



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

**INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO NA DOSAGEM DE SOLO
EXPANSIVO ESTABILIZADO COM CAL**

VÍTOR BRAGA DE AZEVEDO

Campina Grande – PB

Fevereiro de 2025

VÍTOR BRAGA DE AZEVEDO

**INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO NA DOSAGEM DE SOLO
EXPANSIVO ESTABILIZADO COM CAL**

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

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof.^a Dr.^a Carina Silvani

Coorientador: Prof.^a Dr.^a Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

Campina Grande – PB

Fevereiro de 2025

A994i

Azevedo, Vítor Braga de.

Influência da umidade de compactação na dosagem de solo expansivo estabilizado com cal / Vítor Braga de Azevedo. – Campina Grande, 2025.
124 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2025.

"Orientação: Profa. Dra. Carina Silvani, Profa. Dra. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça".

Referências.

1. Solo – Expansão Livre. 2. Solo – Tensão de Expansão. 3. Sucção Total. 4. Solo Tropical. 5. Solo Expansivo - Porosidade/Teor Volumétrico de Cal. 6. Estabilização de Solos. I. Silvani, Carina. II. Mendonça, Ana Maria Gonçalves Duarte. III. Título.

CDU 624.131.2/.5(043)

VÍTOR BRAGA DE AZEVEDO

**INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO NA DOSAGEM DE SOLO
EXPANSIVO ESTABILIZADO COM CAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovado em: 27 de fevereiro de 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Carina Silvani

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Orientadora

Prof.^a Dr.^a Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Coorientadora

Prof. Dr. Nilo Cesar Consoli

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Examinador Externo

Prof. Dr. Rubén Alejandro Quiñónez Samaniego

Universidad Nacional de Asunción - FIUNA

Examinador Externo



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

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

2. **ALUNO(A): VITOR BRAGA DE AZEVEDO / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.ª CARINA SILVANI - PPGECA/UFMG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR.ª ANA MARIA GONÇALVES DUARTE MENDONÇA – PPGECA/UFMG – COORIENTADORA, DR. ALEJANDRO QUIÑONEZ SAMANIEGO – UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN/FIUNA – EXAMINADOR EXTERNO, DR. NILO CESAR CONSOLI - PPEGC/UFRGS – EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 01/2025). / TITULO DA DISSERTAÇÃO: “INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO NA DOSAGEM DE SOLO EXPANSIVO ESTABILIZADO COM CAL” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 09:00 HORAS / SALA HÍBRIDA DO BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFGG, DE FORMA HÍBRIDA.**

3. **EM SESSÃO REALIZADA DE FORMA HÍBRIDA, 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, ISABELLY CRISTINNY GOMES GAUDENCIO, SECRETÁRIO(A), ALUNO(A) E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**

4. **CAMPINA GRANDE, 27 DE FEVEREIRO DE 2025.**

5.

6.

7.

8.

9.

RUBEN ALEJANDRO QUIÑONEZ SAMANIEGO
 Firmado digitalmente por RUBEN ALEJANDRO QUIÑONEZ SAMANIEGO
 Fecha: 2025.02.28 10:35:38 -03'00'

DR. ALEJANDRO QUIÑONEZ SAMANIEGO - EXAMINADOR EXTERNO



Documento assinado eletronicamente por **CARINA SILVANI, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/02/2025, às 15:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vítor Braga de Azevedo, Usuário Externo**, em 27/02/2025, às 15:46, 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 **ISABELLY CRISTINNY GOMES GAUDENCIO, ASSISTENTE EM ADMINISTRACAO**, em 27/02/2025, às 15:58, 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 27/02/2025, às 16:11, 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 28/02/2025, às 08:34, 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 **5192413** e o código CRC **515C9C66**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente à minha família, Elisângela, Jade e Wilson, por todo o suporte ao longo de minha vida acadêmica, pelo amor incondicional, por sempre acreditarem no meu potencial e por entenderem minha ausência, em especial na reta final desse mestrado. Agradeço à minha noiva Yasmin, por ser meu porto seguro, por ser uma excelente companheira, por sempre incentivar minha vida acadêmica, pela paciência e compreensão ao longo de todos esses anos.

Agradeço imensamente à minha orientadora Carina, pela confiança de aceitar a orientação lá no início desse mestrado, por toda paciência, pela constante disponibilidade, pelas incontáveis horas gastas no delineamento, execução e escrita dessa dissertação. Sou muito grato também por todo o conhecimento compartilhado ao longo deste processo. Agradeço à minha coorientadora Ana Maria pela ajuda no desenvolvimento dessa pesquisa.

