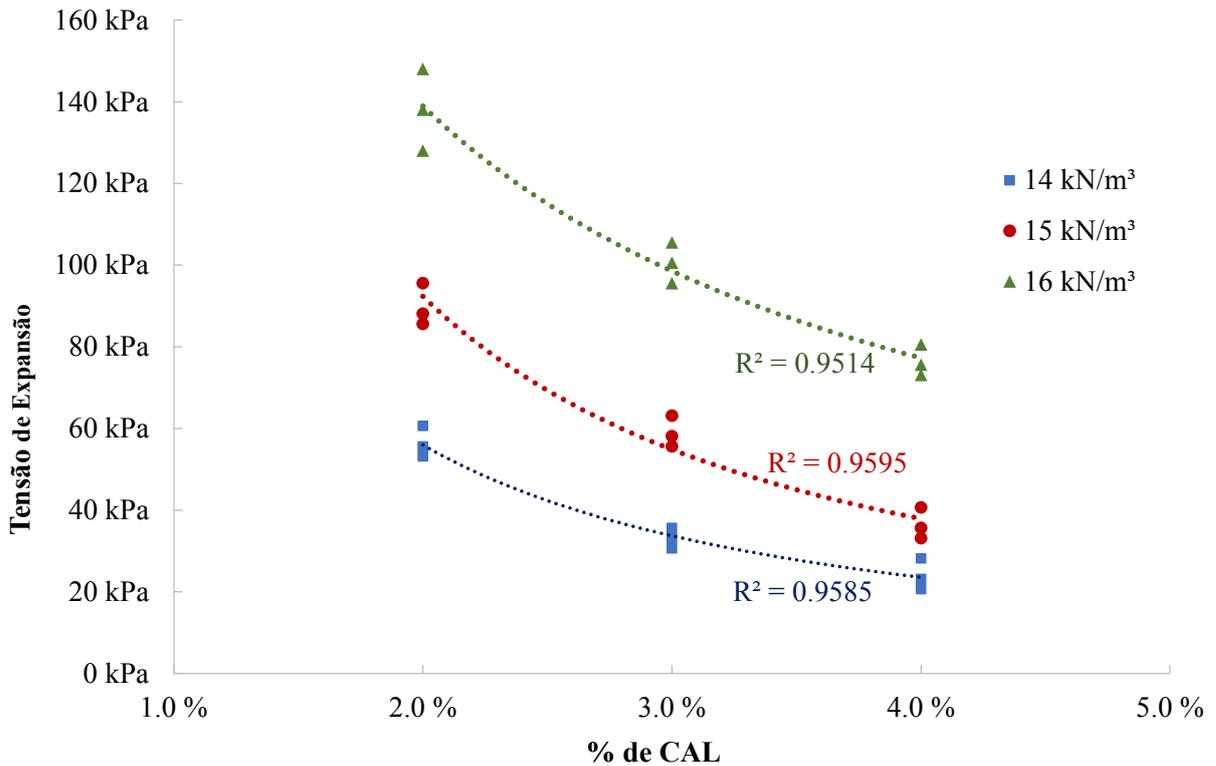
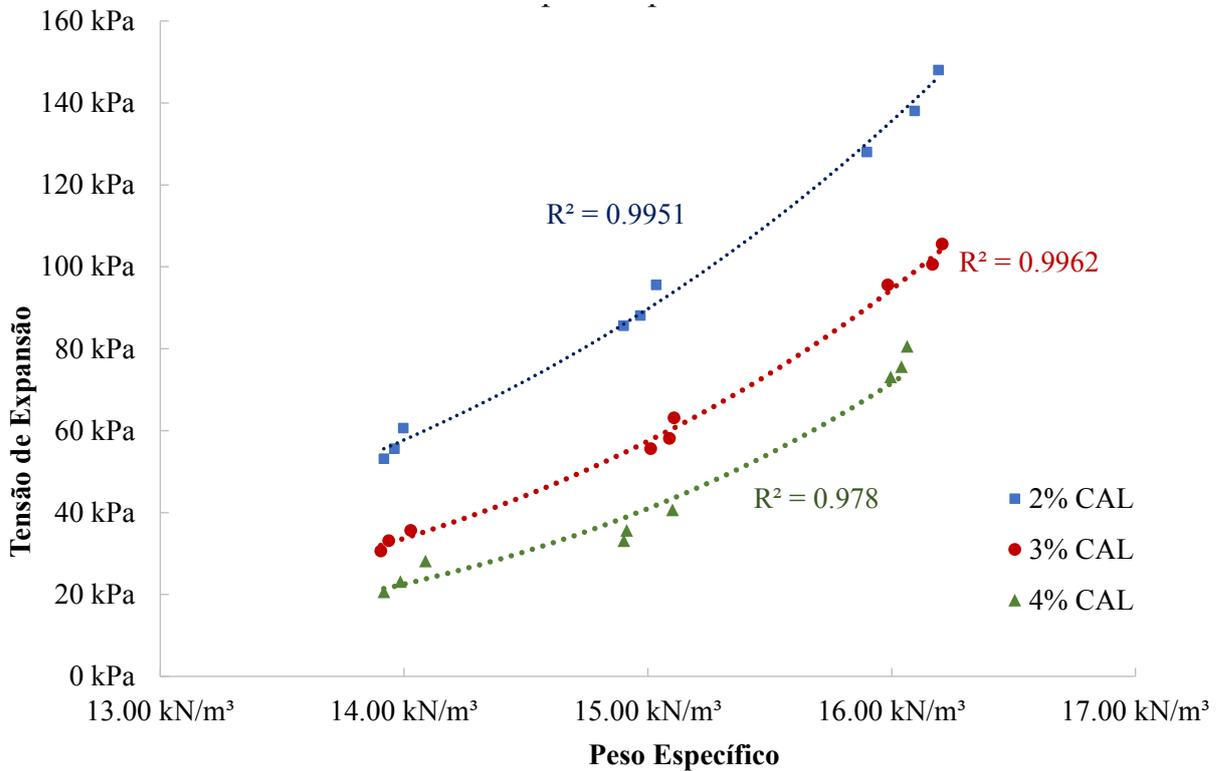


Figura 37: Tensão de expansão pelo peso específico seco, separado pelo teor de cal.



A análise da Figura 36 sugere que a tensão de expansão diminui à medida que o teor de cal aumenta dentro de cada valor do peso específico seco, obtendo ótimos valores de R^2 . Por outro lado, a Figura 37 indica uma tendência inversa em relação ao peso específico seco. Nota-se que a tensão de expansão aumenta com o aumento do peso específico seco, para um mesmo valor de teor de cal, confirmando essa relação por meio de ótimos valores de R^2 .

Do mesmo modo, foi plotado o gráfico dos valores de expansão livre em relação ao teor de cal das misturas, destacando-se o R^2 obtido pelas equações de potência das curvas de tendência na Figura 38, separados pela faixa do γ_d . Na Figura 39, a expansão livre em relação ao peso específico seco das misturas é apresentada, separados pela faixa do teor de cal, também destacando o R^2 obtido pelas equações de potência das curvas de tendência.

Figura 38: Expansão livre pelo teor de cal, separado pelo peso específico seco.

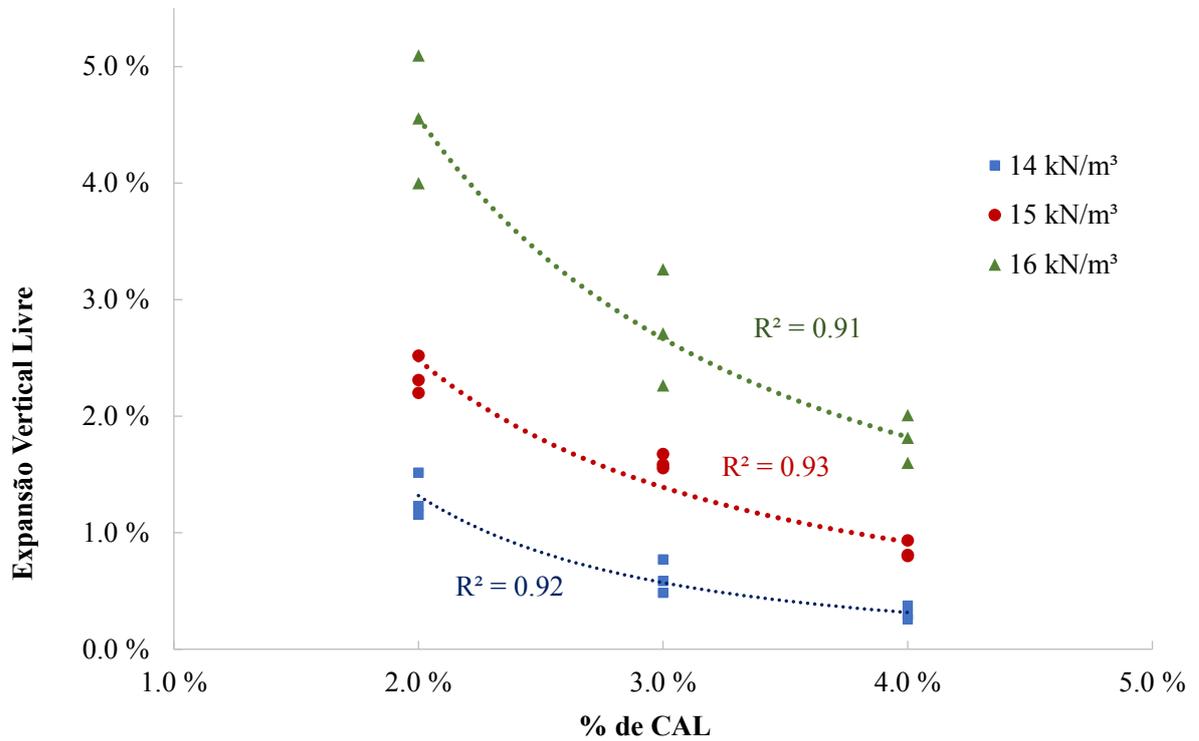
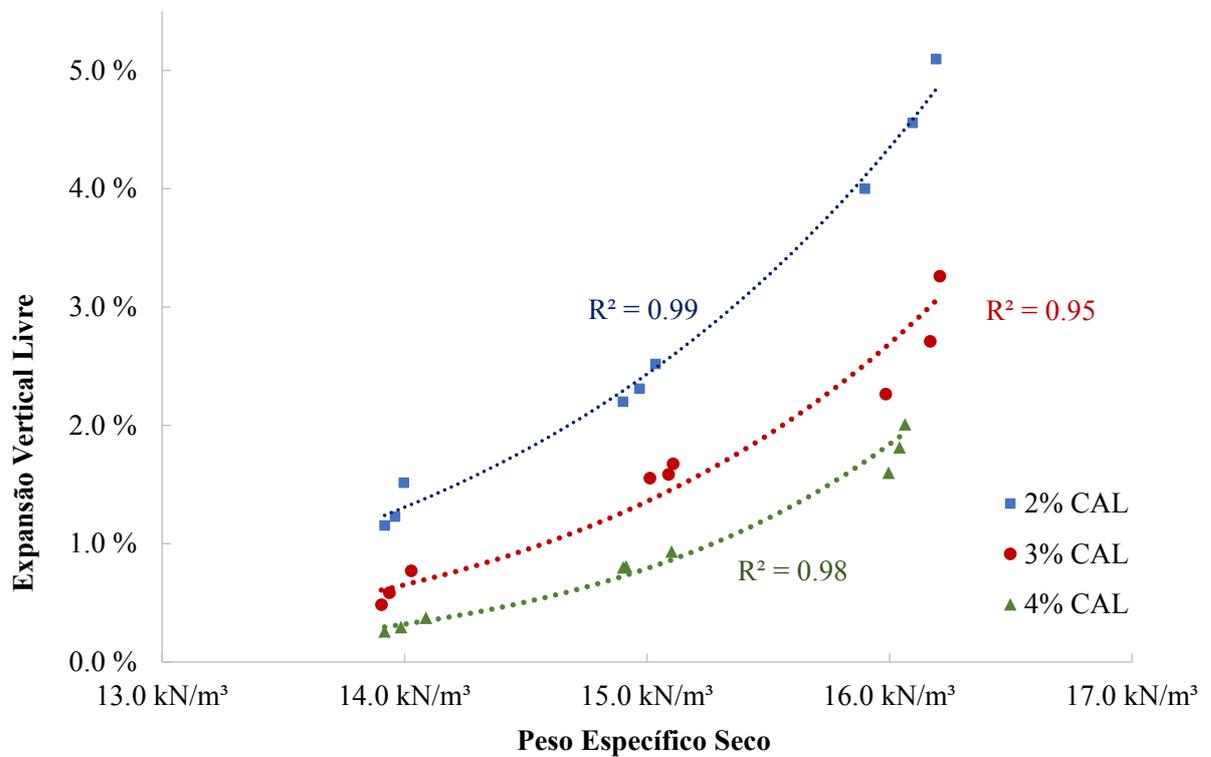


Figura 39: Expansão livre pelo peso específico seco, separado pelo teor de cal adicionado.



A análise da Figura 38 sugere que a expansão livre diminui à medida que o teor de cal aumenta, dentro de cada valor do peso específico seco, resultando em valores de R^2 satisfatórios. Resultados semelhantes foram identificados por Silvani *et al.* (2020) e Tenório (2019). Como explicado na seção 2.5.1, a cal é capaz de flocular o solo por meio das trocas catiônicas, reduzindo assim sua expansão (MITCHELL; SOGA, 2005).

Por outro lado, a Figura 39 indica uma tendência inversa, em que a expansão livre aumenta com o aumento do peso específico seco, para um mesmo valor de teor de cal, confirmando essa relação por meio de ótimos valores de R^2 . O aumento da expansão livre com o aumento do peso específico de compactação também foi observado por Silvani *et al.* (2020), Tenório (2019) e Consoli *et al.* (2021). Isso se deve ao fato de um maior peso específico gerar menos espaço interno para acomodações, resultando em maior expansão livre.

Foram gerados os gráficos de tendência da tensão de expansão em relação à expansão livre das misturas separadas pelo teor de cal e pelo peso específico seco, destacando a correlação R^2 de cada uma das curvas de potência obtidas, juntamente com suas respectivas equações. Esses gráficos são apresentados nas Figuras A4-A9, disponíveis no Apêndice.

4.4 Efeito da porosidade e dos parâmetros L_{iv} , η/L_{iv} , $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$

Após a obtenção dos resultados dos ensaios de expansão livre e tensão de expansão das misturas, procedeu-se aos cálculos dos parâmetros de porosidade (η), teor volumétrico de cal (L_{iv}), porosidade/teor de cal (η/L_{iv}), e o ajuste do parâmetro pelo expoente -0,26. O objetivo foi determinar a eficiência dessa abordagem metodológica e estabelecer a correlação entre a expansão livre, a tensão de expansão e o $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$. Os resultados desses cálculos estão apresentados na Tabela A1 no Apêndice.

Com base nos dados disponíveis, foram elaborados diversos gráficos utilizando os diferentes parâmetros. Inicialmente, foram gerados gráficos relacionando a porosidade (em decorrência do γ_d de compactação) com a expansão livre e a tensão de expansão, considerando o teor de cal adicionado às misturas.

A Figura 40 ilustra a relação entre a expansão livre e a porosidade de todas as misturas, destacando o valor do R^2 e a equação de potência obtida pela curva geral. Enquanto a Figura 41 apresenta essa mesma relação, mas agora separada pelas faixas de teor de cal, evidenciando os valores de R^2 das curvas de potência.

Figura 40: Expansão livre pela porosidade das misturas solo/CBCA/cal.

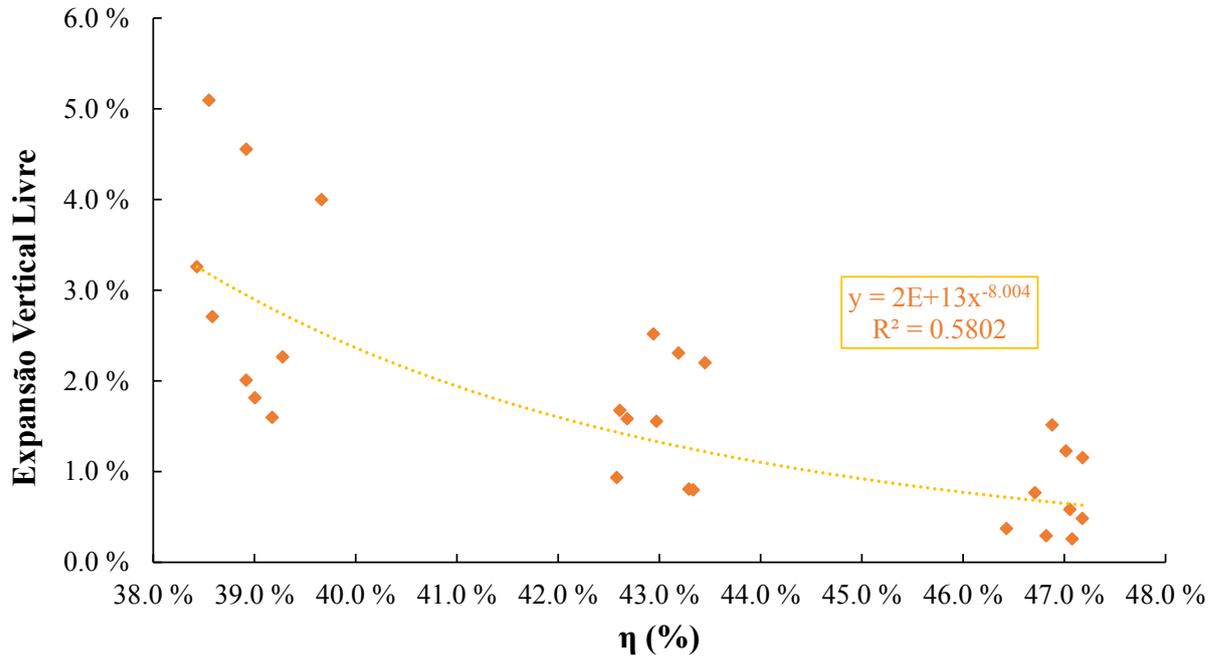
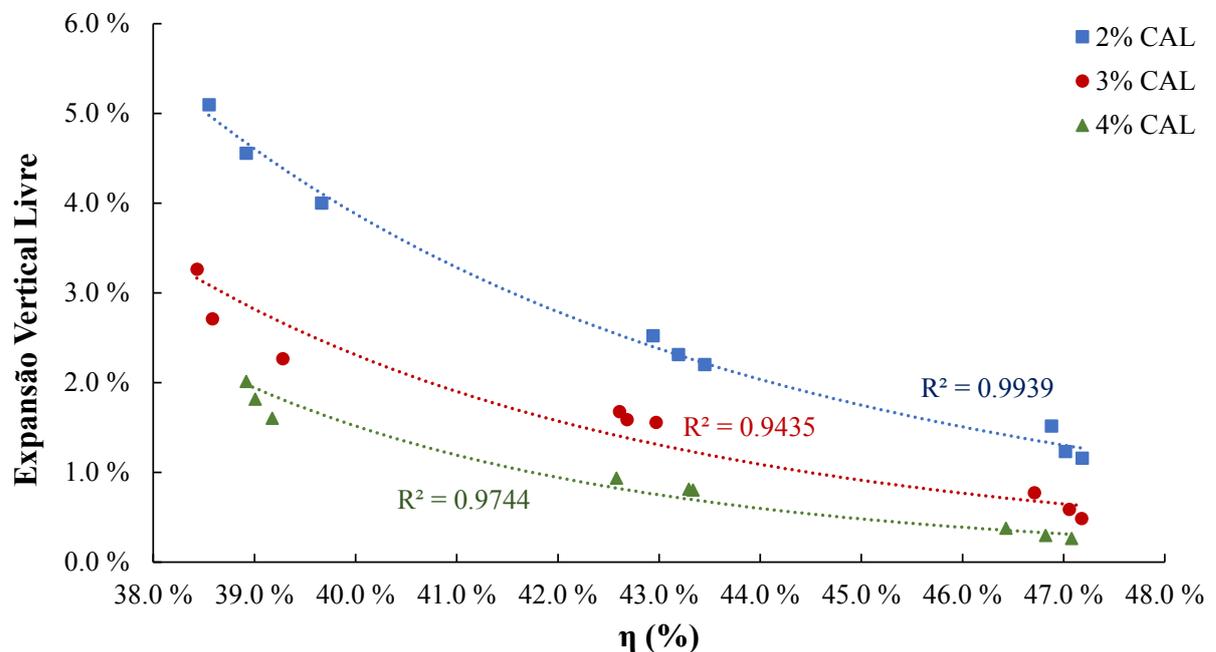


Figura 41: Expansão livre em relação à porosidade, pelo teor de cal adicionado.