Agradeço aos amigos do dia a dia de laboratório, em especial Victor, Alisson, Daniel, Melissa e Amanda, vocês fizeram essa jornada mais leve, tanto pelas ajudas com a realização de ensaios, quanto pelas conversas ao longo dos dias. Agradeço, também, aos amigos de fora do laboratório, em especial Paulo, Maycon, João Pedro, Jefferson, Bruna, Gabriel, Danilo e Lothar, pelos anos de amizade e atenção.

Agradeço à Universidade Federal de Campina Grande e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental pela estrutura de laboratórios e pelo ensino de qualidade. Agradeço aos órgãos de fomento de bolsa, inicialmente a CAPES e posteriormente a FAPESQ, que viabilizaram a realização desse mestrado.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente ajudaram na conclusão das disciplinas e da dissertação do mestrado.

RESUMO

Os solos expansivos apresentam instabilidade volumétrica em função de variações de umidade, impactando negativamente obras em seu entorno. A estabilização com cal é amplamente empregada para combater essa característica, porém, seu alto impacto ambiental associado exige um uso mais racional. Nesse contexto, a metodologia de dosagem pelo parâmetro η/L_{iv} (porosidade/teor volumétrico de cal) é relevante para modelar propriedades geotécnicas e definir com maior precisão o teor de cal necessário para estabilização. Ademais, embora estudos indiquem que a umidade inicial afeta significativamente as propriedades expansivas do solo, há uma lacuna no conhecimento sobre a aplicabilidade do parâmetro η/L_{iv} na modelagem dessas propriedades sob diferentes condições de umidade inicial. Assim, esse trabalho teve como objetivo analisar a influência da umidade inicial no comportamento de um solo expansivo estabilizado com cal. Para isso, foi estudado o solo expansivo advindo de Paulista – PE estabilizado com diferentes teores de cal hidratada (0%, 2%, 3% e 4%) e foram adotados diferentes pesos específicos seco (13,5; 14,5; 15,5 e 16,5 kN/m³) e umidades iniciais (16%, 19,5% e 23%). Foram realizados ensaios de expansão em célula edométrica (obtendo a expansão livre e tensão de expansão) e sucção total. Os ensaios mostraram que a umidade inicial afeta significativamente a expansão livre e a tensão de expansão desenvolvida pelas amostras. Além disso, com exceção das amostras com saturação inicial próximo a 100%, o parâmetro η/L_{iv} se mostrou eficaz para modelar a expansão livre e a tensão de expansão das amostras, com a formação de uma curva de dosagem para cada umidade inicial. As diferentes curvas de dosagem foram normalizadas para obtenção de uma expressão matemática única, visando generalizar a dosagem desse solo. Ademais, observou-se uma forte correlação entre as propriedades expansivas, por isso, foram estabelecidas duas relações matemáticas satisfatórias para obtenção da tensão de expansão a partir da expansão livre e vice versa. Sendo, uma a partir da regressão linear simples dos dados experimentais e outra a partir das equações de dosagem baseadas no parâmetro η/L_{iv} . Ao analisar as propriedades expansivas em função da sucção total inicial observou-se um comportamento duplo. Até 5000 kPa, o crescimento da sucção total inicial tende a reforçar a característica expansiva do solo. Após os 5000 kPa, o efeito da sucção total inicial é menos notável nas propriedades expansivas.

Palavras-chave: expansão livre; tensão de expansão; sucção total; solo tropical; porosidade/teor volumétrico de cal

ABSTRACT

Expansive soils undergo volumetric instability due to variations in water content, which can adversely affect nearby structures. Lime stabilization is a widely adopted technique to mitigate this behaviour; however, its considerable environmental impact necessitates a more efficient and sustainable application. In this context, the dosage methodology based on the parameter η/L_{iv} (porosity/volumetric lime content) plays a crucial role in modelling geotechnical properties and precisely determining the optimal lime content for stabilization. Moreover, while studies have demonstrated that initial water content significantly influences the soil's swelling behaviour, a knowledge gap persists regarding the effectiveness of η/L_{iv} parameter in modelling these properties under varying initial water content conditions. Thus, this study aimed to analyze the influence of initial water content on the behaviour of an expansive soil stabilized with lime. For this purpose, an expansive soil from Paulista, Pernambuco, Brazil was studied, stabilized with different hydrated lime contents (0%, 2%, 3%, and 4%), different dry unit weights (13.5, 14.5, 15.5, and 16.5 kN/m³) and initial water contents (16%, 19.5%, and 23%). Oedometer expansion tests (obtaining free swell and swelling pressure) and total suction tests were conducted. The results showed that the initial water content significantly affects both free swell and swelling pressure developed by the samples. Moreover, except for samples with initial saturation close to 100%, the parameter η/L_{iv} proved effective in modelling free swell and swelling pressure, generating a representative dosage curve for each initial water content. The different dosage curves were normalized to obtain a single mathematical expression, aiming to generalize the dosage methodology for this soil. Additionally, a strong correlation was observed between the swelling properties, leading to the establishment of two mathematical relationships for determining swelling pressure from free swell or the opposite. One relationship was obtained through simple linear regression of the experimental data, while the other was derived from the dosage equations based on the parameter η/L_{iv} . When analyzing the swelling properties as a function of initial total suction, a dual behaviour was observed. Up to 5000 kPa, the increase in initial total suction tends to enhance the expansive characteristics of the soil. Beyond 5000 kPa, the effect of initial total suction on swelling properties becomes less significant.

Keywords: free swell; swelling pressure; total suction; tropical soil; porosity/volumetric lime content

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura básica dos tetraedros.....	20
Figura 2: Estrutura básica dos octaedros	21
Figura 3: Arranjo estrutural das caulinitas.....	21
Figura 4: Arranjo estrutural dos argilominerais montmorilonita, illita e caulinita.....	22
Figura 5: Fenômeno de expansão do solo	23
Figura 6: Cinética de inchamento de uma bentonita (montmorilonita), obtido por ESEM (a) grão seco no momento inicial (b) grão úmido sofrendo inchamento (c) grão saturado com inchamento cessando	24
Figura 7: Processo de floculação de argilominerais devido a troca catiônica.....	29
Figura 8: Formação de géis cimentícios em misturas solo-cal.....	30
Figura 9: Ensaio do ICL para a <i>London Clay</i>	32
Figura 10: Efeito da porosidade sobre a expansão livre.....	34
Figura 11: Efeito da umidade inicial na tensão de expansão de uma das amostras.....	35
Figura 12: Efeito da umidade inicial na expansão livre de uma das argila	36
Figura 13: Efeito da umidade inicial na expansão livre de mistura caulinita/bentonita.	37
Figura 14: Tensão de expansão gerada pelo modelo em larga escala, em função do tempo	40
Figura 15: Sucção em função do tempo, durante a saturação do modelo em larga escala, para as amostras (a) B1 (b) B2	40
Figura 16: Efeito da sucção mátrica nas propriedades expansivas de um solo, sendo (a) expansão livre (b) tensão de expansão	41
Figura 17: Tensão de expansão em função do tempo, para amostras sob diferentes sucções aplicadas, sendo (a) $\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$ e (b) $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$	42
Figura 18: Aplicação do parâmetro $\eta(Liv) - 0,26$ na expansão livre.....	44
Figura 19: Aplicação do parâmetro $\eta(Liv) - 0,26$ na tensão de expansão	45
Figura 20: Normalização das resistências à compressão simples e à tração de solos estabilizados com fibra e cimento	47
Figura 21: Normalização da expansão livre de solos estabilizados com cal.....	48
Figura 22: Relação entre expansão livre e tensão de expansão para um solo expansivo estabilizado com cal e CBCA.....	50
Figura 23: Fluxograma da pesquisa.....	52
Figura 24: Solo expansivo (a) antes da preparação e (b) após destorroamento	53
Figura 25: Curva granulométrica do solo expansivo.....	54
Figura 26: Curva de compactação do solo expansivo	55
Figura 27: Resultados das análises térmicas do solo expansivo.....	56