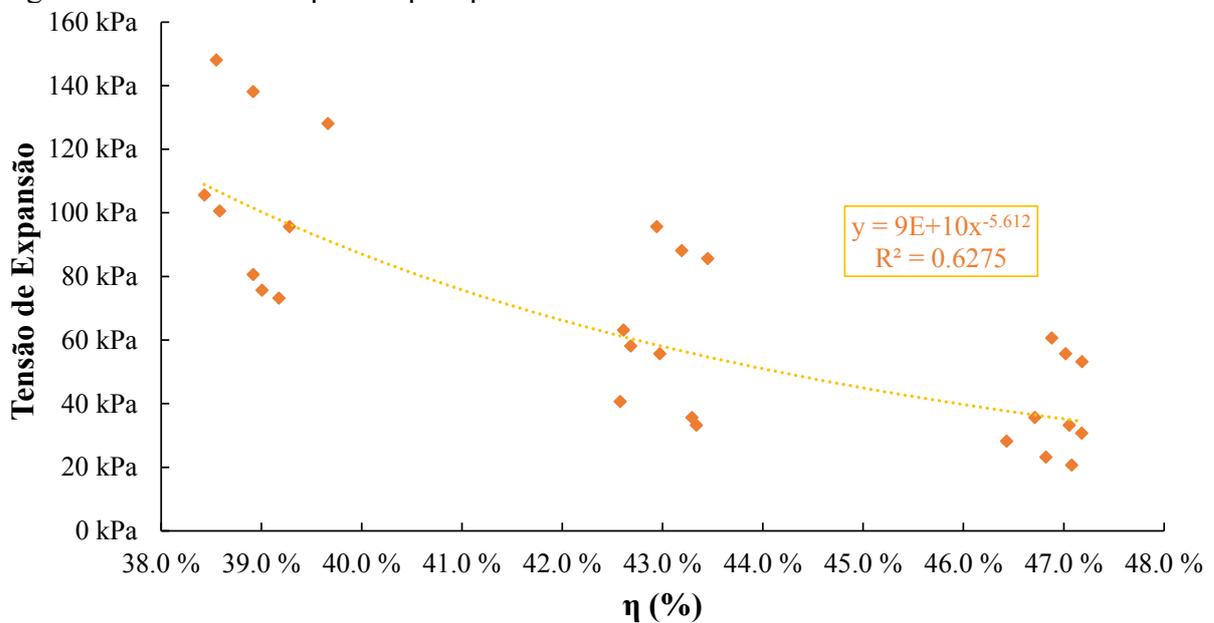


A análise da Figura 40 sugere uma tendência geral de redução da expansão livre com o aumento da porosidade, embora o valor obtido do R^2 para todos os dados dos corpos de prova sejam em média 0,58. No entanto, ao analisar separadamente pelo teor de cal, como mostrado na Figura 41, as correlações se tornam expressivas (valores de R^2 entre 0,94 e 0,99), corroborando a tendência geral observada na Figura 40. Esse comportamento está em

consonância com pesquisas anteriores, como as de Tenório (2019) e Silva (2022), que apontam que essa tendência está associada à estrutura do solo, já que uma maior compactação (menor porosidade) significa menos espaço entre as partículas e, conseqüentemente, redução do volume disponível para o rearranjo das partículas. Portanto, o aumento da porosidade (maior número de vazios) leva à redução da expansão do solo (CONSOLI *et al.*, 2020a; SILVANI *et al.*, 2020).

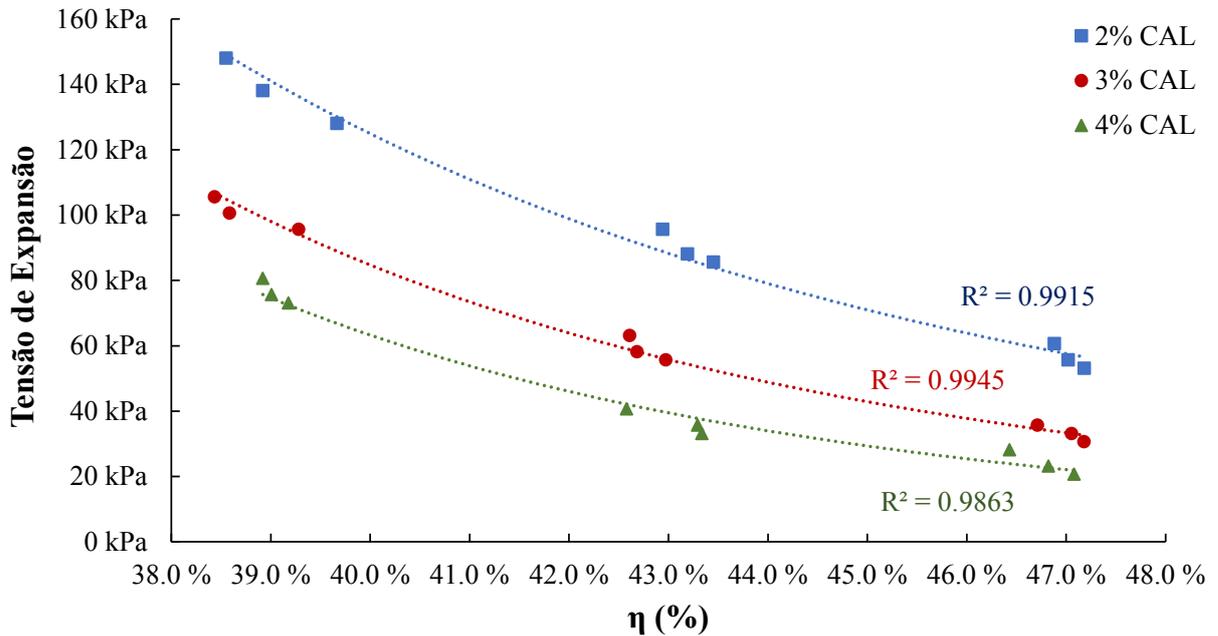
Seguindo o mesmo procedimento, foram plotados gráficos da relação geral entre a tensão de expansão e a porosidade das misturas, apresentada na Figura 42, e separadas pelo teor de cal, conforme mostrado na Figura 43. Observa-se um padrão semelhante, onde a análise da Figura 42 indicou correlação de $R^2 = 0,63$ ao considerar todos os dados das misturas.

Figura 42: Tensão de expansão pela porosidade das misturas solo/CBCA/cal.



Entretanto, ao analisar cada teor de cal individualmente (Figura 43), os valores de correlação são significativos, sugerindo uma tendência geral de que a tensão de expansão diminui com o aumento da porosidade. Esse comportamento em relação à porosidade e sua influência na tensão de expansão reforçam as descobertas obtidas ao analisar a expansão livre dos corpos de prova, como mencionado anteriormente. Isso fornece outra evidência de uma correlação existente entre esses parâmetros.

Figura 43: Tensão de expansão em relação à porosidade, pelo teor de cal adicionado.



Os gráficos relacionando a expansão livre e η/L_{iv} das misturas foram gerados, sendo separados pelo teor de cal e peso específico seco. A Figura A10 no Apêndice apresenta essa relação geral de todos os corpos de prova, enquanto a Figura 44 separa os resultados pelo teor de cal, e a Figura 45 pelo peso específico seco.

Figura 44: Expansão livre em relação à η/L_{iv} pelo teor de cal adicionado.

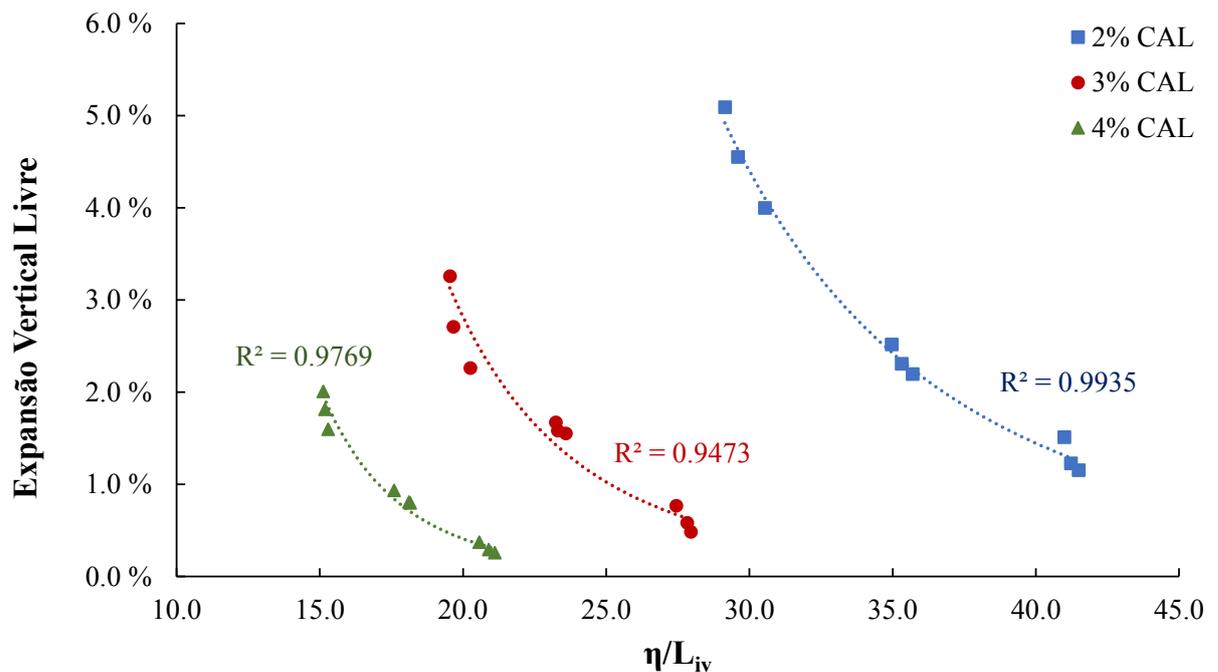
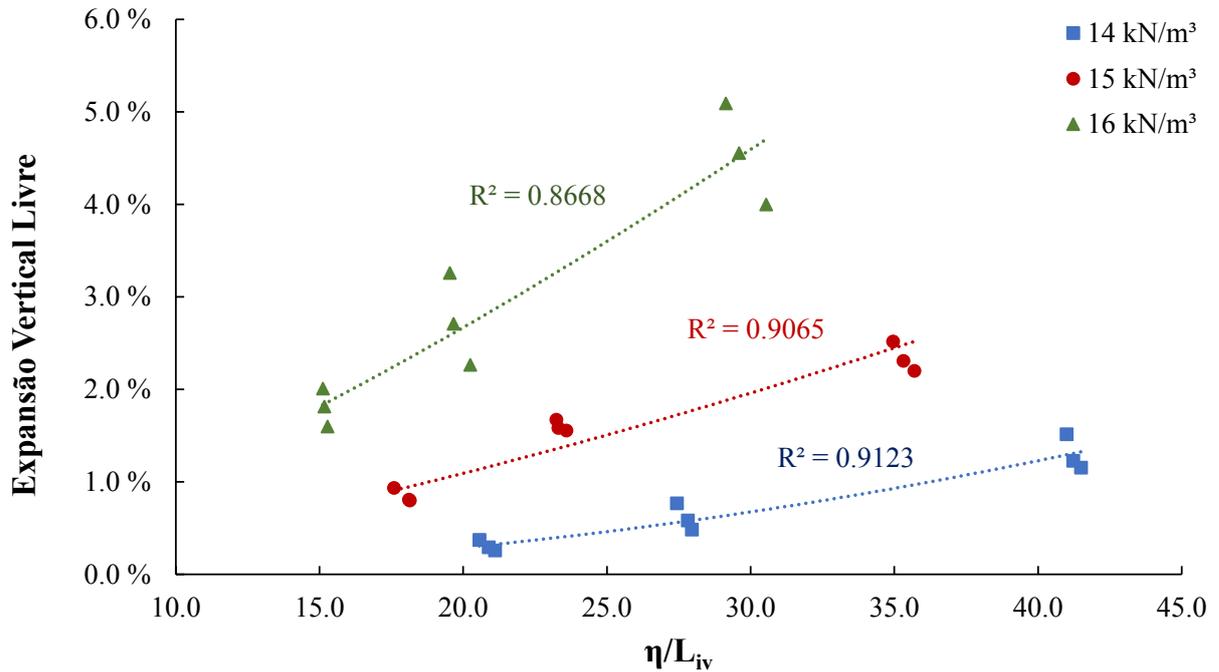


Figura 45: Expansão livre em relação à η/L_{iv} , separado pelo peso específico seco.



A análise da Figura A10 revela uma correlação insatisfatória ($R^2 = 0,032$) para os termos analisados, não permitindo conclusões significativas sobre a relação entre a expansão livre e o η/L_{iv} . No entanto, ao analisar separadamente pelo teor de cal, conforme mostrado na Figura 44, são encontradas ótimas correlações, sugerindo uma tendência de redução da expansão livre com o aumento do η/L_{iv} . Esse comportamento, observado da influência do η/L_{iv} na expansão livre, também foi encontrado em outras pesquisas, evidenciando a aplicabilidade e eficiência dessa metodologia para solos expansivos tratados com cal (CONSOLI *et al.*, 2020a; SILVANI *et al.*, 2020; TENÓRIO, 2019). Por outro lado, a Figura 45 mostra uma tendência inversa ao analisar pelo γ_d , indicando que o aumento do η/L_{iv} está associado ao aumento da expansão livre das misturas, exibindo ótimos coeficientes de correlação.

O mesmo procedimento foi aplicado quanto à relação entre o parâmetro η/L_{iv} e a tensão de expansão, gerando gráficos das misturas para esses termos e separando pelo teor de cal e pelo peso específico seco. A Figura A11 no Apêndice ilustra essa relação geral de todos os corpos de prova, enquanto a Figura 46 a separa pelo teor de cal e a Figura 47 pelo peso específico seco.

Figura 46: Tensão de expansão em relação à η/L_{iv} pelo teor de cal adicionado.

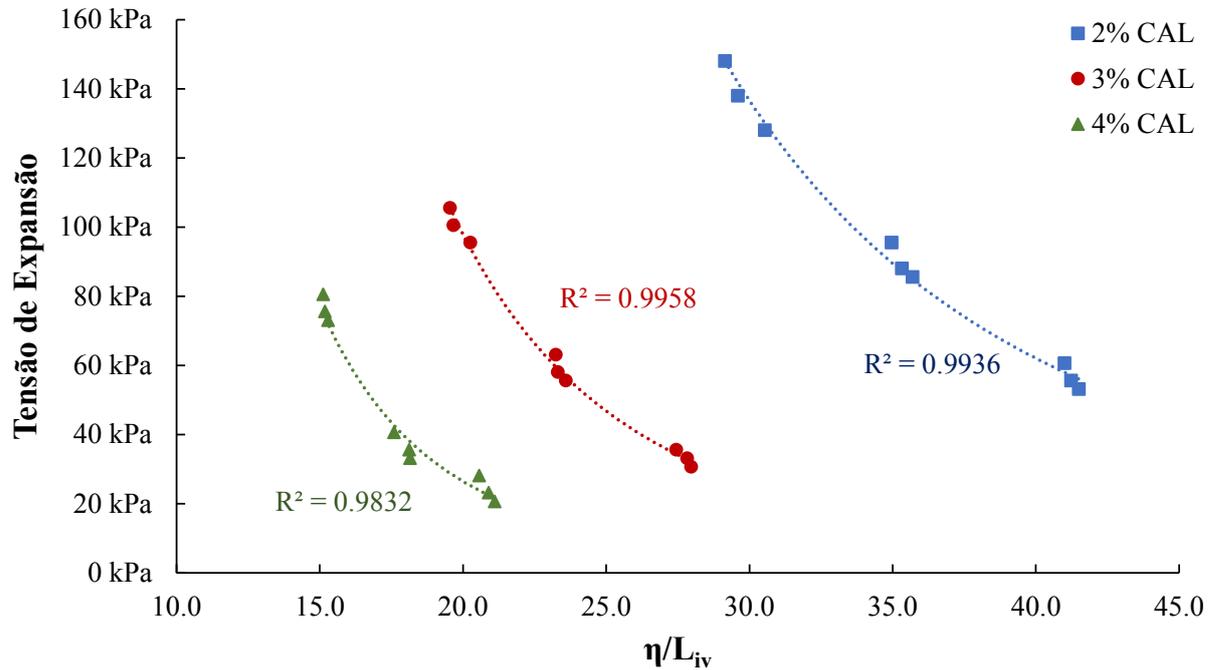
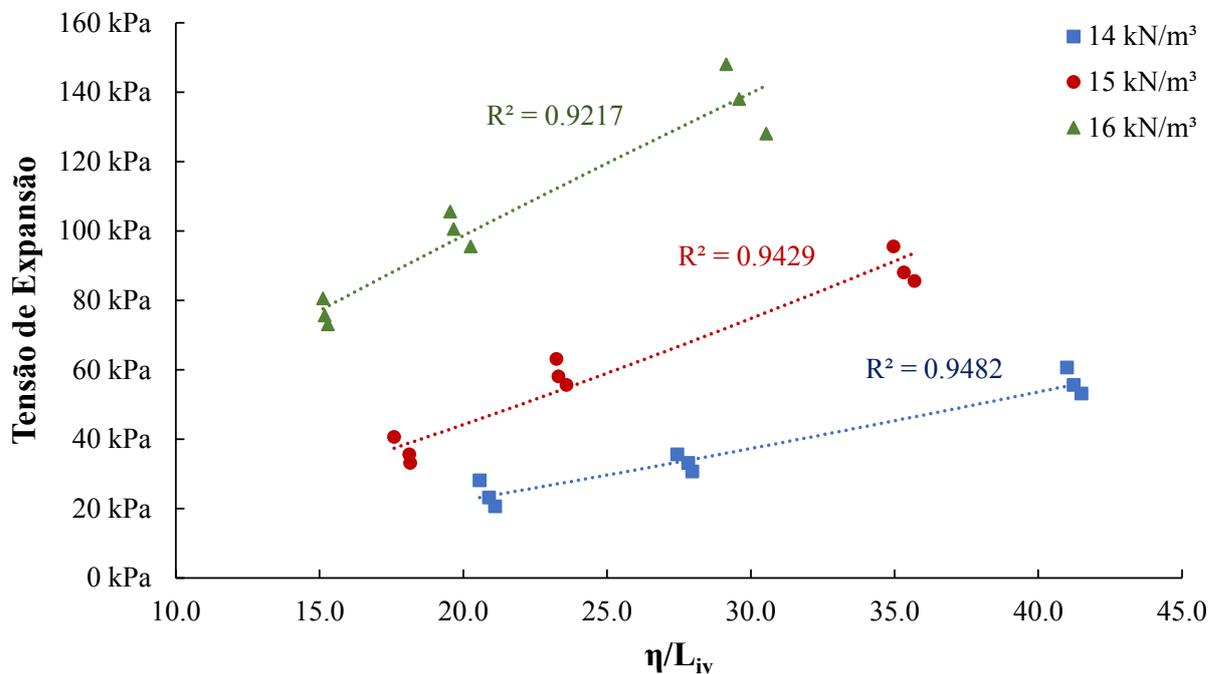


Figura 47: Tensão de expansão em relação à η/L_{iv} , separado pelo peso específico seco.



Uma análise semelhante foi observada para a tensão de expansão, em que a Figura A11 no Apêndice indica uma correlação insatisfatória ($R^2 = 0,031$) para os termos analisados, não permitindo inferências satisfatórias sobre a relação entre a tensão de expansão e o η/L_{iv} . Entretanto, ao analisar separadamente pelo teor de cal (Figura 46), são encontradas ótimas

correlações, indicando uma tendência de diminuição da tensão de expansão com o aumento do η/L_{iv} . Enquanto a Figura 47 mostra uma tendência inversa, indicando que o aumento do η/L_{iv} induz o aumento da tensão de expansão das misturas, evidenciando coeficientes de correlação satisfatórios. Esse comportamento observado do efeito do η/L_{iv} na tensão de expansão (Figura 46) é semelhante ao analisado na Figura 44 para a expansão livre dos corpos de prova. Pode-se deduzir uma ótima correlação entre esses parâmetros expansivos ao considerar o η/L_{iv} .

Diante da ausência de uma correlação significativa entre o η/L_{iv} e os termos de expansão livre e tensão de expansão (Figuras A10 e A11 do Apêndice), optou-se por realizar um ajuste do expoente do coeficiente L_{iv} , elevando-o à potência de $-0,26$. Desse modo, foram plotados gráficos da relação entre o $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ e a expansão livre e tensão de expansão das misturas, separados pelo teor de cal e pelo peso específico seco. A Figura 48 apresenta a relação geral entre o $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ e a expansão livre das misturas, enquanto a Figura 49 a separa pelo teor de cal e a Figura 50 pelo peso específico seco.

Figura 48: Expansão livre pelo $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ das misturas.