Figura 28: Resultado do ensaio DRX para o solo expansivo	57
Figura 29: Curva do ensaio ICL para o solo expansivo.....	58
Figura 30: Processo de moldagem para ensaios de expansão (a) anel edométrico (b) colarinho (c) soquete (d) corpo de prova.....	60
Figura 31: Molde tripartido usado para moldagem das amostras de sucção, sendo (a) montado (b) desmontado	61
Figura 32 : Prensas edométricas utilizadas para realização dos ensaios de expansão unidimensional sendo (a) prensa 1 e (b) prensa 2	62
Figura 33: Execução do ensaio de adsorção de azul de metileno.....	63
Figura 34: Execução do ensaio de sucção (a) inserção da tela plástica e papel filtro (b) embalagem com plástico filme (c) disposição em caixa térmica (d) caixas térmicas utilizadas.....	64
Figura 35: Papéis filtro coletados e posicionados em cápsulas metálicas.....	65
Figura 36: CTC do solo em função da adição de cal.....	67
Figura 37: Superfície específica do solo em função da adição de cal	68
Figura 38: Expansão do solo puro ao longo do tempo, para os diferentes pesos específicos secos (a) 13,5 kN/m ³ (b) 14,5 kN/m ³ (c) 15,5 kN/m ³ (d) 16,5 kN/m ³	69
Figura 39: Expansão livre em função do peso específico seco, para o solo puro	71
Figura 40: Expansão livre em função da umidade inicial, para o solo puro.....	72
Figura 41: Carregamento do solo puro após a expansão livre, para os pesos específicos secos (a) 13,5 kN/m ³ (b) 14,5 kN/m ³ (c) 15,5 kN/m ³ (d) 16,5 kN/m ³	74
Figura 42: Tensão de expansão em função do peso específico seco, para o solo puro sendo (a) separadas por umidade inicial (b) sem separação	75
Figura 43: Expansão do solo com 2% de cal para os diferentes pesos específicos secos (a) 13,5 kN/m ³ (b) 14,5 kN/m ³ (c) 15,5 kN/m ³ (d) 16,5 kN/m ³	77
Figura 44: Expansão do solo com 3% de cal para os diferentes pesos específicos secos (a) 13,5 kN/m ³ (b) 14,5 kN/m ³ (c) 15,5 kN/m ³ (d) 16,5 kN/m ³	78
Figura 45: Expansão do solo com 4% de cal para os diferentes pesos específicos secos (a) 13,5 kN/m ³ (b) 14,5 kN/m ³ (c) 15,5 kN/m ³ (d) 16,5 kN/m ³	79
Figura 46: Expansão livre em função do peso específico seco, para as umidades iniciais (a) 16% (b) 19,5% (c) 23%.....	81
Figura 47: Expansão livre em função do teor de cal, para as umidades iniciais de (a) 16% (b) 19,5% (c) 23%	82
Figura 48: Expansão livre em função do parâmetro η/L_{iv} , para as umidades iniciais (a) 16% (b) 19,5% (c) 23%	84
Figura 49: Expansão livre em função do parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$, para as diferentes umidades iniciais	85

Figura 50: Carregamento após expansão livre do solo com 2% de cal, para os diferentes pesos específicos secos (a) 13,5 kN/m ³ (b) 14,5 kN/m ³ (c) 15,5 kN/m ³ (d) 16,5 kN/m ³	87
Figura 51: Carregamento após expansão livre do solo com 3% de cal, para os diferentes pesos específicos secos (a) 13,5 kN/m ³ (b) 14,5 kN/m ³ (c) 15,5 kN/m ³ (d) 16,5 kN/m ³	88
Figura 52: Carregamento após expansão livre do solo com 4% de cal, para os diferentes pesos específicos secos (a) 13,5 kN/m ³ (b) 14,5 kN/m ³ (c) 15,5 kN/m ³ (d) 16,5 kN/m ³	89
Figura 53: Tensão de expansão em função do peso específico seco, para as umidades iniciais (a) 16% (b) 19,5% (c) 23%	90
Figura 54: Tensão de Expansão em função do teor de cal, para as umidades iniciais de (a) 16% (b) 19,5% (c) 23%	92
Figura 55: Tensão de expansão em função do parâmetro η/L_{iv} , para as umidades iniciais (a) 16% (b) 19,5% (c) 23%	94
Figura 56: Tensão de Expansão em função do parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$, para as diferentes umidades iniciais	95
Figura 57: Relação normalizada entre a expansão livre e o parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$	97
Figura 58: Relação normalizada entre a tensão de expansão e o parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$	98
Figura 59: Relação entre as propriedades expansivas normalizadas e o parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$, com um ajuste individual para cada propriedade	98
Figura 60: Relação entre as propriedades expansivas normalizadas e o parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$, com um ajuste único para ambas propriedades	99
Figura 61: Tensão de expansão em função da expansão livre, para as o solo puro sendo (a) separadas por umidade inicial (b) sem separação	100
Figura 62: Tensão de expansão em função da expansão livre, para as o solo estabilizado com cal sendo (a) separadas por umidade inicial (b) sem separação	101
Figura 63: Sucção total inicial das amostras em função do peso específico seco, separados nos teores de cal (a) 0% (b) 2% (c) 3% (d) 4%	104
Figura 64: Sucção total inicial das amostras em função do teor de cal, separados pelas umidades iniciais (a) 16% (b) 19,5% (c) 23%	106
Figura 65: Propriedades expansivas em função da sucção total inicial para todas as amostras estudadas, sendo (a) expansão livre (b) tensão de expansão	107
Figura 66: Ajuste entre sucção total inicial e as propriedades expansivas do solo estabilizado com cal, sendo (a) expansão livre (b) tensão de expansão	108
Figura 67: Propriedades expansivas das misturas solo-cal, em função da sucção inicial, separadas pelos pesos específicos, sendo (a) expansão livre (b) tensão de expansão	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Métodos para identificação de solos expansivos	25
Tabela 2: Classificação do grau de expansão a partir dos limites de consistência	26
Tabela 3: Critérios de classificação da expansividade com base na expansão livre e tensão de expansão	27
Tabela 4: Correlações entre expansão livre e tensão de expansão	49
Tabela 5: Caracterização geotécnica do solo expansivo.....	54
Tabela 6: Resultado do ensaio FRX para o solo expansivo.....	56
Tabela 7: Variáveis e níveis adotados para o ensaio de expansão unidimensional.....	59

LISTA DE SÍMBOLOS

ε_L	Expansão livre
T_e	Tensão de expansão
H_i	Altura inicial do corpo de prova
ΔH	Variação de altura do corpo de prova
w_i	Umidade inicial
L	Teor gravimétrico de cal
L_{iv}	Teor volumétrico de cal
η	Porosidade
γ_d	Peso específico aparente seco
γ_{sS}	Peso específico real do solo
γ_{sL}	Peso específico real da cal
V_{CP}	Volume do corpo de prova
V_L	Volume de cal
m_L	Massa de cal
m_S	Massa de solo
C	Concentração molar da solução
V	Volume da solução
S	Sucção da amostra
w_p	Umidade do papel filtro
Ψ_{total}	Potencial total de água no solo
Ψ_m	Potencial matricial
Ψ_{osm}	Potencial osmótico
Ψ_{temp}	Potencial térmico
Ψ_z	Potencial de posição ou gravitacional
Ψ_{cin}	Potencial cinético
Ψ_p	Potencial de pressão de água
Ψ_{pn}	Potencial pneumático

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
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
CP	Corpo de Prova
CPTU	Ensaio de Penetração de Cone com Medição de Poropressão
C-S-H	Hidratos de Silicato de Cálcio
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DRX	Difração de Raios - X
DTA	Análise Térmica Diferencial
ESEM	Microscópio Eletrônico de Varredura Ambiental
FRX	Fluorescência de Raios - X
HRB	<i>Highway Research Board</i>
ICL	<i>Initial Consumption of Lime</i>
IP	Índice de Plasticidade
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentação
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Norma Técnica Brasileira
pH	Potencial Hidrogeniônico
R ²	Coefficiente de Determinação
SE	Superfície Específica
SPT	Sondagem Simples à Percussão
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TGA	Análise Termogravimétrica
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivo Geral	17
1.2. Objetivos Específicos	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Solos Expansivos	18
2.1.1. Argilominerais	20
2.1.2. Ensaio de expansão em solos	24
2.2. Estabilização de Solos Expansivos	27
2.2.1. Efeito da cal em solos expansivos	29
2.2.2. Efeito da porosidade em solos expansivos	33
2.2.3. Efeito da umidade em solos expansivos	34
2.2.4. Efeito da sucção em solos expansivos	38
2.3. Parâmetro η/Liv	43
2.4. Relação entre expansão livre e tensão de expansão	48
3. METODOLOGIA	52
3.1. Materiais	53
3.1.1. Solo expansivo	53
3.1.2. Cal	57
3.2. Métodos	58
3.2.1. Planejamento experimental	58
3.2.2. Preparação de amostras	59
3.2.3. Ensaio de expansão	61
3.2.4. Adsorção de Azul de Metileno	62
3.2.5. Ensaio de sucção	64
3.2.6. Parâmetro η/Liv	65
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1. Adsorção de azul de metileno	67
4.2. Ensaio de Expansão do Solo Puro	68
4.3. Ensaio de Expansão do Solo Expansivo Estabilizado com Cal	76
4.3.1. Expansão livre do solo expansivo estabilizado com cal	76
4.3.2. Tensão de expansão do solo expansivo estabilizado com cal	86
4.4. Normalização das curvas de dosagem das propriedades expansivas	96
4.5. Correlação entre expansão livre e tensão de expansão	100