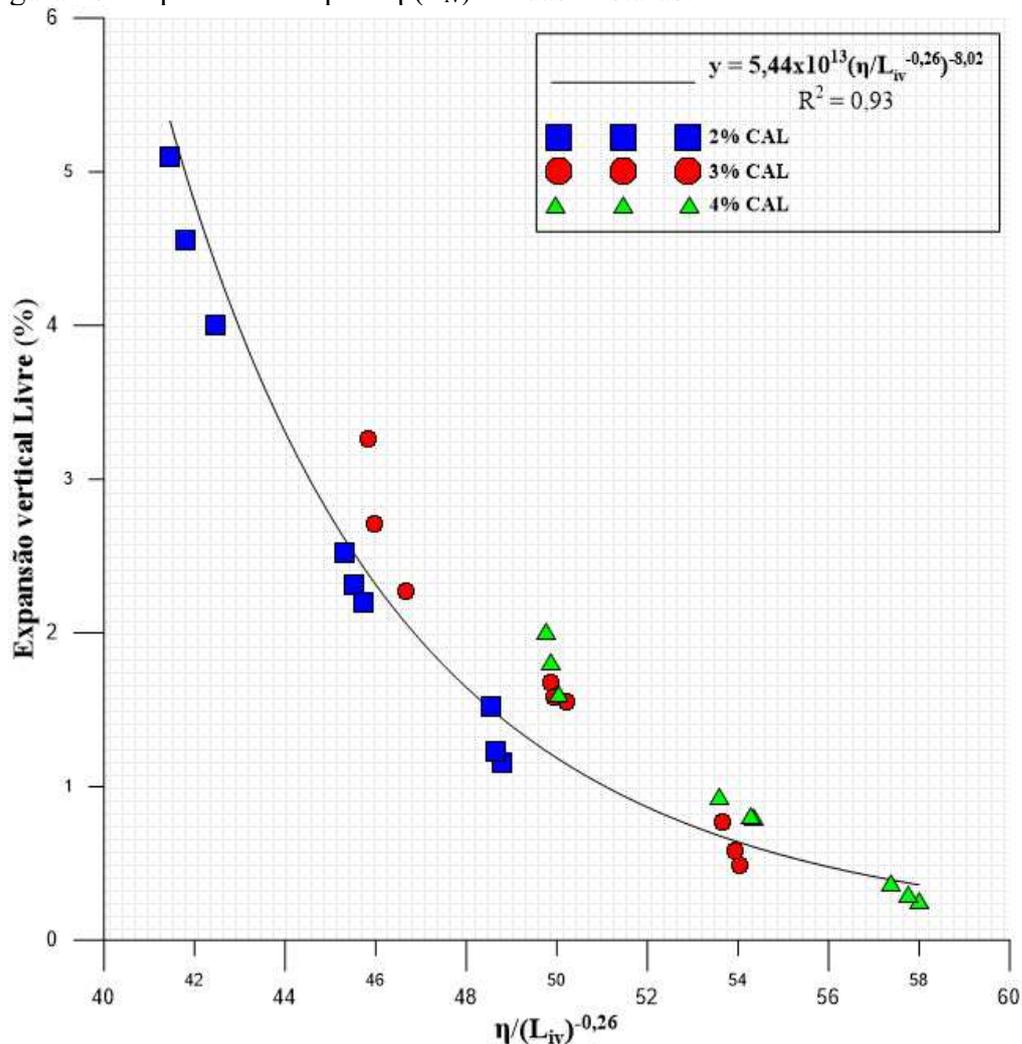


Figura 49: Expansão livre em relação à $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ pelo teor de cal adicionado.

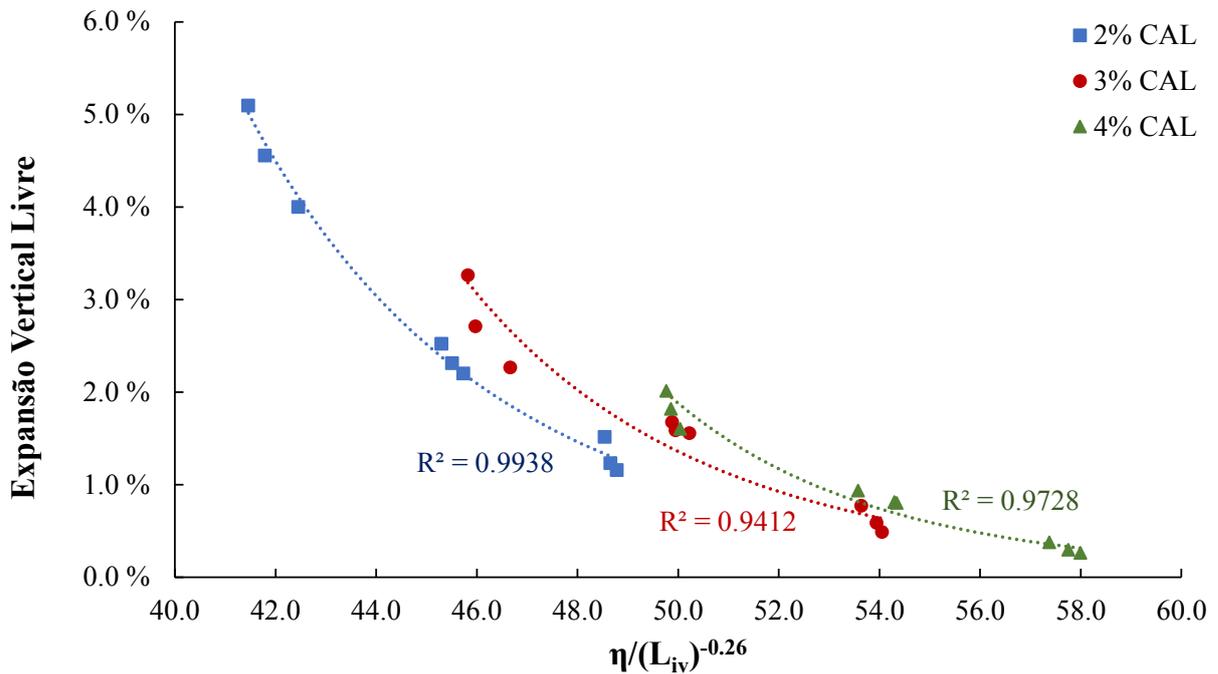
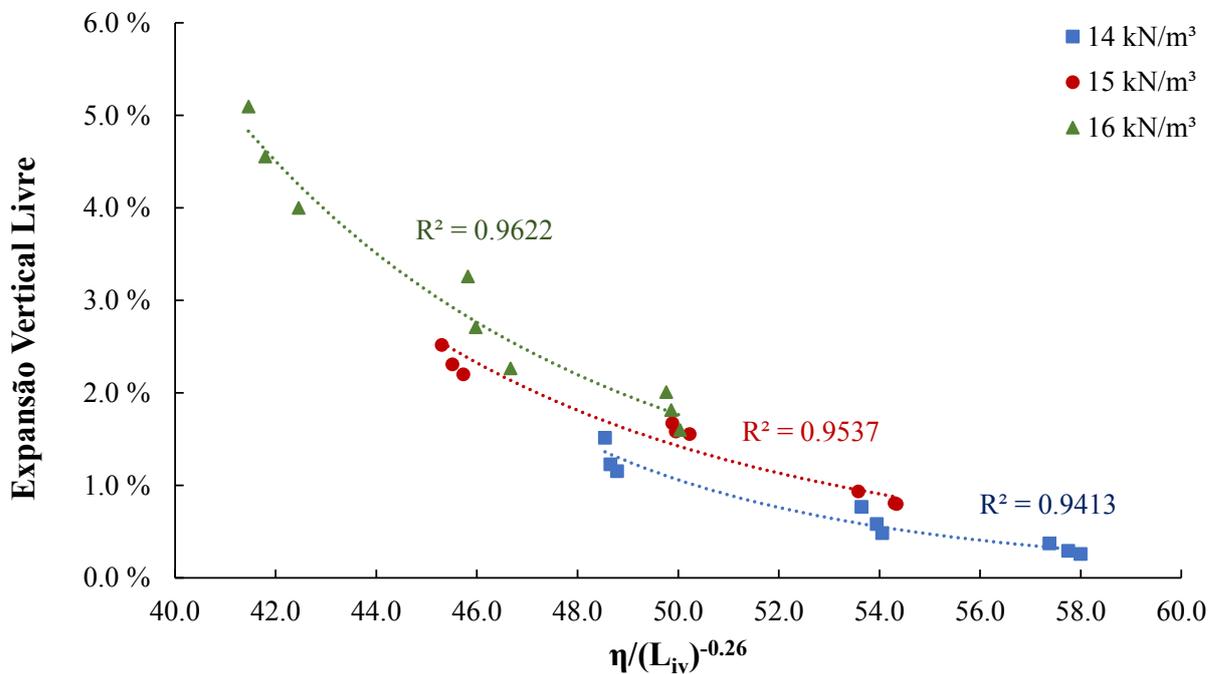


Figura 50: Expansão livre em relação à $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ pelo peso específico seco.



Na análise da Figura 48, observa-se uma ótima correlação ($R^2 = 0,934$) da curva de potência entre a expansão livre e o $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$, indicando um comportamento de diminuição da expansão livre com o aumento do $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$. Esse padrão se mantém na Figura 49 ao analisar essa relação separadamente pelo teor de cal, comprovado pelos ótimos valores de R^2 . O mesmo

comportamento é encontrado ao analisar pelo peso específico seco (mostrado na Figura 50). É interessante notar que essa tendência do efeito do $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ em relação à expansão livre também foi encontrada por outras pesquisas, reforçando uma ótima correlação entre esses termos (SILVANI *et al.*, 2020; TENÓRIO, 2019). Isso sugere uma aplicabilidade eficaz dessa metodologia para solos tratados com cal.

Tendências semelhantes foram observadas ao plotar gráficos da relação geral das misturas entre a tensão de expansão e o $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ (Figura 51), e separados pelo teor de cal, como ilustrado na Figura 52, e pelo peso específico seco, conforme mostrado na Figura 53. É importante ressaltar que, até onde o autor tem conhecimento, a relação específica entre esses termos ainda não foi estabelecida por outros estudos.

Figura 51: Tensão de expansão pelo $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ das misturas.

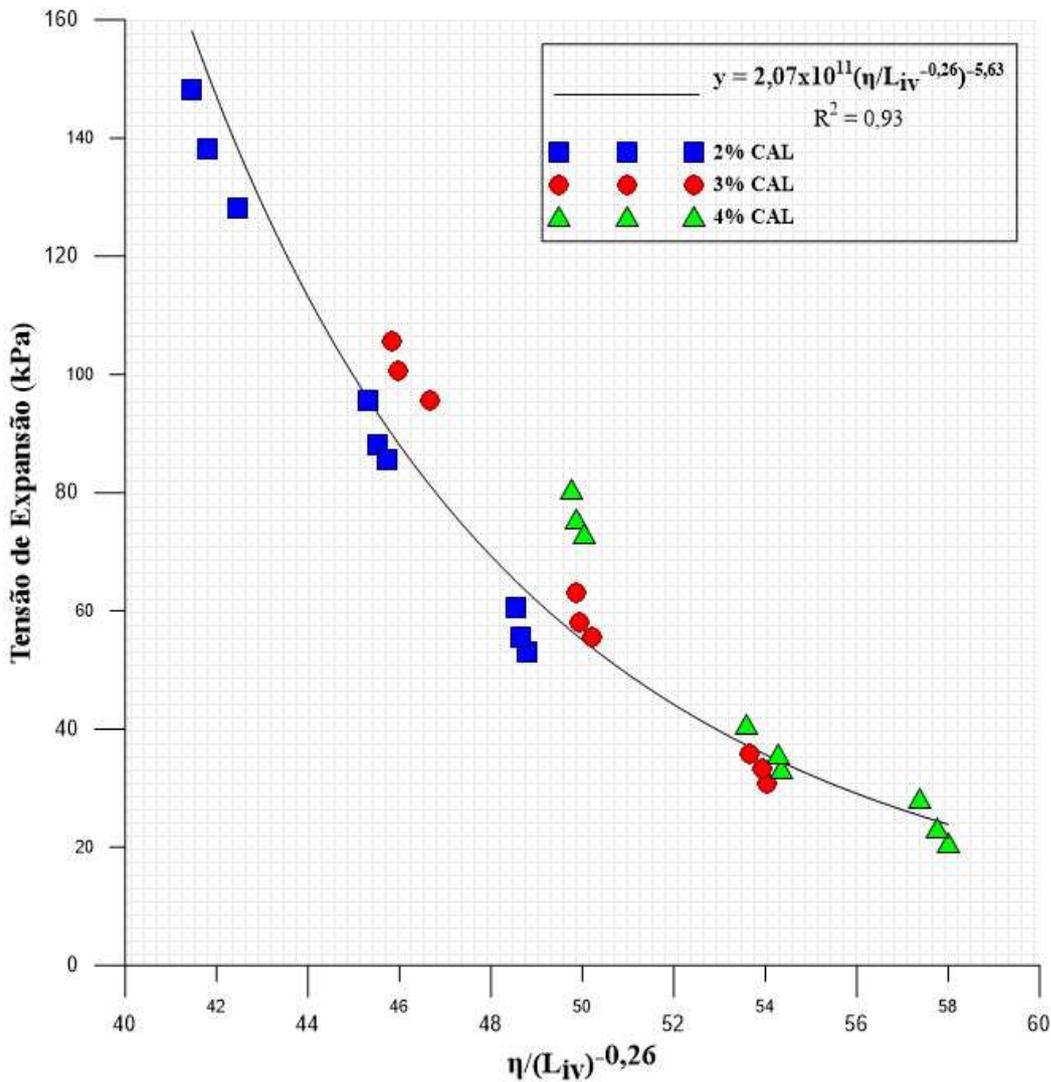


Figura 52: Tensão de expansão em relação à $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ pelo teor de cal adicionado.

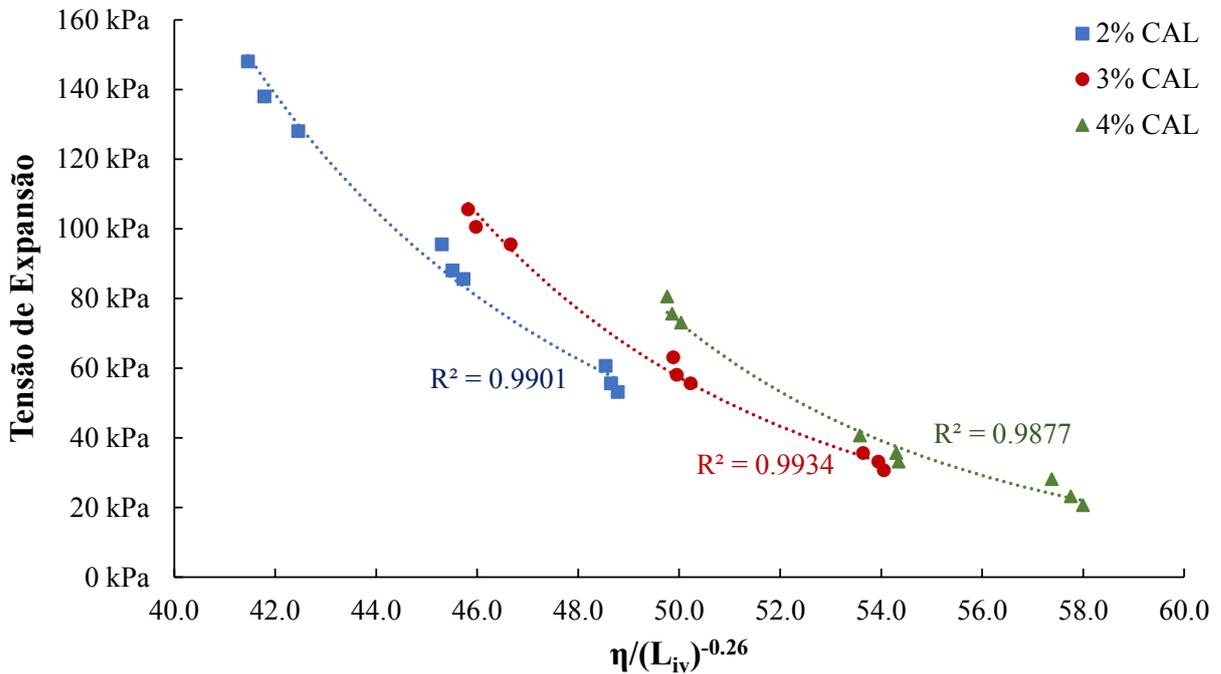
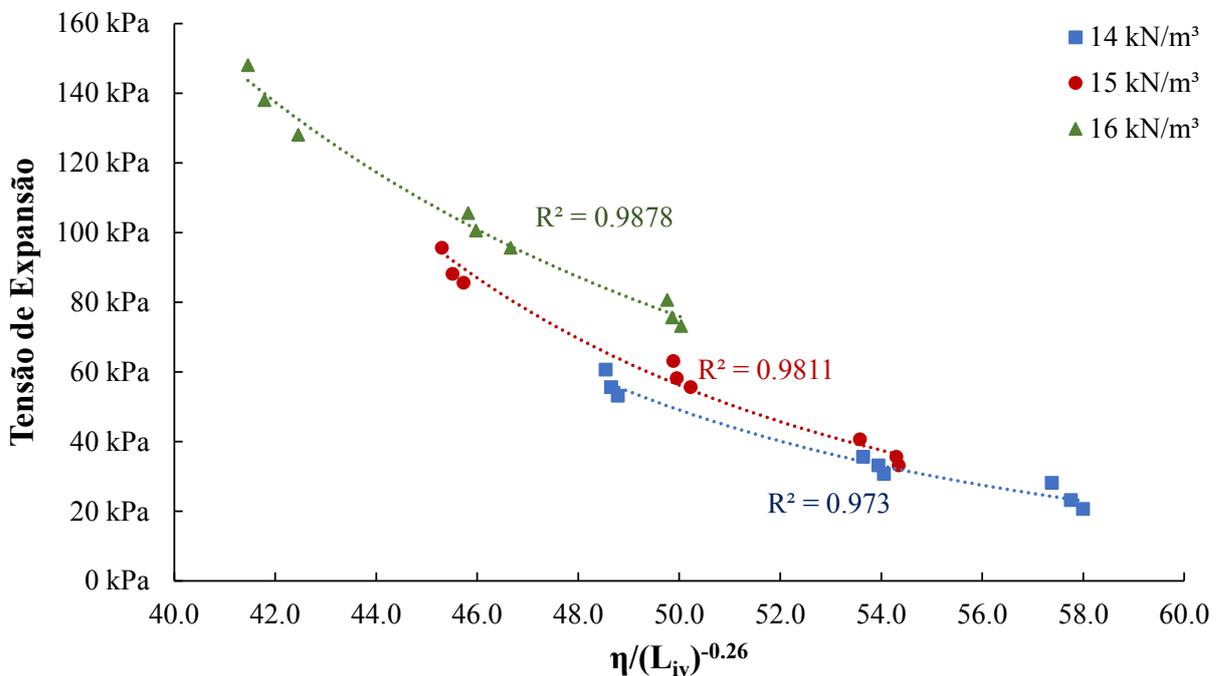


Figura 53: Tensão de expansão em relação à $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ pelo peso específico seco.



A Figura 51 evidencia uma ótima correlação ($R^2 = 0,93$) entre a tensão de expansão e o $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ da curva de potência, indicando um comportamento de redução da tensão de expansão com o aumento do valor do parâmetro $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$. Tendência semelhante foi encontrada ao analisar essa relação separadamente pelo teor de cal (mostrado na Figura 52),

comprovada pelos ótimos valores de R^2 . O mesmo comportamento é observado ao analisar essa relação entre os termos separados pelo peso específico seco, conforme ilustrado na Figura 53.

A Figura 54 exibe o gráfico para a tendência da tensão de expansão em relação à expansão livre, destacando a equação geral de potência obtida para todas as misturas, juntamente com os valores de R^2 encontrados para todas as misturas de forma geral e dentro de cada faixa do teor de cal adicionado. O mesmo procedimento foi realizado para a relação da tensão de expansão pela expansão livre, agora analisando pela variação do peso específico seco, e encontra-se ilustrado na Figura 55.

É importante ressaltar que os gráficos gerados da tendência da tensão de expansão em relação à expansão livre das misturas separadas tanto pelo teor de cal quanto pelo peso específico seco, estão apresentados nas Figuras A4-A9, disponíveis no Apêndice.

Figura 54: Tendências da tensão de expansão pela expansão livre, por teor de cal adicionado.