4.6. Sucção total inicial e sua relação com as propriedades expansivas	103
5. CONCLUSÕES	111
5.1. Sugestões para trabalhos futuros	112
REFERÊNCIAS	113

1. INTRODUÇÃO

O crescimento acentuado de cidades e grandes centros gera uma necessidade progressiva de obras geotécnicas com desempenho adequado, como fundações, contenções, rodovias, aterros, entre outros. Porém, por limitações de espaço, logística ou econômicas se torna cada vez mais complexo fazer empréstimo de solos de alta qualidade, bem como, realizar bota-fora de solos de baixo desempenho. Então, surge uma necessidade de remediar e melhorar o solo disponível para que ele atenda as propriedades mecânicas demandadas, em especial parâmetros de resistência, durabilidade e deformabilidade.

Os solos expansivos são considerados problemáticos pois, devido a sua mineralogia, apresentam instabilidade volumétrica em função do teor de umidade (Snethen, 1979). Logo, a molhagem desse material gera um inchamento de seus argilominerais, fazendo com que haja um aumento volumétrico e surjam tensões de expansão (Yong, 1999). De forma análoga, a secagem desse solo gera a contração de seus argilominerais, resultando em recalques expressivos e trincas de retração (Chandler, Crilly e Montgomery-Smith, 1992). Ademais, em condições naturais, a instabilidade volumétrica do solo não cessa, estabelecendo sucessivos eventos de inchamento e contração ao sofrer ciclos de molhagem e secagem, expondo o solo à fadiga e à erosão. Por causa desse comportamento, os solos expansivos têm o potencial para trincar pavimentos, romper aterros e danificar elementos estruturais inseridos em sua região de influência (Barman e Dash, 2022; Tanyıldızı, Uz e Gökalp, 2023).

O principal tratamento empregado para remediação de solos expansivos é a estabilização química, por meio da adição de cal hidratada. Na presença de água, a cal hidratada serve como uma fonte de cátions Ca^{2+} , desencadeando um processo de troca catiônica com o argilomineral expansivo (montmorilonita). Assim, ocorre uma redução da distância interbasal e um aumento das forças de ligação no argilomineral, combatendo o comportamento expansivo do solo (Diamond e Kinter, 1965; Mitchell e Soga, 2005; Tanyıldızı, Uz e Gökalp, 2023).

Visando atender os objetivos da Agenda 2030, o emprego na cal em obras civis vem sendo reavaliado, devido ao alto impacto ambiental do processo extrativista do calcário, o alto consumo energético e a alta liberação de CO_2 ao transformar o calcário (CaCO_3) em cal virgem (CaO) (Saldanha *et al.*, 2021). Por essa razão, juntamente com os

custos de aquisição da cal hidratada, existe uma demanda de validar metodologias de dosagem da cal visando remediar solos expansivos.

O processo de dosagem não é trivial, pois, sofre influência de características físico-químicas do solo, porosidade, umidade de compactação e tipo de aditivo. Consoli et al. (2009) propuseram a utilização do parâmetro porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv}) como forma de dosar a resistência de um solo argiloso estabilizado com cal. Posteriormente, Silvani et al. (2020) ampliaram a aplicação do parâmetro η/L_{iv} , para controle da expansão livre de um solo argiloso estabilizado com cal. Recentemente, Guimaraes (2023) conseguiu utilizar o parâmetro η/L_{iv} na dosagem da tensão de expansão de um solo estabilizado com cinza do bagaço da cana-de-açúcar e cal, considerando variações no teor de cal e peso específico.