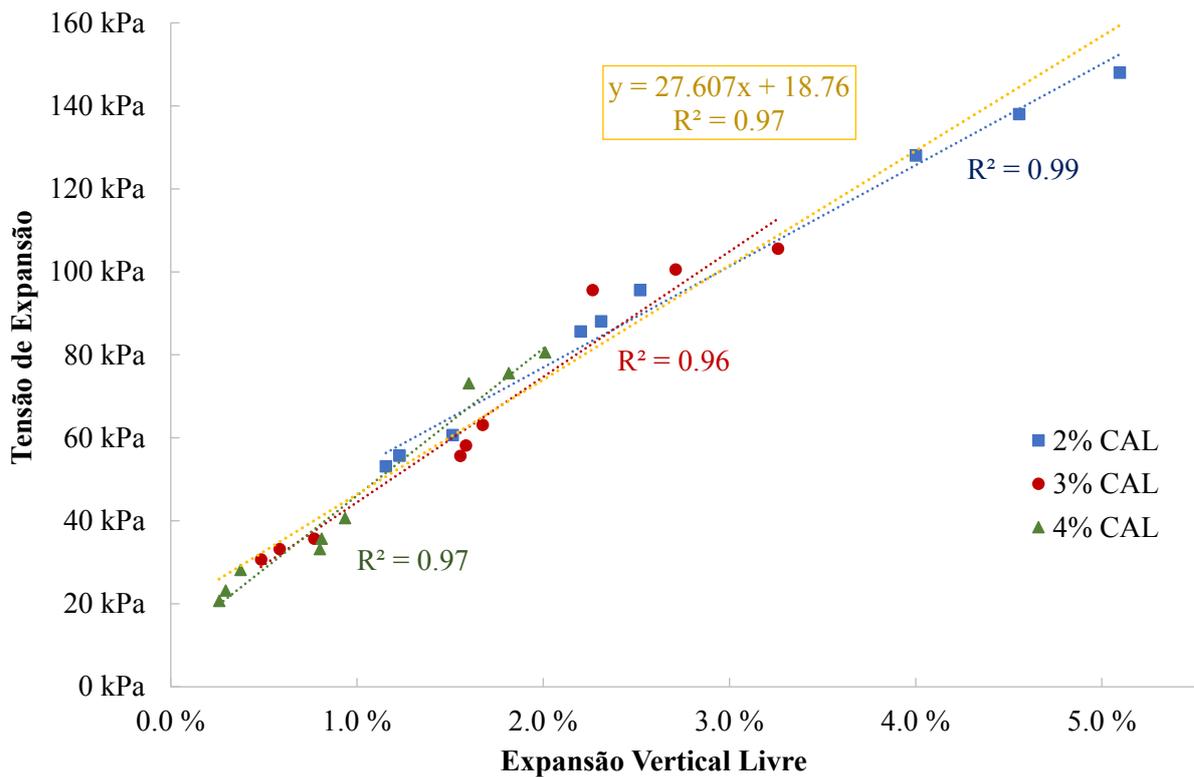
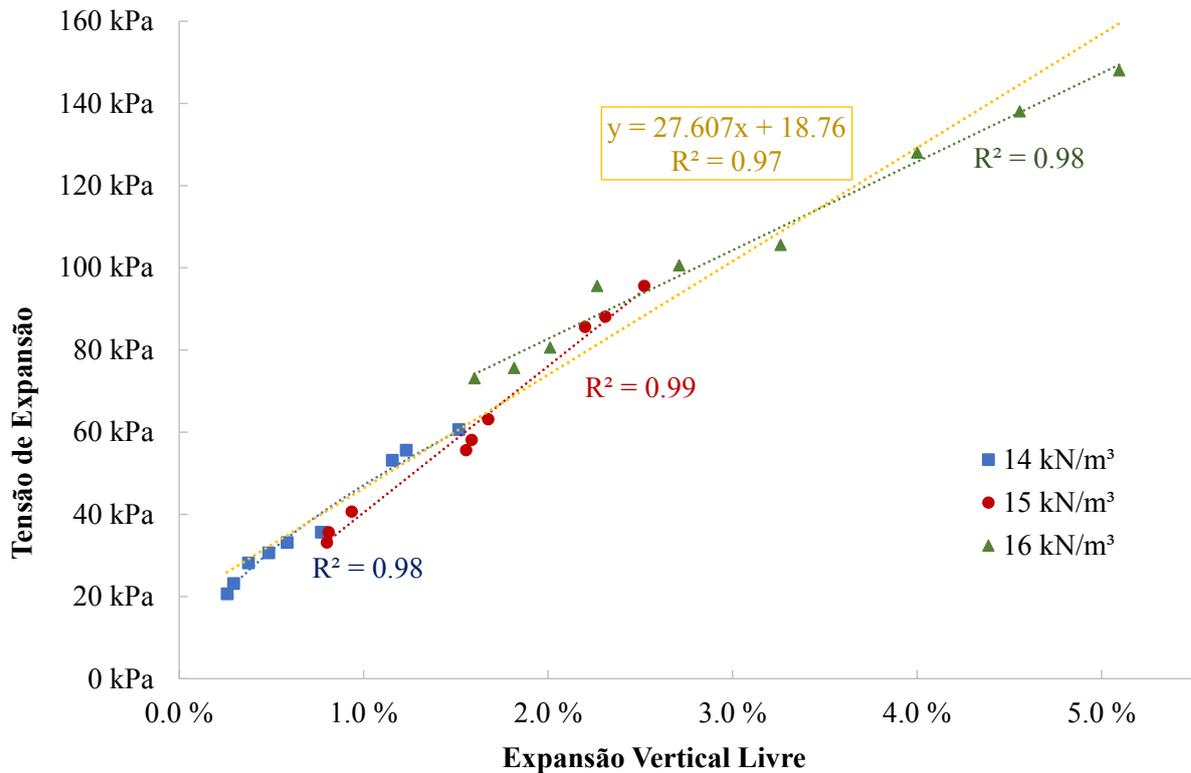


Figura 55: Tendências da tensão de expansão pela expansão livre, pelo peso específico seco.



A análise da Figura 54 revela uma ótima correlação ($R^2 = 0,97$) entre a tensão de expansão e a expansão livre das misturas, em relação ao teor de cal adicionado. Essa tendência se mantém na Figura 55, agora considerando a variação do peso específico seco. A consistência dessa ótima correlação obtida entre a tensão de expansão e a expansão livre sugere uma relação diretamente proporcional entre esses parâmetros, ao serem analisados em relação a variáveis como o teor de cal adicionado e diferentes valores de γ_d de compactação.

As Figura 54 e Figura 55 apresentam a equação que descreve o comportamento da tensão de expansão em relação à expansão livre das misturas, considerando o teor de cal e o peso específico seco, respectivamente. A análise desses comportamentos revelou uma relação linear entre esses parâmetros, resultando na Equação 6 com uma ótima correlação de $R^2 = 0,98$.

$$y = 27,607(x) + 18,76 \quad (6)$$

Sendo:

y = tensão de expansão.

x = expansão livre.

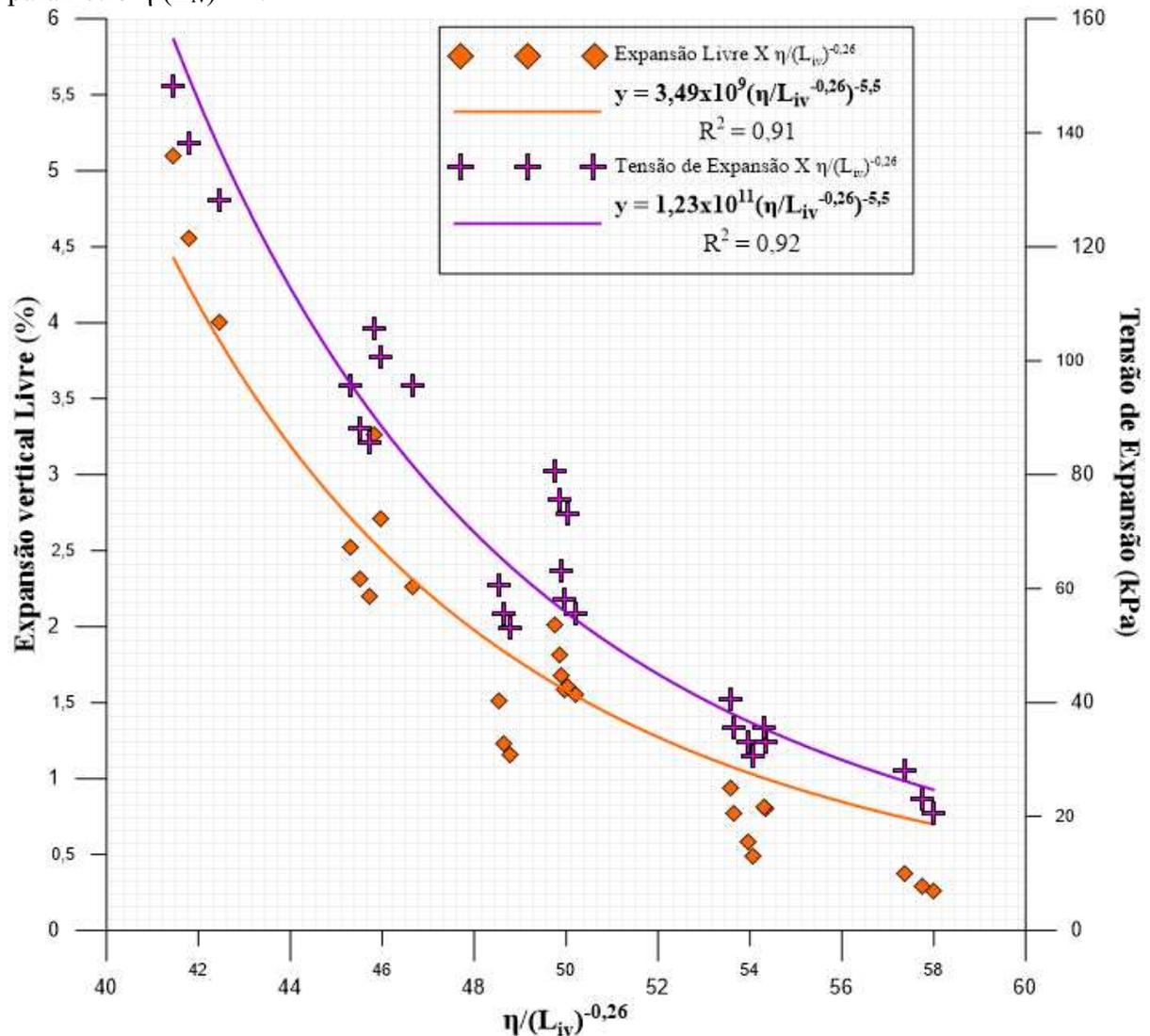
Com base nesses resultados, foi investigada a possibilidade de estabelecer uma correlação direta entre os parâmetros analisados (tensão de expansão e expansão livre) em relação ao $\eta/(L_{IV})^{-0,26}$. Ao analisar a Figura 48 e a Figura 51, observa-se que as equações das

curvas de potência são funções de potência, sendo do tipo $y = A.(x)^B$, onde y representa a tensão de expansão ou a expansão livre, A é uma constante, x é o parâmetro $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ e B é um expoente externo que governa esses termos.

Para melhor compreender a relação direta entre esses termos em função do $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$, foi possível parametrizar as equações a fim de obter uma única equação que correlacionasse diretamente os termos para validar esse método.

Desse modo, utilizando as equações apresentadas nos gráficos, foram normalizadas as equações fixando-se empiricamente o expoente externo, garantindo uma ótima correlação entre elas. Assim, encontrou-se um expoente de valor -5,5 e foi elaborado um gráfico (Figura 56) que ilustra a influência do $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ na relação direta entre a tensão de expansão e a expansão livre das misturas solo/CBCA/cal.

Figura 56: Correlação direta entre a expansão livre e a tensão de expansão em relação ao parâmetro $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$.



A análise da Figura 56 revela ótimos valores de correlação ($R^2 = 0,91$ e $0,92$). Com base nos resultados apresentados por essa figura, segue-se com a equalização entre as equações, calculando a relação matemática representada pela Equação 7 e obtendo a Equação 8.

$$\frac{T_S}{\varepsilon_S} = \frac{1,23 \times 10^{11} \left(\eta / L_{iv}^{-0,26} \right)^{-5,5}}{3,49 \times 10^9 \left(\eta / L_{iv}^{-0,26} \right)^{-5,5}} \quad (7)$$

$$T_S = 35,244 * \varepsilon_S \quad (8)$$

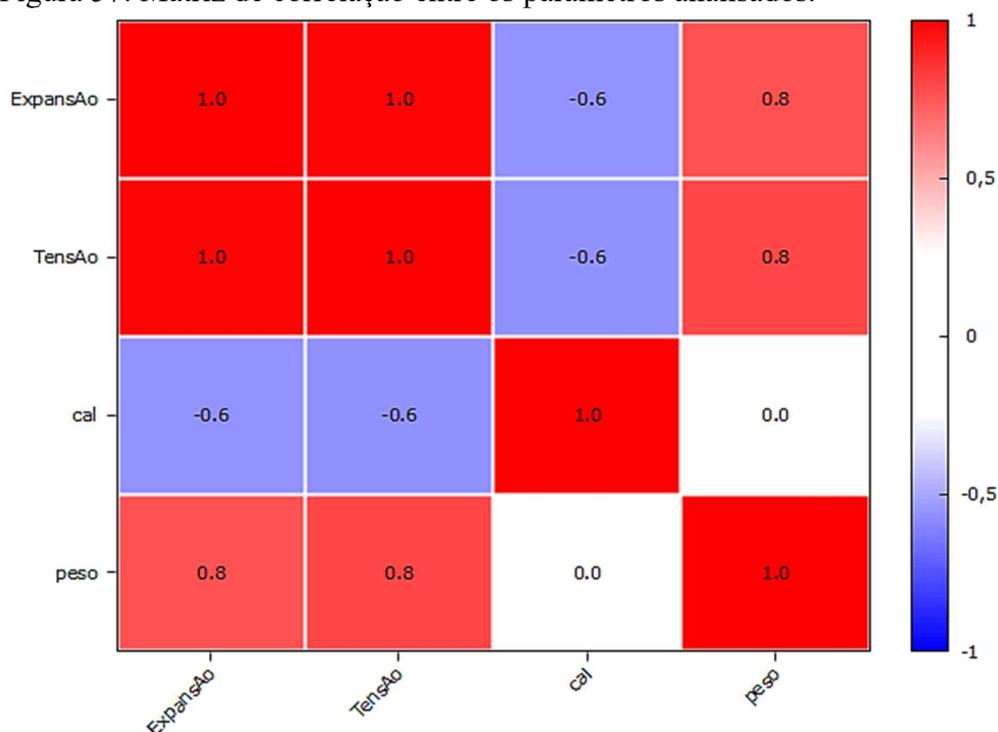
Logo, utilizando as Equações 6 e 8, juntamente com as equações apresentadas na Figura 56, é possível calcular o valor da tensão de expansão em função do valor da expansão livre de um solo, e vice-versa. Esse método de previsão se mostra eficaz, com aplicação prática para um engenheiro em campo, permitindo uma dosagem racional do teor de cal e CBCA a ser adicionado para estabilizar um solo expansivo. Isso é feito em função da porosidade do solo, permitindo a previsão dos parâmetros da expansão livre desse solo e da possível tensão de expansão gerada. Esses índices são importantes em projetos de fundações.

4.5 Análise estatística

Os resultados da matriz de correlação revelam o que era esperado do comportamento do solo, conforme apresentado na Figura 57. É observada uma relação positiva entre o peso específico seco tanto com a expansão livre quanto com a tensão de expansão, indicando que quanto maior o valor do peso específico seco, maior será a expansão e maior a tensão. Além disso, os percentuais de cal adicionados nas misturas parecem diminuir o efeito da expansão, sugerindo que quanto maior o percentual de cal adicionado, menor deve ser a expansão livre.

Há também uma alta correlação entre a expansão livre e a tensão de expansão. No entanto, apesar da matriz de correlação indicar uma boa relação entre essas variáveis, é necessário realizar outras avaliações para definir corretamente a influência das variáveis.

Figura 57: Matriz de correlação entre os parâmetros analisados.



Deste modo, com os dados obtidos para expansão livre e tensão de expansão, foi conduzido um tratamento estatístico para verificar a significância estatística por meio da Análise de Variância (ANOVA). Nas Tabelas 24, 25 e 26, podem ser observadas as principais propriedades de regressão obtidas para os três modelos analisados.

Tabela 24: Análise de variância para significância do Modelo Expansão.

	ANOVA	Soma dos quadrados	gl	Valor F	F _{cal} /F _{tab}	p-valor	R ²	R ² _{ajustado}
Modelo EXPANSÃO	Regressão	38,0694	2	113,63	33,42	5,77e ⁻¹³	0,9045	0,8965
	Resíduo	4,02036	24					
	Total	42,0898	26					

Tabela 25: Análise de variância para significância do Modelo Tensão.

	ANOVA	Soma dos quadrados	gl	Valor F	F _{cal} /F _{tab}	p-valor	R ²	R ² _{ajustado}
Modelo TENSÃO	Regressão	31502,7	2	241,06	70,9	1,29e ⁻¹⁶	0,9526	0,9486
	Resíduo	1568,19	24					
	Total	33070,9	26					

Tabela 26: Análise de variância para significância do Modelo Tensão x Expansão.

	ANOVA	Soma dos quadrados	gl	Valor F	F _{cal} /F _{tab}	p-valor	R ²	R ² _{ajustado}
Modelo TENSÃO x EXPANSÃO	Regressão	32618,5	3	552,75	182,43	1,44e ⁻²¹	0,9863	0,9845
	Resíduo	452,418	23					
	Total	33070,9	26					

O teste F é utilizado na verificação da significância e na realização de previsões. Conforme Box e Wetz (1973), para que um modelo seja considerado significativo e apto para fins preditivos, a relação F_{cal}/F_{tab} deve ser no mínimo 4, de acordo com a distribuição Fisher-Snedecor. Nesse sentido, observando os dados nas tabelas, percebe-se que para todos os três modelos (Expansão, Tensão e Tensão x Expansão), todos os valores obtidos para o teste F são superiores a 4. Isso sugere que os modelos são estatisticamente significativos, para um nível de confiança de 5%, e com possibilidade de realizar previsões.

Além disso, ao analisar os p-valor de todos os modelos, verifica-se que são inferiores a 0,05, o que corrobora a análise anterior, indicando que todos os modelos são estatisticamente significativos e preditivos. Nesse contexto, esses valores sugerem que a hipótese nula pode ser rejeitada, ou seja, rejeita-se a hipótese que os coeficientes são sem efeito.

Quanto ao valor do R^2 , todos os modelos indicam um bom ajuste dos dados, pois os valores estão próximos de 1,0 (um). Isso significa que mais de 90% dos dados são explicados pelos modelos, indicando que a variável dependente é explicada pelas variáveis independentes.

As Tabelas 27, 28 e 29 apresentam os resultados obtidos para os três modelos de regressão utilizando o método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), usando as 27 observações analisadas, que correspondem aos 27 corpos de prova ensaiados.

Tabela 27: Método MQO para o modelo Expansão.

Modelo 1: MQO, usando as observações 1-27				
Variável dependente: Expansão				
	Coeficiente	Erro padrão	Razão-t	p-valor
Const	-12,1728	1,40566	-8,660	$7,55e^{-09}$ ***
Cal	-0,874180	0,09647	-9,062	$3,25e^{-09}$ ***
Peso	1,10467	0,091510	12,07	$1,11e^{-011}$ ***

Legenda: *significante a 10%; ** significante a 5%; *** significante a 1%.

Tabela 28: Método MQO para o modelo Tensão.

Modelo 2: MQO, usando as observações 1-27				
Variável dependente: Tensão				
	Coeficiente	Erro padrão	Razão-t	p-valor
Const	-340,262	27,7618	-12,26	$8,06e^{-012}$ ***
Cal	-24,6454	1,90528	-12,94	$2,60e^{-012}$ ***
Peso	32,1285	1,80734	17,78	$2,55e^{-015}$ ***

Legenda: *significante a 10%; ** significante a 5%; *** significante a 1%.

Tabela 29: Método MQO para o modelo Tensão x Expansão.

Modelo 3: MQO, usando as observações 1-27					
Variável dependente: Tensão					
	Coeficiente	Erro padrão	Razão-t	p-valor	
Const	-137,472	30,9354	-4,444	0,0002	***
Cal	-10,0822	2,19812	-4,587	0,0001	***
Peso	13,7255	2,63701	5,205	2,81e ⁻⁰⁵	***
Expansão	16,6593	2,21194	7,532	1,19e ⁻⁰⁷	***

Legenda: *significante a 10%; ** significante a 5%; *** significante a 1%.

Ao analisar os resultados das Tabelas 27, 28 e 29, observa-se que os modelos apresentam comportamento semelhante. Nota-se que a cal apresenta um sinal negativo nos três modelos, sugerindo uma influência inversamente proporcional para expansão e tensão. Isso implica que quanto maior for o percentual de cal adicionado à composição da mistura, menor serão os valores de tensão de expansão e expansão livre. Esse comportamento das misturas era esperado, e os valores do p-valor confirmam que esse resultado é estatisticamente significativo.

Quanto à influência do peso específico seco (γ_d), para os três modelos analisados, os resultados apresentaram significância estatística e um valor positivo. Isso sugere que, quanto maior o valor do γ_d , maiores serão os resultados para expansão livre e tensão de expansão.

No modelo apresentado na Tabela 29, que relaciona tensão (variável dependente) e expansão (variável independente), observa-se que a expansão livre exerce uma influência positiva e estatisticamente significativa nos resultados da tensão de expansão. Portanto, é possível inferir que um aumento na expansão livre está associado a um aumento na tensão gerada durante a expansão do solo. Em suma, essas variáveis são diretamente proporcionais, variando conjuntamente com as mudanças no teor de cal e no peso específico seco.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo investigar o comportamento expansivo de um solo tratado quimicamente com 2%, 3% e 4% de cal, e 6,5% de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), compactado em diferentes valores de γ_d (14, 15 e 16 kN/m³) e mantendo uma umidade inicial de 19%, com foco na relação entre a tensão de expansão e a expansão livre. Para isso, foram realizados ensaios de expansão unidimensional e tensão de expansão, analisando o impacto do teor de cal e do peso específico seco no comportamento expansivo das misturas solo/CBCA/cal.

A metodologia adotada empregou a relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv}) para avaliar a previsibilidade da expansão livre e da tensão de expansão das misturas, buscando estabelecer uma correlação entre essas variáveis por meio do η/L_{iv} . Essa abordagem revela-se promissora em pesquisas recentes sobre a estabilização de solos expansivos com aditivos sustentáveis, como a CBCA, uma área pouco explorada na literatura.

Com base nos resultados do programa experimental proposto para os objetivos desta pesquisa, identificou-se uma tendência de redução na expansão livre do solo à medida que o teor de cal aumenta e os valores de γ_d diminuem, observando-se padrão similar para a tensão de expansão. Dessa forma, foi constatado a influência do peso específico seco, em que quanto mais densa for a compactação do solo, maior será sua propensão à expansão e à tensão gerada, devido à restrição do espaço interno para reorganização do solo. Por outro lado, a adição de cal ao solo exerce impacto positivo ao reduzir essa expansão, resultando na diminuição da tensão de expansão. Esse efeito ocorre devido à substituição dos cátions monovalentes do solo pelos cátions Ca^{2+} provenientes da cal, o que promove a floculação do solo e reduz seu potencial de expansão.

Para avaliar uma correlação significativa entre as variáveis de tensão de expansão e expansão livre, foi realizado um ajuste do η/L_{iv} elevando o expoente à potência de -0,26. Logo, verificou-se que a expansão livre reduz com o aumento do $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$, tanto para uma mesma faixa do teor de cal quanto para o peso específico seco. Essa mesma tendência foi identificada para a tensão de expansão. O uso do expoente -0,26 teve como finalidade compatibilizar o impacto das duas variáveis no comportamento expansivo do solo. Seu valor negativo decorre do fato de que o aumento da porosidade e do teor volumétrico de cal exerce um efeito inverso tanto na tensão de expansão quanto na expansão livre do solo.

Além disso, por meio da análise estatística usando ANOVA e o método MQO, pôde-se assegurar que as variáveis de tensão de expansão e expansão livre apresentam correlações com

o teor de cal e γ_d , sendo estatisticamente significativas entre si. Isso indica que a expansão livre e a tensão de expansão são diretamente proporcionais, variando conjuntamente com as mudanças no teor de cal e no peso específico seco.

Por fim, foi realizada a parametrização das equações que governam o comportamento das misturas solo/CBCA/cal diante da tensão de expansão e expansão livre em relação ao parâmetro $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$. Isto resultou em duas equações eficazes para prever e dosar racionalmente as variáveis com base tanto nesse parâmetro quanto entre elas, permitindo a obtenção do valor de um em relação ao outro e vice-versa.

Desse modo, esta pesquisa contribui para a engenharia geotécnica ambiental ao apresentar uma abordagem técnica inovadora, utilizando um parâmetro eficiente na previsão do comportamento expansivo de solos estabilizados quimicamente e é importante para correlacionar as propriedades de expansão livre e tensão de expansão. Destaca-se também pelo caráter ambiental ao utilizar a CBCA como aditivo, um resíduo agroindustrial, proporcionando benefícios para o meio ambiente.

5.1 Sugestão de pesquisa futura

Sugestões para pesquisas subsequentes que são pertinentes e podem ampliar o entendimento nessa área incluem:

- I. Uso da CBCA sem beneficiamento químico: avaliar o efeito desse aditivo em solos expansivos sem a etapa de tratamento de requeima. Isso poderia ser útil para engenheiros que desejam usar esse aditivo em campo, eliminando esse processo demorado e dispendioso.
- II. Análise da resistência mecânica das misturas: além de confirmar os benefícios dos aditivos no comportamento expansivo do solo, comprovar a melhoria na resistência mecânica das misturas solo/CBCA/cal agregaria valor à pesquisa.
- III. Realização do ensaio de tensão de expansão para corpos de prova de solo puro: apenas o ensaio de expansão livre foi conduzido para amostras do solo puro. Isso contribuiria para a validação da relação entre a tensão de expansão e a expansão livre do solo expansivo (sem aditivos).
- IV. Verificar a influência do teor de adição da CBCA: investigar o impacto da variação dos teores de adição da CBCA na estabilização química do solo expansivo, indo além do percentual de 6,5% adotado nesta pesquisa.

- V. Avaliar o uso do índice porosidade/teor volumétrico de ligante (η/B_{iv}): considerando a CBCA como o ligante, verificar a aplicabilidade e eficácia do parâmetro η/B_{iv} na previsão da expansão livre e da tensão de expansão do solo expansivo tratado com cal e CBCA.
- VI. Emprego de outros resíduos como aditivos: explorar o uso de outros materiais em solos expansivos, aplicando a mesma metodologia utilizada na pesquisa com o parâmetro η/L_{iv} . Isso poderia validar a capacidade de estabilização de outros resíduos e expandir a linha de pesquisa.
- VII. Avaliação da mesma metodologia e aditivos em outro tipo de solo expansivo: realizar a mesma pesquisa, porém, com um tipo diferente de solo expansivo. Isso ajudaria a confirmar a eficácia e a abrangência desta pesquisa em uma gama mais ampla de condições.

Essas direções para pesquisas futuras têm o potencial de enriquecer ainda mais o conhecimento nessa área específica, ampliando a compreensão e a aplicabilidade prática dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

ABDELKADER, H. A. M.; AHMED, A. S. A.; HUSSEIN, M. M. A.; YE, H.; ZHANG, J. An Experimental Study on Geotechnical Properties and Micro-Structure of Expansive Soil Stabilized with Waste Granite Dust. **Sustainability** 2022, v. 14, n. 10, p. 6218, maio 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/14/10/6218/htm>>. Acesso em: 12 abr. 2023.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16137:2016**: Ensaio não destrutivo - Identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por fluorescência de raios X e espectrometria por emissão óptica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a. 5 p.

_____. **ABNT NBR 6457:2016**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b. 8 p.

_____. **ABNT NBR 6458:2016**: 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: ABNT, 2016c. 10 p.

_____. **ABNT NBR 6459:2016**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016d. 5 p.

_____. **ABNT NBR 7180:2016**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016e. 3 p.

_____. **ABNT NBR 7181:2016**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016f. 12 p.

_____. **ABNT NBR 7182:2016**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016g. 9 p.

_____. **ABNT NBR 9820:1997**: Coleta de amostras indeformadas de solos de baixa consistência em furos de sondagem - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 5 p.

AHMED, M.; BASHAR, I.; ALAM, S. T.; WASI, A. I.; JERIN, I.; KHATUN, S.; RAHMAN, M. An overview of Asian cement industry: Environmental impacts, research methodologies and mitigation measures. **Sustainable Production and Consumption**, v. 28, p. 1018–1039, out. 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352550921002232>>. Acesso em: 29 set. 2023.

AL-KALILI, A.; ALI, A. S.; AL-TAIE, A. J. A Review on Expansive Soils Stabilized with Different Pozzolanic Materials. **Journal of Engineering**, v. 28, n. 1, p. 1–18, 2022. Disponível em: <<https://joe.uobaghdad.edu.iq/index.php/main/article/view/1395>>. Acesso em: 05 fev. 2023.

AL-RAWAS, A. A.; HAGO, A. W.; AL-SARMI, H. Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. **Building and Environment**, v. 40, n. 5, p. 681–687, maio 2005. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036013230400215X>> Acesso em: 29 set. 2023.

AMORIM, S. F. **Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações geográficas dos solos expansivos e colapsíveis do Estado de Pernambuco**. 2004. 263 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5707>>. Acesso em: 24 out. 2023.

ARAÚJO, M. T. de; FERRAZZO, S. T.; CHAVES, H. M.; ROCHA, C. G. da; CONSOLI, N. C. Mechanical behavior, mineralogy, and microstructure of alkali-activated wastes-based binder for a clayey soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 362, p. 129757, jan. 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822034134>> Acesso em: 29 set. 2023.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C837-09**: Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay. West Conshohocken, PA: ASTM Internacional, 2019a, DOI: 10.1520/C0837-09R19, www.astm.org. 3 p.

_____. **ASTM D2435-11**: Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. West Conshohocken, PA: ASTM Internacional, 2020, DOI: 10.1520/D2435_D2435M-11R20, www.astm.org. 14 p.

_____. **ASTM D2487-17**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, PA: ASTM Internacional, 2017, DOI: 10.1520/D2487-17E01, www.astm.org. 10 p.

_____. **ASTM D3282-15**: Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. West Conshohocken, PA: ASTM Internacional, 2015, DOI: 10.1520/D3282-15, www.astm.org. 6 p.

_____. **ASTM D4546-21**: Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils. West Conshohocken, PA: ASTM Internacional, 2021, DOI: 10.1520/D4546-21, www.astm.org. 10 p.

_____. **ASTM D6276-19**: Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization. West Conshohocken, PA: ASTM Internacional, 2019b, DOI: 10.1520/D6276-19, www.astm.org. 5 p.

ATAHU, M. K.; SAATHOFF, F.; GEBISSA, A. Strength and Compressibility Behaviors of Expansive Soil Treated with Coffee Husk Ash. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 11, n. 2, p. 337–348, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775518301860>>. Acesso em: 12 set. 2023.

BAHURUDEEN, A.; KANRAJ, D.; GOKUL DEV, V.; SANTHANAM, M. Performance Evaluation of Sugarcane Bagasse Ash Blended Cement in Concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 59, p. 77–88, 2015. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946515000347>>. Acesso em: 19 out. 2023.

BAPIRAJU, P.; PRASAD, N. K. An Experimental Investigation on Expansive Soil in Conjunction With Egg Shell Powder and Rock Dust. **International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)**, v. 10, n. 5, p. 9–21, 2019. Disponível em: <<https://ssrn.com/abstract=3527332>> Acesso em: 12 abr. 2023.

BARMAN, D.; DASH, S. K. Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 14, n. 4, p. 1319–1342, ago. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775522000658>> Acesso em: 7 abr. 2023.

BLAYI, R. A.; SHERWANI, A. F. H.; MAHMUD, F. H. R.; IBRAHIM, H. H. Influence of Rock Powder on the Geotechnical Behaviour of Expansive Soil. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 7, n. 1, p. 1–13, mar. 2021. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40891-021-00260-3>>. Acesso em: 12 abr. 2023.

BOLT, G. H. Physico-Chemical Analysis of the Compressibility of Pure Clays. **Géotechnique**, v. 6, n. 2, p. 86–93, maio 2015. Disponível em: <<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geot.1956.6.2.86>>. Acesso em: 13 maio. 2023.

BOX, G. E. P.; WETZ, J. **Criteria for Judging Adequacy of Estimation by an Approximating Response Function**. Madison: Wisconsin Univ Madison Dept Of Statistics, 1973. 95 p. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0769627>>. Acesso em: 9 nov. 2023.

BRINKMAN, M. L. J.; DA CUNHA, M. P.; HEIJNEN, S.; WICKE, B.; GUILHOTO, J. J. M.; WALTER, A.; FAAIJ, A. P. C.; VAN DER HILST, F. Interregional Assessment of Socio-Economic Effects of Sugarcane Ethanol Production in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 88, p. 347–362, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118300340>>. Acesso em: 9 set. 2023.

BROOKS, R. M. Soil Stabilization with Fly-Ash and Rice Husk Ash. **International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences**, v. 1, n. 3, p. 9, 2009. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.303.978&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 5 out. 2023.

CACURO, T. A.; WALDMAN, W. R. Fly-Ash from Biomass Burning: Applications and Potentialities. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 6, p. 2154–2165, 2015. Disponível em: <<http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/1984-6835.20150127>>. Acesso em: 15 ago. 2023.

CARVALHO, J. C. de; GITIRANA JUNIOR, G. de F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. dos A.; SILVA FILHO, F. C. (org). **Solos Não Saturados no Contexto Geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. 759 p. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/350158777_Solos_Nao_Saturados_no_Contexto_Geotecnico>. Acesso em: 24 mar. 2023.

CHAGAS, G.; BEATRIZ, C.; FERNANDES, D.; MÔNICA, L.; LEMOS, N. Production of a highly pozzolanic sugarcane bagasse ash via densimetric fractionation and ultrafine grinding. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 4, p. 49–58, set. 2022. Disponível em: <<http://www.scielo.br/j/ac/a/6DwkJqNFCZXMjXmTmBggVcL/?lang=en>>. Acesso em: 14 maio. 2023.

CHAKRABORTY, A.; BORAH, A.; SHARMAH, D. Stabilization of Expansive Soil Using Sugarcane Straw Ash (SCSA). **ADBU Journal of Engineering Technology**, v. 4, n. 0, 2016. Disponível em: <<http://journals.dbuniversity.ac.in/ojs/index.php/AJET/article/view/175>>. Acesso em: 24 maio. 2023.

CHEN, F. H. **Foundations on expansive soils**. 2. ed. [s.l.] Elsevier Science Publications, 1988. v. 12, 464 p.

CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Utilization of Bagasse Ash as a Pozzolanic Material in Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 11, p. 3352–3358, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061809002153>>. Acesso em: 7 jun. 2023.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar – Safra 2023/24 (SUMAC, GEPIN)**. 2023. [s.l.]. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>>. Acesso em: 8 nov. 2023.

CONSOLI, N. C.; ARAÚJO, M. T.; FERRAZO, S. T.; RODRIGUES, V. de L.; ROCHA, C. G. da. Increasing density and cement content in stabilization of expansive soils: Conflicting or complementary procedures for reducing swelling? **Canadian Geotechnical Journal**, v. 58, n. 6, p. 866–878, 2020a. Disponível em: <<https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/cgj-2019-0855>>. Acesso em: 7 abr. 2023.

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, e6020018, ago. 2020b. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0003418>>.

CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L.; CONSOLI, B. S.; LOPES JÚNIOR, L. da S. Assessing Failure Envelopes of Soil–Fly Ash–Lime Blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 5, e04014174, ago. 2014. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001134>>. Acesso em: 9 nov. 2023.

CONSOLI, N. C.; FONSECA, A. V. da; CRUZ, R. C.; HEINECK, K. S. Fundamental Parameters for the Stiffness and Strength Control of Artificially Cemented Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 135, n. 9, p. 1347–1353, fev. 2009. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0000008>>. Acesso em: 12 out. 2023.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 133, n. 2, p. 197–205, fev. 2007. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%291090-0241%282007%29133%3A2%28197%29>>. Acesso em: 7 abr. 2023.

CONSOLI, N. C.; LEON, H. B.; CARRETTA, M. da S.; DARONCO, J. V. L.; LOURENÇO, D. E. The effects of curing time and temperature on stiffness, strength and durability of sand-environment friendly binder blends. **Soils and Foundations**, v. 59, n. 5, p. 1428–1439, out. 2019a. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080619301179>> Acesso em: 12 out. 2023.

CONSOLI, N. C.; LOPES JÚNIOR, L. S.; HEINECK, K. S. Key Parameters for the Strength Control of Lime Stabilized Soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21, n. 5, p. 210–216, maio 2009. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282009%2921%3A5%28210%29>>. Acesso em: 7 abr. 2023.

CONSOLI, N. C.; MARIN, E. J. B.; SAMANIEGO, R. A. Q.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MIRANDA, T.; CRISTELO, N. Effect of Mellowing and Coal Fly Ash Addition on Behavior of Sulfate-Rich Dispersive Clay after Lime Stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 6, e4019071, 2019b. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002699>>. Acesso em: 17 abr. 2023.

CONSOLI, N. C.; ROCHA, C. G. da; SILVANI, C. Effect of Curing Temperature on the Strength of Sand, Coal Fly Ash, and Lime Blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 8, e6014015, 2014a. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001011>>. Acesso em: 27 jul. 2023.

CONSOLI, N. C.; ROCHA, C. G. da; SILVANI, C. Devising dosages for soil–fly ash–lime blends based on tensile strength controlling equations. **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 238–245, mar. 2014b. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814000786>> Acesso em: 12 out. 2023.

CONSOLI, N. C.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MIGUEL, G. D.; TEBECHRANI NETO, A.; ANDREGHETTO, D.; FESTUGATO, L. Durability Assessment of Soil-Pozzolan-Lime Blends through Ultrasonic-Pulse Velocity Test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 8, e04020223, maio 2020c. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0003298>>. Acesso em: 7 abr. 2023.

CONSOLI, N. C.; SILVA, A. P. da; NIERWINSKI, H. P.; SOSNOSKI, J. Durability, strength, and stiffness of compacted gold tailings – cement mixes. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 55, n. 4, p. 486–494, 2017. Disponível em: <<https://cdnscepub.com/doi/10.1139/cgj-2016-0391>>. Acesso em: 9 nov. 2023.

CORDEIRO, G. C.; ANDREÃO, P. V.; TAVARES, L. M. Pozzolanic Properties of Ultrafine Sugar Cane Bagasse Ash Produced by Controlled Burning. **Heliyon**, v. 5, n. 10, e02566, 2019. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019362267>>. Acesso em: 19 nov. 2023.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 10, p. 3301–3303, out. 2009. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061809000452>> Acesso em: 13 maio. 2023.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. de M. R. Pozzolanic Activity and Filler Effect of Sugar Cane Bagasse Ash in Portland Cement and Lime Mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 5, p. 410–418, 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946508000036>>. Acesso em: 3 maio. 2023.

CUELLAR, V. **Análisis Crítico de los Métodos Existentes para el Empleo de Arcillas Expansivas en obras de Carreteras y Recomendaciones Sobre las Técnicas Más Idóneas Para su Uso habitual en España**. Madrid: 1978.

DAKSHANAMURTHY, V.; RAMAN, V. A Simple Method of Identifying an Expansive Soil. **Soils and Foundations**, v. 13, n. 1, p. 97–104, mar. 1973. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080620326378>> Acesso em: 23 out. 2023.

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, v. 31, e100637, nov. 2021. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214391221001276>> Acesso em: 13 maio. 2023.

DAS, B. M. **Principles of Foundation Engineering**. 8th. ed. [s.l.] Cengage Learning, 2016. 946 p.

DASH, S. K.; HUSSAIN, M. Lime Stabilization of Soils: Reappraisal. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 6, p. 707–714, 2012. Disponível em:

<<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000431>>. Acesso em: 23 jan. 2023.

DRUMOND, M. A. M. 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. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em:

<<https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/36836/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O%20Magno%20Augusto%20Motta%20Macieira%20Drumond.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2023.

ERZIN, Y.; GUNES, N. The unique relationship between swell percent and swell pressure of compacted clays. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 72, n. 1, p. 71–

80, fev. 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-013-0461-z>>. Acesso em: 27 out. 2023.

EWA, D. E.; EGBE, E. A.; UKPATA, J. O.; ETIKA, A. Sustainable subgrade improvement using limestone dust and sugarcane bagasse ash. **Sustainable Technology and Entrepreneurship**, v. 2, n. 1, e100028, jan. 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773032822000281>> Acesso em: 14 maio. 2023.

FAIRBAIRN, E. M. R.; AMERICANO, B. B.; CORDEIRO, G. C.; PAULA, T. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; SILVOSO, M. M. Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO₂ emissions reduction and potential for carbon credits. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 9, p. 1864–1871, set. 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030147971000109X>> Acesso em: 13 maio. 2023.

FASIHNIKOUTALAB, M. Olivine for Soil Stabilization. **Pertanika Journal of Scholarly Research Reviews**, v. 1, p. 18–26, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/284180531_Olivine_for_Soil_Stabilization>. Acesso em: 5 mar. 2023.

FATEHI, H.; ONG, D. E. L.; YU, J.; CHANG, I. Biopolymers as Green Binders for Soil Improvement in Geotechnical Applications: A Review. **Geosciences** 2021, v. 11, n. 7, p. 291, jul. 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3263/11/7/291/htm>>. Acesso em: 29 set. 2023.