Nesse contexto, a umidade inicial do solo expansivo é uma variável fundamental para entender seu comportamento, pois, afeta a quantidade de argilominerais já hidratados previamente. Logo, quanto maior a umidade inicial, menos expressivas tendem a ser suas propriedades expansivas (Fattah, Salim e Irshayyid, 2021). Assim, observou-se uma escassez de informações acerca da aplicabilidade do coeficiente η/L_{iv} para dosar a expansão livre e a tensão de expansão de um solo estabilizado com cal, considerando diferentes umidades iniciais. Ademais, a sucção é uma propriedade intimamente relacionada com a umidade, que também afeta o comportamento dos solos expansivos (Al-Mahbashi, Al-Shamrani e Moghal, 2020; Fattah, Salim e Irshayyid, 2017). Porém, sua influência nas propriedades expansivas do solo ainda não é compreendida.

Diante do exposto, este estudo propõe-se a analisar a influência da umidade inicial no comportamento de solo expansivo estabilizado com cal.

1.1. Objetivo Geral

Analisar a influência da umidade inicial no comportamento de solo expansivo estabilizado com cal.

1.2. Objetivos Específicos

- Constatar a influência que a umidade inicial exerce sobre a expansão livre e a tensão de expansão do solo e da mistura solo-cal;
- Avaliar a aplicação do parâmetro η/L_{iv} na previsão do comportamento expansivo de misturas solo-cal com diferentes umidades iniciais;
- Propor equações matemáticas para determinação da tensão de expansão a partir da expansão livre, para solo estabilizado com cal compactado em diferentes umidades iniciais;
- Investigar o efeito da sucção total inicial na expansão livre e tensão de expansão do solo e da misturas solo-cal.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção explana acerca dos assuntos centrais da pesquisa: solos expansivos, estabilização de solos, parâmetro η/L_{iv} e relação entre expansão livre e tensão de expansão. A primeira parte apresenta uma caracterização dos solos expansivos, com seus mecanismos de expansão e ensaios de caracterização e reconhecimento. A segunda parte contempla as técnicas de melhoramento de solo, com foco em teorias e metodologias para conter expansão em solos. A terceira parte é feita uma revisão acerca do parâmetro η/L_{iv} e suas aplicações. A quarta parte traz uma revisão sobre formas de se correlacionar expansão livre e tensão de expansão.

2.1. Solos Expansivos

A característica principal de solos expansivos é a instabilidade volumétrica em função do teor de umidade, causada por seus argilominerais constituintes. Essa característica pode ser observada a partir do fenômeno de inchamento de seus grãos, ao sofrerem aumento no teor de umidade, seja por chuvas, levantamento de lençol freático ou atividade humana. Consequentemente, a redução da umidade do solo gera uma contração no volume de seus grãos, podendo ser causado por períodos de estiagem, rebaixamento de lençol freático ou obras de drenagem (Barman e Dash, 2022; Ferreira, 1995). Como agravante, essa instabilidade volumétrica não cessa naturalmente, sendo assim, o solo está sujeito a sucessivos ciclos de molhagem e secagem, expondo o material a fadiga e erosão.

De forma geral, o aumento de volume dos argilominerais, na microestrutura, gera uma reorganização em nível macroestrutural, desencadeando o fenômeno de expansão na camada de solo (Monroy, Zdravkovic e Ridley, 2015). Portanto, o potencial de expansão do solo depende diretamente da composição de seus argilominerais. Os argilominerais montmorilonita e vermiculita se destacam pela sua maior instabilidade volumétrica (Ferreira, 1995; Ferreira *et al.*, 2017).

Caso a deformação volumétrica de expansão seja impedida por um elemento rígido, ocorre o surgimento da tensão de expansão, que será de magnitude tão grande quanto o potencial de expansão do solo (Gawriuczenkow e Wójcik, 2018). Em situações práticas, essa tensão pode ser observada em estruturas apoiadas sobre solos expansivos, que ao sofrerem hidratação, vão tender a levantar a estrutura, com o aparecimento de uma tensão ascendente. Por essa razão, estruturas leves são sensivelmente mais vulneráveis a

solos expansivos, visto que, em geral, não possuem carga na fundação suficiente para combater a tensão de expansão (Carvalho *et al.*, 2023; Ikeagwuani e Nwonu, 2019).