FERREIRA, S. R. de M. **Colapso e Expansão em Solos Naturais não Saturados Devido à Inundação**. 1995. 401 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

FERREIRA, S. R. de M. **Solos colapsíveis e expansivos: uma visão panorâmica no Brasil**. Em: Simpósio Brasileiro De Solos Não Saturados, 7, p. 593–619, 2008. **Anais [...]**. Salvador, 2008.

FERREIRA, S. R. de M.; PAIVA, S. C. de; MORAIS, J. J. O.; VIANA, R. B. Avaliação da expansão de um solo do município de Paulista-PE melhorado com cal. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, 2018. Disponível em: <<http://www.scielo.br/j/rmat/a/4RQ7hQS7yhw4jjkTB4mzL5k/?lang=pt>>. Acesso em: 18 set. 2023.

FIRAT, S.; KHATIB, J. M.; YILMAZ, G.; COMERT, A. T. Effect of curing time on selected properties of soil stabilized with fly ash, marble dust and waste sand for road sub-base materials. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 7, p. 747–756, jun. 2017. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X17705726>>. Acesso em: 7 abr. 2023.

FIROOZI, A. A.; GUNNEY OLGUN, C.; FIROOZI, A. A.; BAGHINI, M. S. Fundamentals of soil stabilization. **International Journal of Geo-Engineering**, v. 8, n. 1, p. 1–16, dez. 2017. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1186/s40703-017-0064-9>>. Acesso em: 12 abr. 2023.

GAWRIUCZENKOW, I.; WÓJCIK, E. Prediction of swell pressure in Neogene clays from Warsaw, based on the swell index. **Geology, Geophysics and Environment**, v. 44, n. 2, p. 219–219, jun. 2018. Disponível em: <<https://journals.agh.edu.pl/geol/article/view/2717>>. Acesso em: 27 out. 2023.

GOODARZI, A. R.; AKBARI, H. R.; SALIMI, M. Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume. **Applied Clay Science**, v. 132–133, p. 675–684, nov. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169131716303489>> Acesso em: 13 maio. 2023.

GUEDES, J. P. C.; TENÓRIO, E. A. G.; SILVANI, C.; BRAZ, R. I. F. Previsão da resistência à compressão simples de um solo expansivo estabilizado com cimento através do índice porosidade/teor volumétrico de cimento. **Revista Principia**, v. 59, n. 2, p. 561, ago. 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5043>> Acesso em: 7 abr. 2023.

GUO, Y.; LUO, L.; LIU, T.; HAO, L.; LI, Y.; LIU, P.; ZHU, T. A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry. **Journal of Environmental Sciences**, v. 136, p. 682–697, fev. 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1001074223000268>> Acesso em: 19 out. 2023.

HASAN, H. A.; KHABBAZ, H.; FATAHI, B. Expansive Soil Stabilization Using Lime-Bagasse Ash. *In: GEOVANCOUVER 2016, Vancouver. Anais [...]. Vancouver, 2016.*

HASAN, H. A.; KHABBAZ, H.; FATAHI, B. Strength Property of Expansive Soils Treated with Bagasse Ash and Lime. **Sustainable Civil Infrastructures**, p. 24–35, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-61931-6_3>. Acesso em: 27 out. 2023.

HERZOG, A.; MITCHELL, J. K. Reactions Accompanying Stabilization of Clay With Cement. **Highway Research Record**, n. 36, 1963. Disponível em: <<https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1963/36/36-008.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2023.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An Introduction to Geotechnical Engineering**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1981. 733 p.

HOLTZ, W. G.; GIBBS, H. J. Engineering properties of expansive clays. **American Society of Civil Engineers (ASCE)**, v. 121, n. 1, p. 641–663, 1956.

IKEAGWUANI, C. C.; NWONU, D. C. Emerging Trends in Expansive Soil Stabilisation: A Review. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 11, n. 2, p. 423–440, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775518301513>>. Acesso em: 11 jun. 2023.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization Principles and Practice**. London: Butterworth and Company Publishers Limited, 1972. v. 11, 374 p.

JAFER, H.; ATHERTON, W.; SADIQUE, M.; RUDDOCK, F.; LOFFILL, E. Stabilisation of Soft Soil Using Binary Blending of High Calcium Fly Ash and Palm Oil Fuel Ash. **Applied Clay Science**, v. 152, p. 323–332, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131717305264>>. Acesso em: 20 jul. 2023.

JAGWANI, D.; JAISWAL, A. Expansive Soil Stabilization by Cinder of Coconut Husk. **Social Science Research Network**, 9 p., mar. 2019. Rochester, NY. Disponível em: <<https://papers.ssrn.com/abstract=3353634>>. Acesso em: 20 maio. 2023.

JAIN, A.; CHOUDHARY, A. K.; JHA, J. N. Influence of Rice Husk Ash on the Swelling and Strength Characteristics of Expansive Soil. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 38, n. 2, p. 2293–2302, abr. 2020. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10706-019-01087-6>>. Acesso em: 29 set. 2023.

JAIN, A. K.; JHA, A. K.; SHIVANSHI, S. Geotechnical behaviour and micro-analyses of expansive soil amended with marble dust. **Soils and Foundations**, v. 60, n. 4, p. 737–751, ago. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080620336659>> Acesso em: 29 out. 2023.

JALAL, F. E.; XU, Y.; JAMHIRI, B.; MEMON, S. A.; GRAZIANI, A. On the Recent Trends in Expansive Soil Stabilization Using Calcium-Based Stabilizer Materials (CSMs): A Comprehensive Review. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2020. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/amse/2020/1510969/>> Acesso em: 12 maio. 2023.

JAMES, J.; PANDIAN, P. K. Bagasse Ash as an Auxiliary Additive to Lime Stabilization of an Expansive Soil: Strength and Microstructural Investigation. **Advances in Civil Engineering**, 2018. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/ace/2018/9658639/>>. Acesso em: 27 out. 2023.

JAMES, J.; PANDIAN, P. K.; SWITZER, A. S. Egg Shell Ash As Auxiliary Addendum to Lime Stabilization of an Expansive Soil. **The Journal of Solid Waste Technology and Management**, v. 43, n. 1, p. 15–25, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.5276/JSWTM.2017.15>> Acesso em: 25 nov. 2023.

JI-RU, Z.; XING, C. Stabilization of Expansive Soil by Lime and Fly Ash. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater**, v. 17, n. 4, p. 73–77, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF02838423>> Acesso em: 28 jul. 2023.

JOSHAGHANI, A.; MOEINI, M. A. Evaluating the Effects of Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA) and Nanosilica on the Mechanical and Durability Properties of Mortar. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 818–831, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817313776>>. Acesso em: 18 jul. 2023.

KAYABALI, K.; DEMIR, S. Measurement of swelling pressure: direct method versus indirect methods. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 48, n. 3, p. 354–364, mar. 2011. Disponível em: <<https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/T10-074>>. Acesso em: 27 out. 2023.

KHADKA, S. D.; JAYAWICKRAMA, P. W.; SENADHEERA, S.; SEGVIC, B. Stabilization of Highly Expansive Soils Containing Sulfate Using Metakaolin and Fly Ash Based Geopolymer Modified with Lime and Gypsum. **Transportation Geotechnics**, v. 23, e100327, 2020. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214391218302526>>. Acesso em: 6 jun. 2023.

KHAN, F. K.; KANTROO, S.; SOBTI, J. A Short Review on Improvement in Soil and Cement Properties by Addition of Bagasse Ash. *In*: T. G. Sitharam, T. G., Parthasarathy, C. R., Kolathayar, S. (ed.). **Ground Improvement Techniques** 118. ed. Singapura: Springer, Singapore, 2021. p. 73-83. (Lecture Notes in Civil Engineering). Disponível em:

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-9988-0_8. Acesso em: 6 fev. 2023.

KHAN, S. A.; KAMAL, M. A.; HAROON, M. Potential of Cement-Treated Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA) as Highway Construction Material. **Road & Transport Research**, v. 24, n. 35, set. 2015. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Potential-of-cement-treated-sugar-cane-bagasse-ash-Khan-Kamal/26bce334ab7c0995a3fa54d8d14a77c2269abc08>>.

Acesso em: 26 maio 2023.

KULANTHAIVEL, P.; SOUNDARA, B.; VELMURUGAN, S.; NAVEENRAJ, V. Experimental Investigation on Stabilization of Clay Soil Using Nano-Materials and White Cement. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 507–511, 2021. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320308531>>.

KUMAR, J. K.; KUMAR, V. P. Soil Stabilization Using E-Waste: A Retrospective Analysis. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, p. 691–693, 2020. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319333887>>. Acesso em: 10 ago. 2023.

KUMARI, N.; MOHAN, C.; KUMARI, N.; MOHAN, C. Basics of Clay Minerals and Their Characteristic Properties. **Clay and Clay Minerals**, jun. 2021. Disponível em:

<<https://www.intechopen.com/chapters/76780>>. Acesso em: 23 out. 2023.

KUO, S. L.; LIAO, C. J. Photocatalytic Disinfection of Bacteria by Sodium Light with Smectite Catalysts. **Water Quality Research Journal**, v. 41, n. 4, p. 365–374, nov. 2006.

Disponível em: <<http://iwaponline.com/wqrj/article-pdf/41/4/365/230382/wqrjc0410365.pdf>>. Acesso em: 23 out. 2023.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. The role of effective stress in the behavior of expansive soils. *In*: Soil Mechanics Conference, **Anais [s.l.]**. 1959.

LATIFI, N.; RASHID, A. S. A.; SIDDIQUA, S.; HORPIBULSUK, S. Micro-Structural Analysis of Strength Development in Low- and High Swelling Clays Stabilized with Magnesium Chloride Solution — A Green Soil Stabilizer. **Applied Clay Science**, v. 118, p. 195–206, 2015. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131715301290>>. Acesso em: 21 jan. 2023.

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.; FUBINI, B. The Surface Reactivity and Implied Toxicity of Ash Produced from Sugarcane Burning. **Environmental Toxicology**, v. 29, n. 5, p. 503–516, 2014. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22431484>>. Acesso em: 30 nov. 2022.

LI, J.; CAMERON, D. A.; REN, G. Case Study and Back Analysis of a Residential Building Damaged by Expansive Soils. **Computers and Geotechnics**, v. 56, p. 89–99, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266352X13001857>>. Acesso em: 30 out. 2022.

LIMA, R. P. de; JACINTHO, A. E. P. G. de A.; FORTI, N. C. da S.; PIMENTEL, L. L. Estabilização de solo laterítico utilizando cinza do bagaço da cana de açúcar e cal hidratada. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 1, p. e13143, maio 2022. Disponível em: <<http://www.scielo.br/j/rmat/a/q7FWrgFdGQbKzDdkWQhVpGj/?lang=pt>>. Acesso em: 14 maio. 2023.

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**, v. 221, p. 1–11, out. 2019a. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819313364>>. Acesso em: 8 out. 2023.

LIU, Y.; SU, Y.; NAMDAR, A.; ZHOU, G.; SHE, Y.; YANG, Q. Utilization of Cementitious Material from Residual Rice Husk Ash and Lime in Stabilization of Expansive Soil. **Advances in Civil Engineering**, e5205276, 2019b. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/ace/2019/5205276/>>. Acesso em: 8 set. 2023.

LUCENA, L. C. de F. L.; SILVANI, C.; TENÓRIO, E. A. G.; GUIMARÃES, S. G. Devising Methodology to Control Clay Swelling with Rock Dust Waste and Soil Porosity. 2023. Submetido à publicação.

MANSO, J. M.; LÓPEZ, V. O.; POLANCO, J. A.; SETIÉN, J. The Use of Ladle Furnace Slag in Soil Stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 126–134, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181200757X>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

MCKEEN, R. G. A model for predicting expansive soil behaviour. *In*: Proceedings of the 7th International Conference on Expansive Soils, p. 1–6, 1992, Dallas. **Anais [...]**. Dallas: Texas Tech University, 1992.

MELESE, B. Review on Soil Stabilization Using Bagasse Ash With Lime and Molasses With Cement. **Environmental Science**, [...]. 2017. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/REVIEW-ON-SOIL-STABILIZATION-USING-BAGASSE-ASH-WITH-Melese/9a1fedc56753f66301fe1a06fed0f9f9984b04fe>>. Acesso em: 15 mar. 2023.

MICHAEL, T.; SINGH, S. K. A Survey of Literature on Impact of Silica Fume (SF) and Saw Dust Ash (SDA) On Expansive Soil. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)**, v. 4, n. 8, p. 7, 2016. Disponível em:

<https://www.academia.edu/29834043/A_Survey_of_Literature_on_Impact_of_Silica_Fume_SF_and_Saw_Dust_Ash_SDA_On_Expansive_Soil>. Acesso em: 14 set. 2023.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. 3rd. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 592 p.

MOHAN, R.; ATHIRA, G.; MALI, A. K.; BAHURUDEEN, A.; NANTHAGOPALAN, P. Systematic Pretreatment Process and Optimization of Sugarcane Bagasse Ash Dosage for Use in Cement-Based Products. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 4, e4021045, 2021. Disponível em:

<<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0003650>>. Acesso em: 4 nov. 2023.

NALBANTOĞLU, Z. Effectiveness of Class C fly ash as an expansive soil stabilizer.

Construction and Building Materials, v. 18, n. 6, p. 377–381, jul. 2004. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006180400042X>>. Acesso em: 7 abr. 2023.

ODOM, I. E. Smectite clay minerals: properties and uses. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, n. 311, p. 391–409, jun. 1984. Disponível em: <<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.1984.0036>>. Acesso em: 13 maio. 2023.

OGILA, W. A. M. The impact of natural ornamental limestone dust on swelling characteristics of high expansive soils. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 24, p. 1–17, dez. 2016. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-6305-y>>. Acesso em: 12 abr. 2023.

OLARTE, M. C.; CAVALCANTE, A. L. B. Hydromechanical behavior of unsaturated swelling clays: review. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2515, e012013, p. 7, 2023. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2515/1/012013/pdf>>. Acesso em: 14 dez. 2023.

OLIVEIRA, A. G. S.; JESUS, A. C.; MIRANDA, S. B. Estudo Geológico – Geotécnico dos Solos Expansivos da Região do Recôncavo Baiano. *In*: II GEOJOVEM, p. 6, 2006. **Anais [...]**. [s.l.], 2006.

OLPHEN, H. Van. **An introduction to clay colloid chemistry, for clay technologists, geologists, and soil scientists**. 2nd. ed. New York: John Wiley and Sons Ltd., 1977. 318 p.

ONYELOWE, K. C.; ONYIA, M. E.; NGUYEN-THI, D.; BUI VAN, D.; ONUKWUGHA, E.; BAYKARA, H.; OBIANYO, I. I.; DAO-PHUC, L.; UGWU, H. U. Swelling Potential of Clayey Soil Modified with Rice Husk Ash Activated by Calcination for Pavement Underlay by Plasticity Index Method (PIM). **Advances in Materials Science and Engineering**, 2021. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/amse/2021/6688519/>>. Acesso em: 29 set. 2023.

ORTIZ, J. M. R. **Las arcillas expansivas: su estudio y tratamiento**. 1975 [s.l.].

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)**, v. 21, p. 437–449, 2016. Disponível em: <<http://www.scielo.br/j/rmat/a/4SZJSLW4dWKVpdHjVkj53SP/?lang=pt>>. Acesso em: 24 jul. 2023.

PAULINUS, A. P. Influence of Bagasse Ash and Lime on Mechanical and Chemical Stabilization of Black Cotton Soil. **International Journal of Engineering Research and Applications**, v. 12, n. 6, p. 30–35, jun. 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/362701625_Influence_of_Bagasse_Ash_and_Lime_on_Mechanical_and_Chemical_Stabilization_of_Black_Cotton_Soil>. Acesso em: 27 out. 2023.

PETER, L.; JAYASREE, P. K.; BALAN, K.; RAJ, S. A. Laboratory Investigation in the Improvement of Subgrade Characteristics of Expansive Soil Stabilised with Coir Waste. **Transportation Research Procedia**, v. 17, p. 558–566, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516307256>>. Acesso em: 22 out. 2023.

PHANIKUMAR, B. R. Effect of lime and fly ash on swell, consolidation and shear strength characteristics of expansive clays: a comparative study. **Geomechanics and Geoengineering: An International Journal**, v. 4, n. 2, p. 175–181, 2009. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17486020902856983>>. Acesso em: 29 set. 2023.

PHANIKUMAR, B. R.; SINGLA, R. Swell-Consolidation Characteristics of Fibre-Reinforced Expansive Soils. **Soils and Foundations**, v. 56, n. 1, p. 138–143, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080616000123>>. Acesso em: 2 abr. 2023.

PHANIKUMAR, B. R.; SREEDHARAN, R.; ANIRUDDH, C. Swell-compressibility characteristics of lime-blended and cement-blended expansive clays – A comparative study. **Geomechanics and Geoengineering**, v. 10, n. 2, p. 153–162, abr. 2015. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17486025.2014.902120>>. Acesso em: 29 set. 2023.

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, e100255, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214391219301059>>. Acesso em: 21 ago. 2023.

PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARJA, S. Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. **Transportation Research Record**, v. 1652, n. 1, p. 215–227, 1999. Disponível em: <<https://doi.org/10.3141/1652-28>>. Acesso em: 3 out. 2023.

PUPPALA, A. J.; MANOSUTHIKIJ, T.; CHITTOORI, B. C. S. Swell and Shrinkage Characterizations of Unsaturated Expansive Clays from Texas. **Engineering Geology**, v. 164, p. 187–194, 2013. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795213002111>>. Acesso em: 6 abr. 2023.

QI, Y.; WANG, Z.; XU, H.; YUAN, Z. Instability Analysis of a Low-Angle Low-Expansive Soil Slope under Seasonal Wet-Dry Cycles and River-Level Variations. **Advances in Civil Engineering**, v. 2020, e3479575, p. 12, 2020. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/ace/2020/3479575/>>. Acesso em: 14 dez. 2023.

RAMBABU, J.; BHAVANNARAYANA, C. H. An Experimental Study of Expensive Soil Stabilized With Banana Fibre and Magnesium Chloride. **International Journal for Innovative Engineering and Management Research**, p. 162–168, 2019. Disponível em: <https://www.ijiemr.com/public/uploads/paper/2453_approvedpaper.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2023.

RAMÍREZ, R. A.; GARCÍA, P. M.; REYES, J. M.; JUÁREZ, D. C. A.; PONCE, Y. G. The Use of Sugarcane Bagasse Ash and Lime to Improve the Durability and Mechanical Properties of Compacted Soil Blocks. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 296–305, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812001493>>. Acesso em: 7 nov. 2023.

RAMU, K.; DAYAKARBABU, R. A Laboratory Study on the Stabilized Expansive Soil with Partial Replacement of Fly Ash and Palm Oil Fuel Ash. In: Reddy, C. N. V. S.; Reddy, V.; Saride, S.; Krishna, A. M. (ed.). **Ground Improvement and Reinforced Soil Structures**. v. 152. Singapura: Springer, Singapore, 2022. p. 69-78. (Lecture Notes in Civil Engineering). Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-1831-4_7>. Acesso em: 31 maio. 2023.

REICHERT, J. M. **Solos florestais**. 2009. [s.l.]. Disponível em: <http://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Disciplinas/SolosFlorestais/Apostila_Teorica%20SF.pdf>. Acesso em: 23 out. 2023.

RIBEIRO, V. H. **Estudo de caso de solução para fundação em solo expansível em Sousa-PB**. 2019. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

ROSENBALM, D.; ZAPATA, C. E. Effect of Wetting and Drying Cycles on the Behavior of Compacted Expansive Soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 1, p. 9, ago. 2016. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001689>>. Acesso em: 14 dez. 2023.

SALAS, J. A. J. **Cimentaciones en terrenos expansivos o colapsables - Geotecnia Y Cimientos III**. Madrid: Mares de Libros, 1980.

SALDANHA, R. B.; MALLMANN, J. E. C.; CONSOLI, N. C. Salts accelerating strength increase of coal fly ash–carbide lime compacted blends. **Géotechnique Letters**, v. 6, n. 1, p. 23–27, 2016. Disponível em: <<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/jgele.15.00111>>. Acesso em: 11 out. 2023.

SAMANIEGO, R. A. Q.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; ARAÚJO, M. T. de; BRUSCHI, G. J.; FESTUGATO, L.; CONSOLI, N. C. Key parameters controlling strength and resilient modulus of a stabilised dispersive soil. **Road Materials and Pavement Design**, v. 24, n. 1, p. 279–294, jan. 2023. Disponível em:

<<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14680629.2021.2013937>>. Acesso em: 12 out. 2023.

SANTOS, G. M. dos. **Estudo do comportamento histerético de uma argila expansiva não-saturada**. 2008. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008. Disponível em:

<https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/4999/1/arquivo2210_1.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2023.

SANTOS, M. D. D. dos. **Problemas geotécnicos associados a solos expansivos em Lisboa**. 2017. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017. Disponível em:

<https://run.unl.pt/bitstream/10362/27754/1/Santos_2017.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2023.

SANTOS, P. de S. **Tecnologia das argilas**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1975. 804 p.

SARGENT, P. The development of alkali-activated mixtures for soil stabilisation. *In*: Torgal, F. P.; Labrincha, J.A.; Leonelli, C.; Palomo, A.; Chindapasirt, P. (ed.). **Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes**. Cambridge, Uk: Woodhead Publishing, 2015. Cap. 21. p. 555-604. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781782422761500216>>. Acesso em: 18 maio 2023.

SECO, A.; RAMÍREZ, F.; MIQUELEIZ, L.; GARCÍA, B. Stabilization of Expansive Soils for Use in Construction. **Applied Clay Science**, v. 51, n. 3, p. 348–352, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131710004436>>. Acesso em: 19 jan. 2023.

SEDA, J. H.; LEE, J. C.; CARRARO, J. A. H. Beneficial Use of Waste Tire Rubber for Swelling Potential Mitigation in Expansive Soils. **Soil Improvement**, p. 1–9, 2012.

Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40916%28235%295>>. Acesso em: 14 set. 2023.

SEED, H. B.; WOODWARD JUNIOR, R. J.; LUNDGREN, R. Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 88, n. 3, p. 53–87, jun. 1962. Disponível em:

<<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JSFEAQ.0000431>>. Acesso em: 7 abr. 2023.

SHAHSAVANI, S.; VAKILI, A. H.; MOKHBERI, M. Effects of freeze-thaw cycles on the characteristics of the expansive soils treated by nanosilica and Electric Arc Furnace (EAF) slag. **Cold Regions Science and Technology**, v. 182, e103216, fev. 2021. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165232X20304638>>. Acesso em: 29 set. 2023.

SILVA, J. C. da. **Estabilização de solos expansivos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar**. 2022. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade

Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2022. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/27640>>. Acesso em: 12 out. 2023.

SILVA, M. L. da; MARTINS, J. L.; RAMOS, M. M.; BIJANI, R. Estimation of clay minerals from an empirical model for Cation Exchange Capacity: An example in Namorado oilfield, Campos Basin, Brazil. **Applied Clay Science**, v. 158, p. 195–203, jun. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169131718300978>>. Acesso em: 23 out. 2023.

SILVA, J. A. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo potencialmente expansivo, encontrado em Agrestina/PE, aplicando cinza de casca de arroz e cal como aditivos estabilizantes**. 2018. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/32236>>. Acesso em: 29 set. 2023.

SILVA, J. A.; BELLO, M. I. M. da C. V.; FERREIRA, S. R. de M. Comportamento geotécnico de um solo expansivo estabilizado com cinza de casca de arroz e cal hidratada. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 2, p. 232–256, jun. 2020. Disponível em: <<https://www.ead.codai.ufpe.br/index.php/JEAP/article/view/3205>>. Acesso em: 28 out. 2023.

SILVANI, C. **Influência da temperatura de cura no comportamento mecânico de misturas areia-cinza volante-cal**. 2013. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/75908>>. Acesso em: 7 jul. 2023.

SILVANI, C.; GUEDES, J. P.; SILVA, J. C. da; TENÓRIO, E. A. G.; NASCIMENTO, R. Brackish water in swelling soil stabilization with lime and sugarcane bagasse ash (SCBA). **Soils and Rocks**, v. 46, n. 3, e2023010022, abr. 2023. Disponível em: <<https://www.soilsandrocks.com/sr-2023-010022>>. Acesso em: 24 abr. 2023.

SILVANI, C.; LUCENA, L. C. de F. L.; TENÓRIO, E. A. G.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; CONSOLI, N. C. Key Parameter for Swelling Control of Compacted Expansive Fine-Grained Soil–Lime Blends. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 146, n. 9, e6020012, 2020. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0002335>>. Acesso em: 6 abr. 2023.

SILVANI, C.; SILVA, J. C. da; GUEDES, J. P. C. Sugarcane Bagasse Ash as a Green Stabilizer for Swelling Soil. **Geotechnical and Geological Engineering**, p. 1–12, ago. 2023. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10706-023-02628-w>>. Acesso em: 29 set. 2023.

SIRIVITMAITRIE, C.; PUPPALA, A. J.; CHIKYALA, V.; SARIDE, S.; HOYOS, L. R. Combined Lime and Cement Treatment of Expansive Soils with Low to Medium Soluble Sulfate Levels. In: GEOCONGRESS 2008: *Geosustainability and Geohazard Mitigation*, 2008, New Orleans. **Proceedings [...]**. [S.L.]: Geo-Institute Of Asce, 2008. p. 646-653. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/40971%28310%2980>>. Acesso em: 23 out. 2023.

SKEMPTON, A. W. The Colloidal “Activity” of Clays. In: ICOSMFE, 3., 1953, Zurich. **Publication.** Switserland: International Society For Soil Mechanics And Geotechnical Engineering, 1953. p. 57-61. Disponível em: <<https://www.issmge.org/publications/publication/the-colloidal-activity-of-clays>>. Acesso em: 6 jun. 2023.

SNETHEN, D. R. **TECHNICAL GUIDELINES FOR EXPANSIVE SOILS IN HIGHWAY SUBGRADES.** 00308481. ed. Washington, Dc: Federal Highway Administration, 1979. 168 p. Report FHWA-RD-79-51. Disponível em: <<https://trid.trb.org/view/144917>>. Acesso em: 14 maio 2023.

SRIDHARAN, A.; PRAKASH, K. Classification procedures for expansive soils. **Geotechnical Engineering**, v. 143, n. 4, p. 235–240, maio 2000. Disponível em: <<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geng.2000.143.4.235>>. Acesso em: 23 out. 2023.

TAHER, Z. J.; SCALIA IV, J.; BAREITHER, C. A. Comparative Assessment of Expansive Soil Stabilization by Commercially Available Polymers. **Transportation Geotechnics**, v. 24, e100387, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214391220302750>>. Acesso em: 6 maio 2023.

TANYILDIZI, M.; UZ, V. E.; GÖKALP, İ. Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review. **Construction and Building Materials**, v. 398, e132435, set. 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061823021517>>. Acesso em: 8 out. 2023.

TEDDY, Z.; ANNETTE, B.; AINOMUGISHA, S. Blending Lime with Sugarcane Bagasse Ash for Stabilizing Expansive Clay Soils in Subgrade. **Journal of Engineering and Technological Sciences**, v. 53, n. 5, p. 210510–210510, nov. 2021. Disponível em: <<https://journals.itb.ac.id/index.php/jets/article/view/13705>>. Acesso em: 27 out. 2023.

TENÓRIO, E. A. G. **Controle da expansão dos solos com resíduos de mármore e cal.** 2019. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

TIWARI, N.; SATYAM, N. An experimental study on the behavior of lime and silica fume treated coir geotextile reinforced expansive soil subgrade. **Engineering Science and Technology, an International Journal (JESTECH)**, v. 23, n. 5, p. 1214–1222, out. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098619322578>>. Acesso em: 29 out. 2023.

TIWARI, N.; SATYAM, N.; PUPPALA, A. J. Strength and durability assessment of expansive soil stabilized with recycled ash and natural fibers. **Transportation Geotechnics**, v. 29, e100556, jul. 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214391221000465>>. Acesso em: 7 abr. 2023.

TRB - TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime Stabilization. Reactions, Properties, Design, and Construction**. Washington, DC: National Research Council, 1987. 64 p.

UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Histórico de produção de açúcar e etanol e moagem de cana-de-açúcar - safra 2020/2021**. 2021. Disponível em: <<https://observatoriodacana.com.br/>>. Acesso: 17 abr. 2023.

ÜNVER, I. S.; LAV, M. A.; CXOKCXA, E.; BAYKAL, G. Evaluation of the Curing Time Effect on the Swelling, Unconfined Strength and Resilient Modulus of an Expansive Soil Improved with Hydrated Lime. **Transportation Research Record**, v. 2676, n. 4, p. 76–89, nov. 2021. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/03611981211057053>>. Acesso em: 13 maio. 2023.

VAN DER MERWE, D. H. The prediction of heave from the plasticity index and percentage of clay fraction of soils. **Transactions of the South African Institution of Civil Engineers**, v. 6, n. 6, p. 103–107, 1964. Disponível em: <https://journals.co.za/doi/abs/10.10520/AJA10212019_21190>. Acesso em: 23 out. 2023.

VELDE, B.; MEUNIER, A. **The origin of clay minerals in soils and weathered rocks**. 1st. ed. Heidelberg: Springer Berlin, 2008. 406 p.

VIJAYVERGIYA, V. N.; GHAZZALY, O. I. Prediction of swelling potential for natural clays. *In*: 3rd International Conference on Expansive Soils, 3, 1973, Haifa. **Proceedings [...]**. Haifa: 1973. p. 227–236.

WUBSHET, M.; TADESSE, S. Stabilization of Expansive Soil Using Bagasse Ash & Lime. **Zede Journal**, v. 32, p. 21–26, 2014. Disponível em: <<https://www.ajol.info/index.php/zj/article/view/142172>>. Acesso em: 19 maio 2023.

YILMAZ, F.; YURDAKUL, M. Evaluation of marble dust for soil stabilization. **Acta Physica Polonica A**, v. 132, n. 3, p. 710–711, set. 2017. Disponível em: <<http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/132/app132z3p082.pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2023.

YILMAZ, I. Indirect estimation of the swelling percent and a new classification of soils depending on liquid limit and cation exchange capacity. **Engineering Geology**, v. 85, n. 3–4, p. 295–301, jun. 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013795206001013>>. Acesso em: 27 out. 2023.

ZAREEI, S. A.; AMERI, F.; BAHRAMI, N. Microstructure, Strength, and Durability of Eco-Friendly Concretes Containing Sugarcane Bagasse Ash. **Construction and Building Materials**, v. 184, p. 258–268, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818315502>>. Acesso em: 11 set. 2023.

ZHAO, H.; GE, L.; PETRY, T. M.; SUN, Y. Z. Effects of chemical stabilizers on an expansive clay. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 18, n. 4, p. 1009–1017, set. 2014. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-013-1014-5>>. Acesso em: 24 out. 2023.

APÊNDICE A - MATERIAL COMPLEMENTAR

Tabela A1: Resultados dos ensaios de expansão unidimensional do solo expansivo e das misturas solo/CBCA/cal. Resultados dos cálculos dos parâmetros η , L_{iv} , η/L_{iv} , $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$.

Amostra	CBCA	Cal	h (%)	γ_d (kN/m ³)	Expansão livre	Tensão de expansão (kPa)	η (%)	L_{iv} (%)	η/L_{iv}	$\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}}$
E1.1	0%	0%	18,74	14,03	8,155 %	-	-	-	-	-
E1.2	0%	0%	19,32	13,96	8,060 %	-	-	-	-	-
E1.3	0%	0%	18,87	14,01	8,185 %	-	-	-	-	-
MÉDIA			18,98	14,00	8,133 %	-	-	-	-	-
E2.1	0%	0%	18,82	15,02	8,650 %	-	-	-	-	-
E2.3	0%	0%	19,11	14,99	8,585 %	-	-	-	-	-
MÉDIA			18,97	15,01	8,618 %	-	-	-	-	-
E3.1	0%	0%	19,15	15,98	9,085 %	-	-	-	-	-
E3.2	0%	0%	19,23	15,97	9,420 %	-	-	-	-	-
E3.3	0%	0%	18,54	16,06	10,015 %	-	-	-	-	-
MÉDIA			18,97	16,00	9,507 %	-	-	-	-	-
CP1	6,5 %	2 %	19,70	13,92	1,155 %	53,14	47,18	1,14	41,496	48,784
CP2	6,5 %	2 %	19,02	14,00	1,515 %	60,63	46,88	1,14	40,996	48,544
CP3	6,5 %	2 %	19,33	13,96	1,230 %	55,64	47,02	1,14	41,224	48,654
MÉDIA			19,35	13,96	1,300 %	56,47	-	-	-	-
CP4	6,5 %	2 %	19,25	14,97	2,310 %	88,10	43,19	1,22	35,316	45,511
CP5	6,5 %	2 %	19,80	14,90	2,200 %	85,61	43,45	1,22	35,693	45,731
CP6	6,5 %	2 %	18,73	15,03	2,520 %	95,59	42,94	1,29	34,959	45,300
MÉDIA			19,26	14,97	2,343 %	89,77	-	-	-	-
CP7	6,5 %	2 %	17,59	16,19	5,095 %	148,04	38,55	1,32	29,141	41,459
CP8	6,5 %	2 %	18,30	16,09	4,555 %	138,05	38,92	1,32	29,598	41,790
CP9	6,5 %	2 %	19,76	15,90	4,000 %	128,06	39,66	1,30	30,536	42,454
MÉDIA			18,55	16,06	4,550 %	138,05	-	-	-	-
CP10	6,5 %	3 %	19,81	13,90	0,485 %	30,67	47,18	1,69	27,959	54,054
CP11	6,5 %	3 %	19,53	13,94	0,585 %	33,16	47,06	1,69	27,820	53,945
CP12	6,5 %	3 %	18,76	14,03	0,770 %	35,66	46,71	1,70	27,439	53,641
MÉDIA			19,37	13,96	0,613 %	33,16	-	-	-	-
CP13	6,5 %	3 %	18,16	15,11	1,675 %	63,13	42,61	1,83	23,241	49,883
CP14	6,5 %	3 %	18,91	15,01	1,555 %	55,64	42,97	1,82	23,587	50,224
CP15	6,5 %	3 %	18,31	15,09	1,585 %	58,14	42,68	1,83	23,310	49,952
MÉDIA			18,46	15,07	1,605 %	58,97	-	-	-	-
CP16	6,5 %	3 %	17,48	16,21	3,260 %	105,58	38,43	1,97	19,540	45,822
CP17	6,5 %	3 %	17,77	16,17	2,710 %	100,59	38,58	1,96	19,665	45,973
CP18	6,5 %	3 %	19,12	15,98	2,265 %	95,59	39,28	1,94	20,249	46,664
MÉDIA			18,12	16,12	2,745 %	100,59	-	-	-	-
CP19	6,5 %	4 %	18,25	14,09	0,375 %	28,17	46,43	2,26	20,565	57,379
CP20	6,5 %	4 %	19,70	13,92	0,260 %	20,68	47,08	2,23	21,108	57,997
CP21	6,5 %	4 %	19,12	13,99	0,295 %	23,17	46,82	2,24	20,891	57,752
MÉDIA			19,02	14,00	0,310 %	24,01	-	-	-	-
CP22	6,5 %	4 %	19,79	14,90	0,800 %	33,16	43,34	2,39	18,147	54,343
CP23	6,5 %	4 %	19,70	14,91	0,810 %	35,66	43,30	2,39	18,115	54,300
CP24	6,5 %	4 %	18,21	15,10	0,935 %	40,66	42,58	2,42	17,594	53,577
MÉDIA			19,23	14,97	0,848 %	36,49	-	-	-	-
CP25	6,5 %	4 %	18,70	16,04	1,815 %	75,62	39,01	2,57	15,174	49,858
CP26	6,5 %	4 %	18,53	16,06	2,010 %	80,61	38,92	2,57	15,118	49,765
CP27	6,5 %	4 %	19,03	16,00	1,600 %	73,12	39,18	2,56	15,282	50,038
MÉDIA			18,75	16,03	1,808 %	76,45	-	-	-	-

Figura A1: Gráficos da expansão livre pelo γ_d , separados pelo teor de cal em 2%.

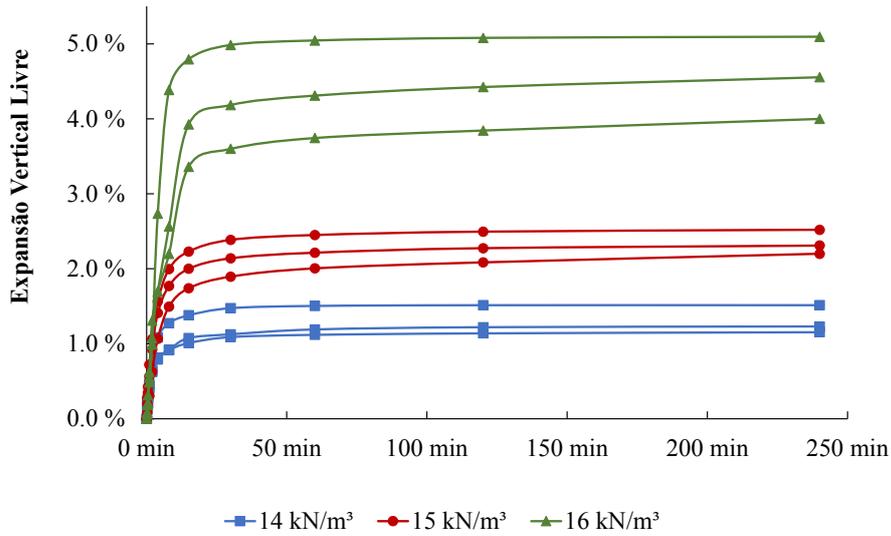


Figura A2: Gráficos da expansão livre pelo γ_d , separados pelo teor de cal de 3%.

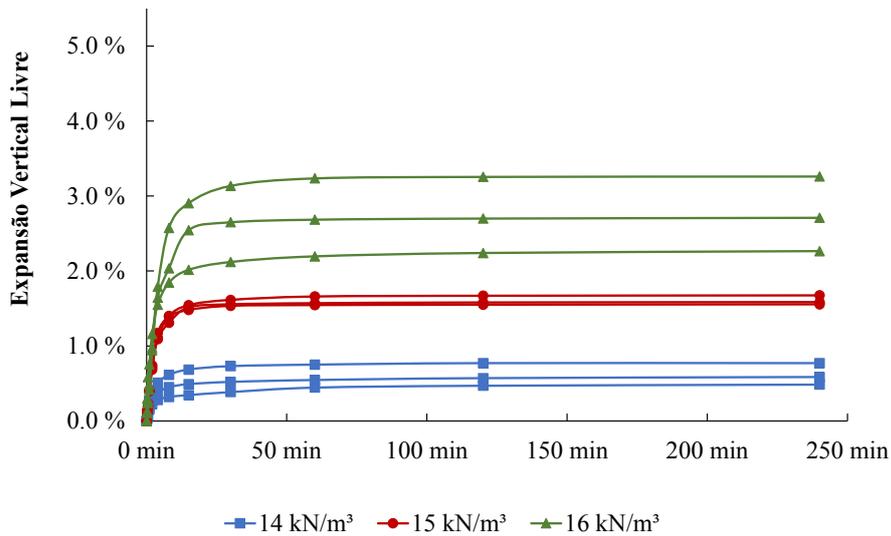


Figura A3: Gráficos da expansão livre pelo γ_d , separados pelo teor de cal de 4%.

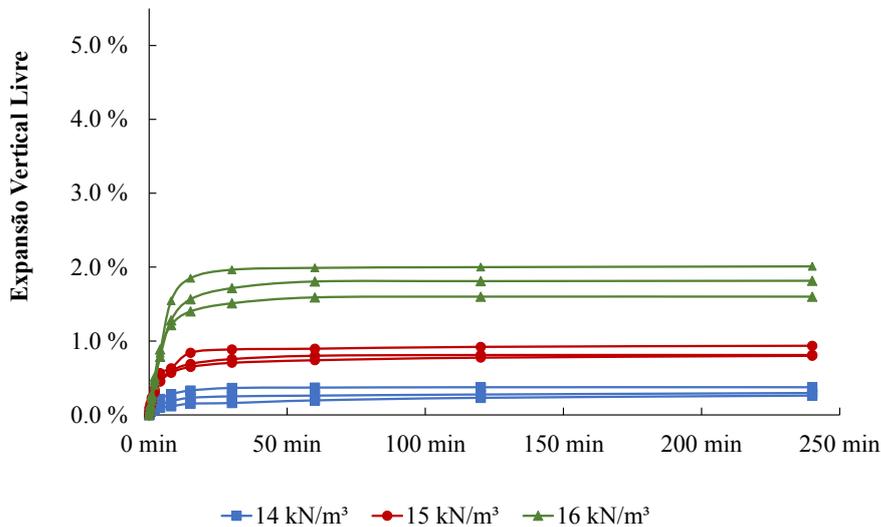


Figura A4: Tendência de tensão de expansão por expansão livre por 2% de teor de cal.

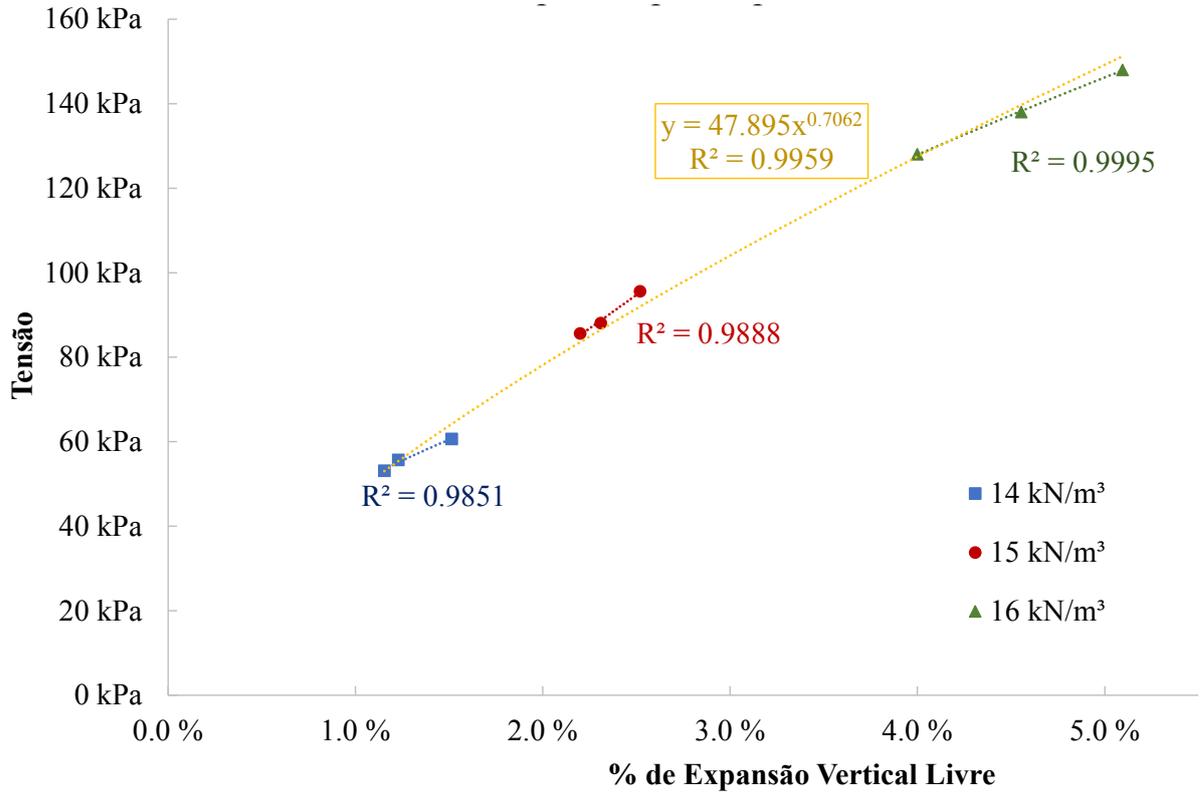


Figura A5: Tendência de tensão de expansão por expansão livre por 3% de teor de cal.

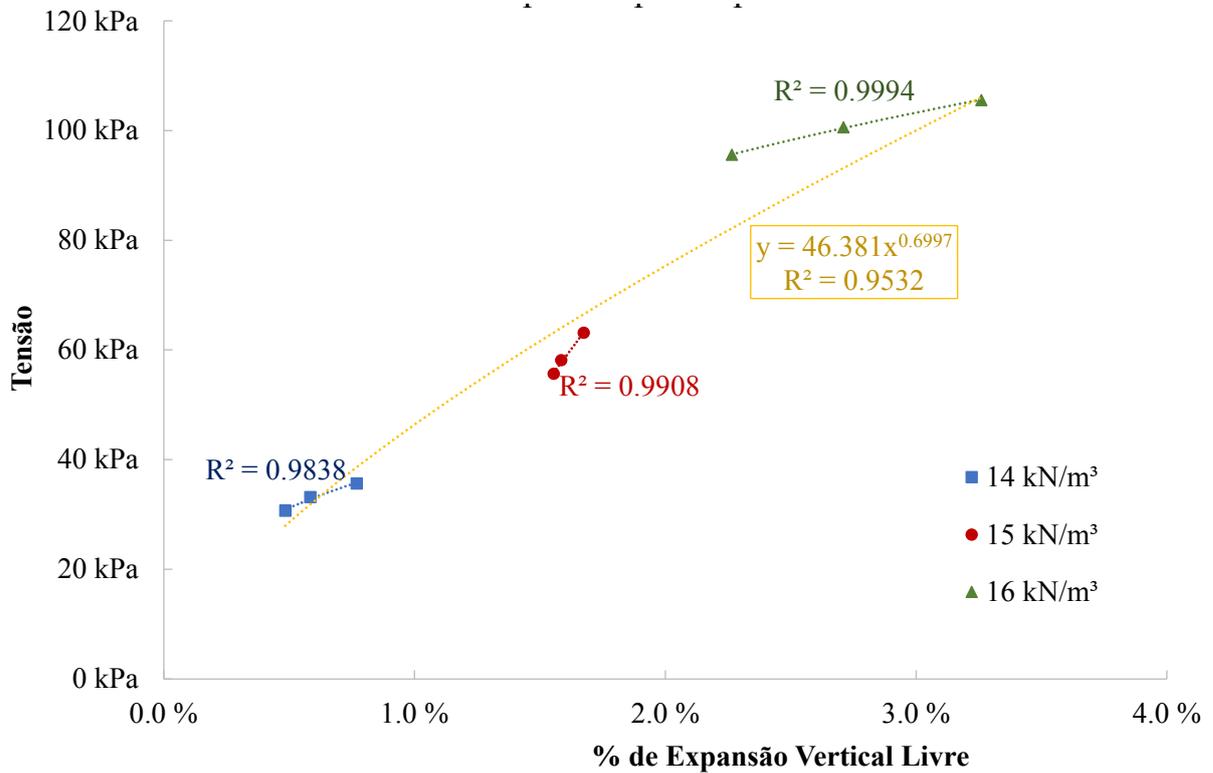


Figura A6: Tendência de tensão de expansão por expansão livre por 4% de teor de cal.

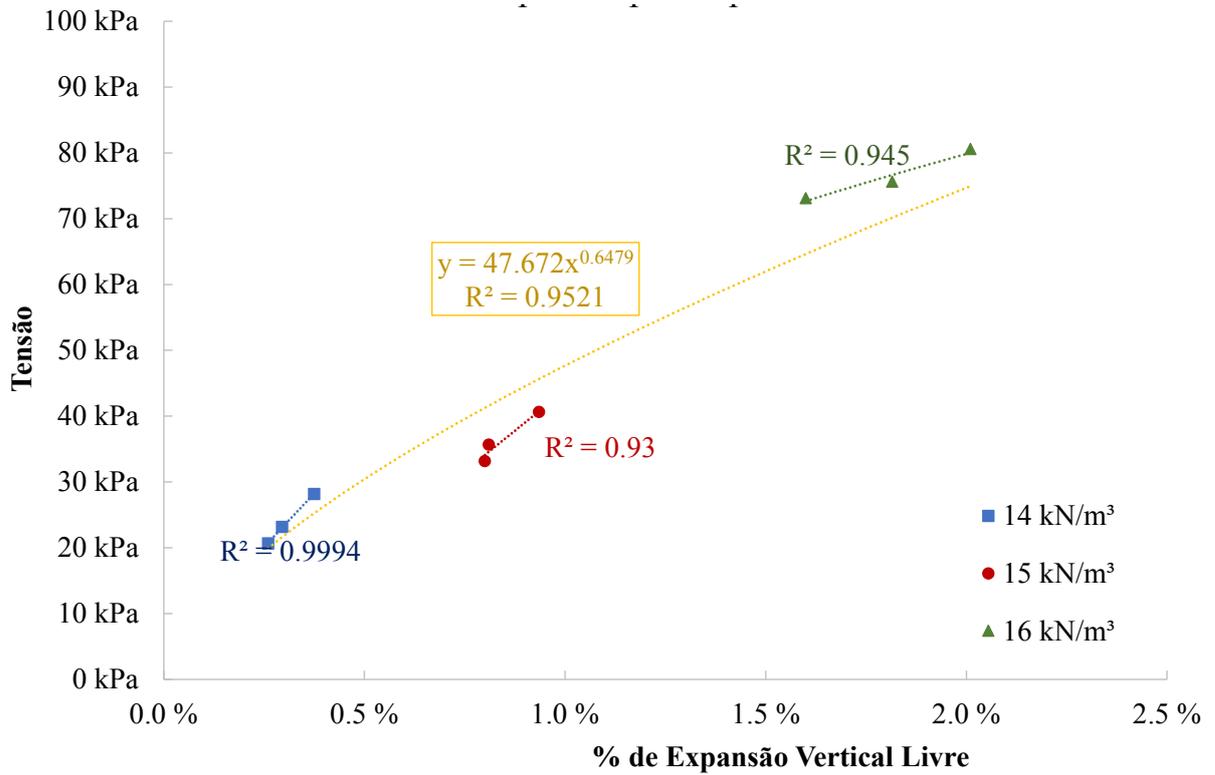


Figura A7: Tendência de tensão de expansão por expansão livre pelo γ_d de 14 kN/m³.

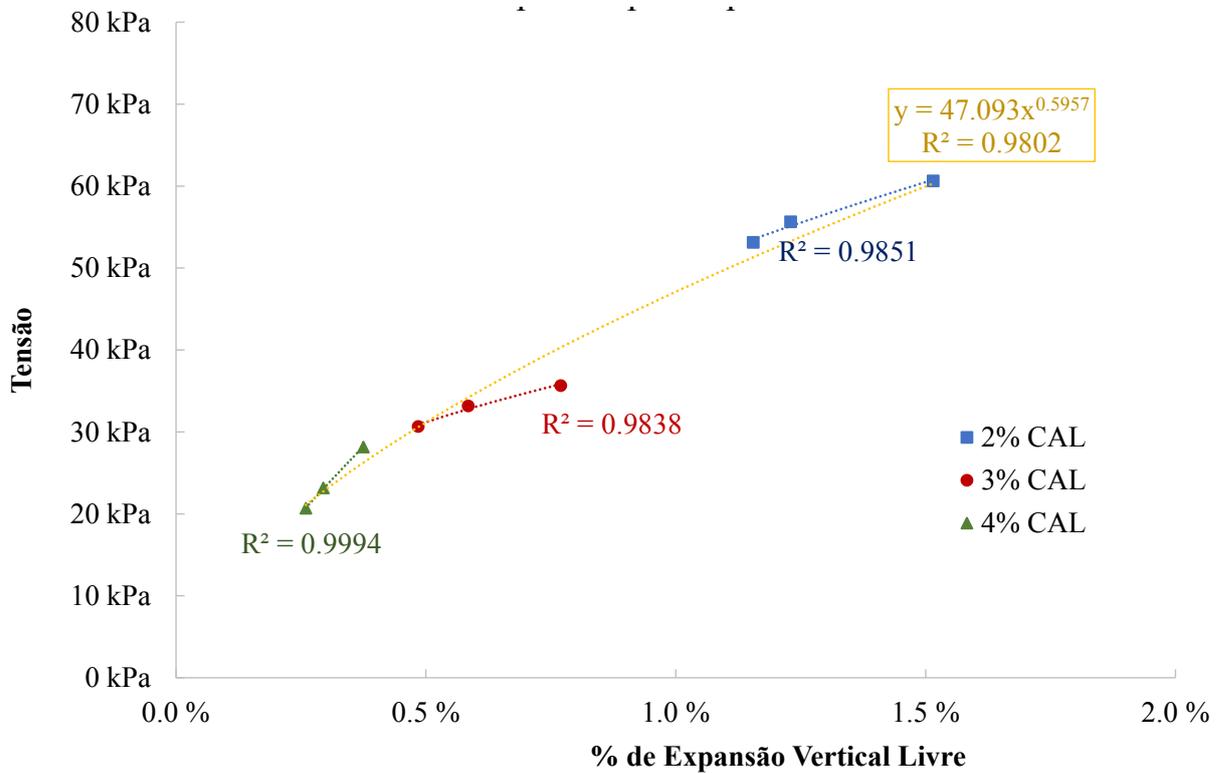


Figura A8: Tendência de tensão de expansão por expansão livre pelo γ_d de 15 kN/m³.

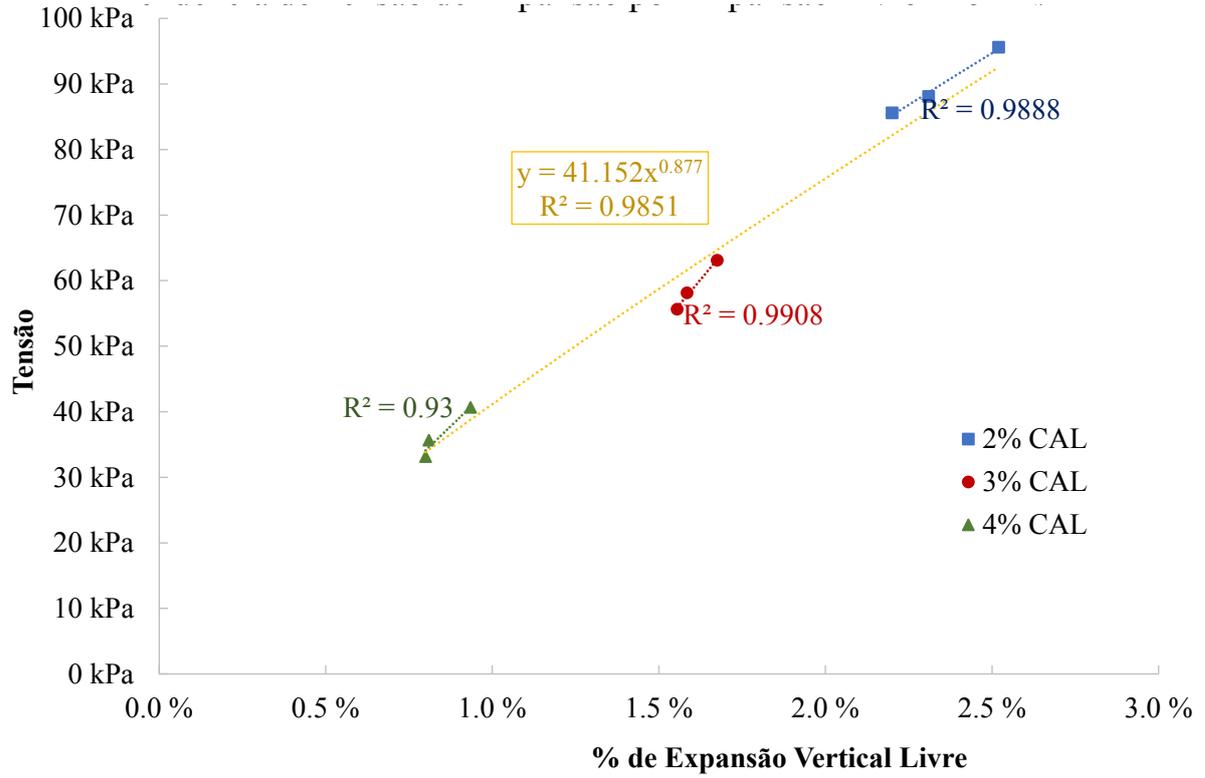


Figura A9: Tendência de tensão de expansão por expansão livre pelo γ_d de 16 kN/m³.

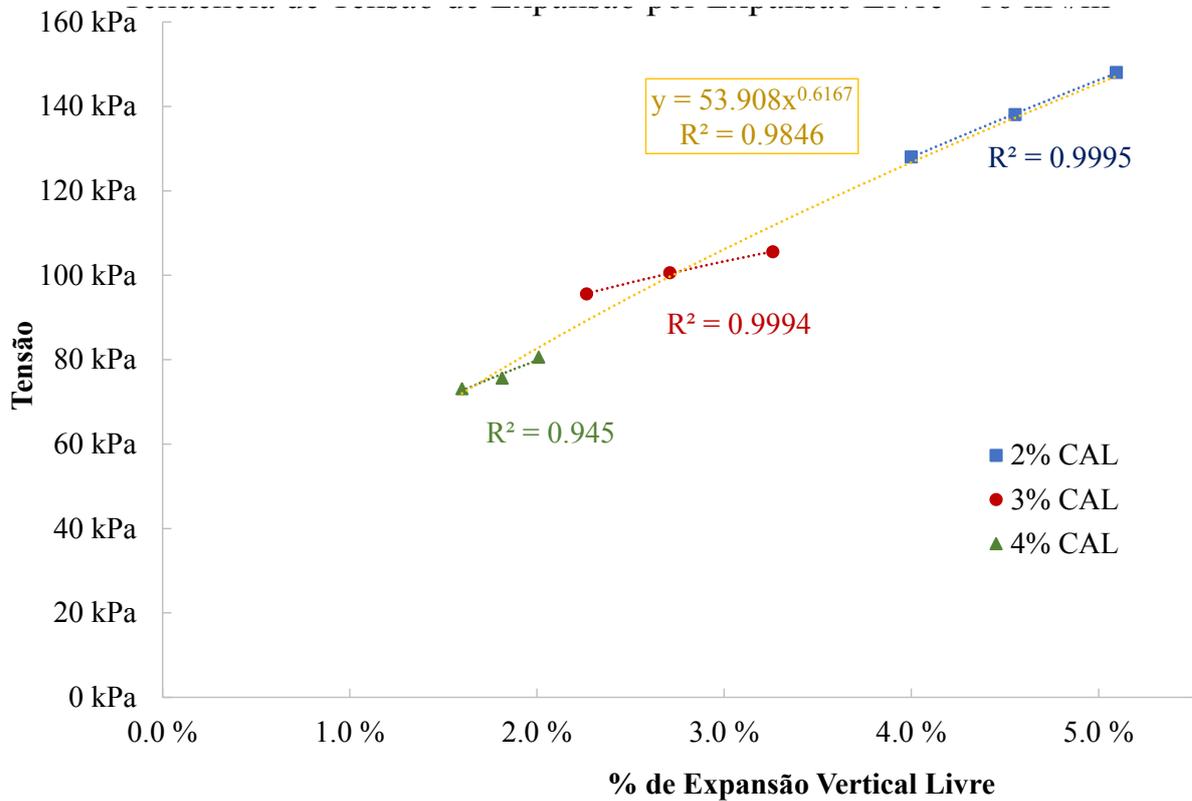
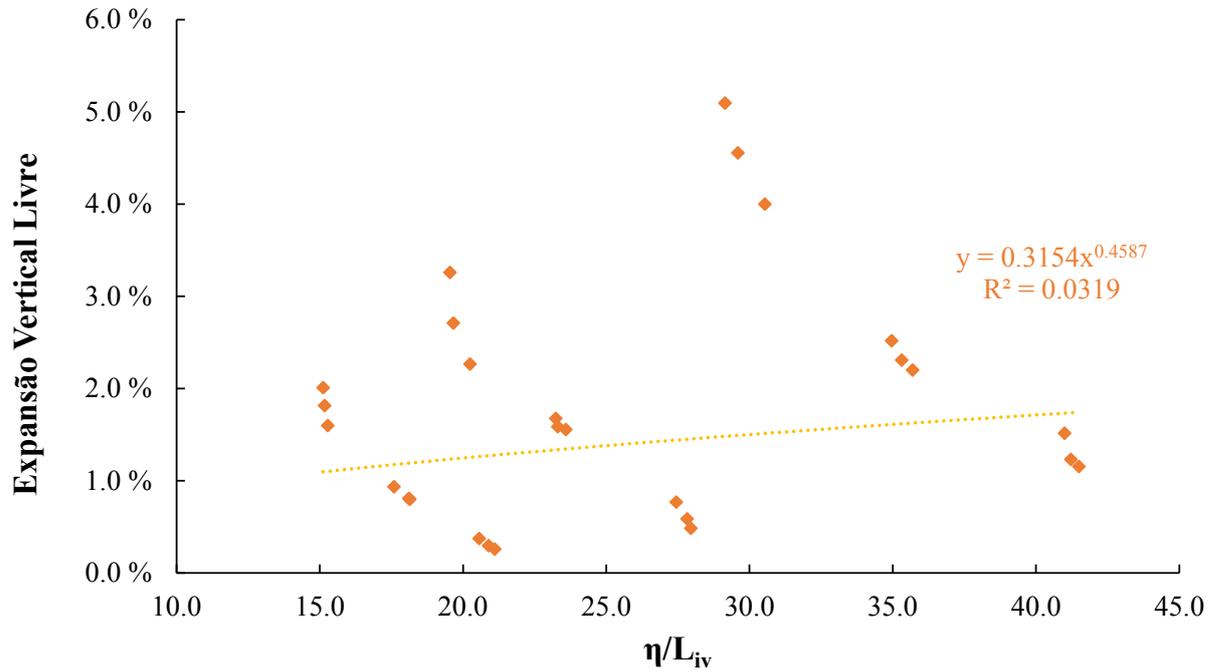


Figura A10: Expansão livre pelo η/L_{iv} das misturas.Figura A11: Tensão de expansão pelo η/L_{iv} das misturas.