Três estágios são atribuídos ao processo de expansão, sendo divididos em expansão inicial, primária e secundária. A expansão inicial é caracterizada por uma expansão em baixa velocidade, que ocorre no primeiro contato do solo com a água, sendo esse comportamento atribuído à baixa permeabilidade não saturada do solo. Então, com o estabelecimento da mobilidade da água no solo, as fortes forças de adsorção de água nas superfícies dos argilominerais geram um umedecimento rápido das partículas, resultando em uma alta taxa de expansão primária. Após isso, entra-se na fase secundária, em que, ocorre uma redução gradual na taxa de expansão e sua eventual estabilização, sendo atribuída ao aumento da saturação da amostra devido à migração da água (Fattah, Salim e Irshayyid, 2017).

Solos podem desenvolver um processo de expansão e não serem classificados como solos expansivos, pois, qualquer estrutura interna que se encontre carregada, ao se retirar o carregamento, poderá ocorrer um aumento de seu volume, pelo alívio de tensões (Barbosa, 2013). Neste caso, o solo não apresenta instabilidade volumétrica em função da umidade, logo, não são alvo desta pesquisa.

Solos expansivos são encontrados ao longo de todo o mundo, a exemplo da Angola, Etiópia, África do Sul, Canadá, Argentina, Peru, Austrália, China, Espanha, Israel, entre outros países (Ferreira, 1995). No Brasil, Ferreira *et al.*, (2012) relatam que solos expansivos são mais comumente encontrados no Centro Sul (Paraná, São Paulo e Santa Catarina) e no Nordeste (Bahia, Pernambuco e Ceará) do país. Na Paraíba, a literatura relata a ocorrência de solos expansivos nos municípios de Sousa e Marí, além do município de Boa Vista, que é responsável por expressiva produção de bentonita (argila predominantemente composta por montmorilonita) em nível nacional (Amorim *et al.*, 2006; Mélo, 2011; Ribeiro, 2019).

Em regiões áridas e semiáridas as mudanças sazonais de umidade são extremas, durante épocas de estiagem e verão, os solos subsuperficiais são submetidos à ressecamento, bem como, solos superficiais sofrem ressecamento extremo. Esses períodos de seca são interrompidos por curtos períodos de chuvas intensas, resultando no umedecimento do solo. Assim, solos expansivos inseridos nesse contexto tendem a ser

ainda mais problemáticos, devido a atingir extremos de umidade (Al-Mahbashi e Dafalla, 2023; Snethen, 1979).

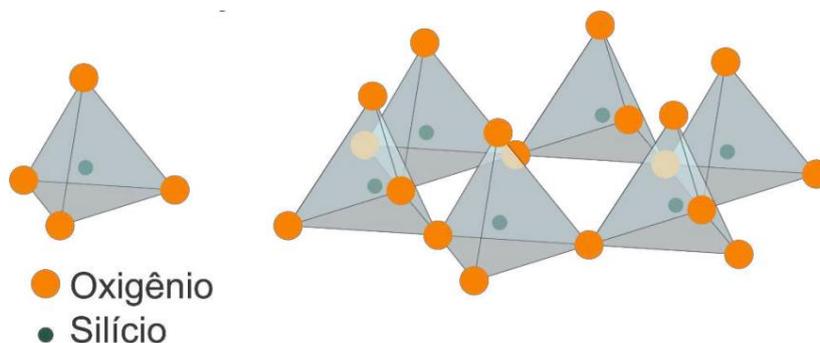
Em obras de engenharia, a instabilidade volumétrica dos solos expansivos pode desencadear sérios danos, em especial, quando não são analisados corretamente em fase de projeto e execução (Oliveira Júnior *et al.*, 2019). Entre os problemas causados por solos expansivos, pode-se destacar: quebra de tubulações, adutoras e canais, recalque acentuado ou levantamento de fundações superficiais, deformações ou ruptura de aterros e base de pavimentos, fadiga precoce de pavimentos, distorção de estruturas e linhas ferroviárias (Barman e Dash, 2022; Silvani, Silva e Guedes, 2023; Steinberg, 1998).

Em virtude de sua instabilidade volumétrica, os solos expansivos apresentam mudanças em suas propriedades, a depender do grau de saturação que se encontram. Podendo ocorrer aumento da deformabilidade e redução de resistência ao cisalhamento, rigidez e durabilidade causados pela mudança de estrutura ao sofrer inchamento. Além disso, existe uma tendência de redução da permeabilidade, visto que os grãos ao incharem tendem a fechar os macroporos presentes na estrutura (Carvalho *et al.*, 2023; Fattah, Salim e Irshayid, 2017; Liu *et al.*, 2024; Mitchell e Soga, 2005; Silva, 1975).

2.1.1. Argilominerais

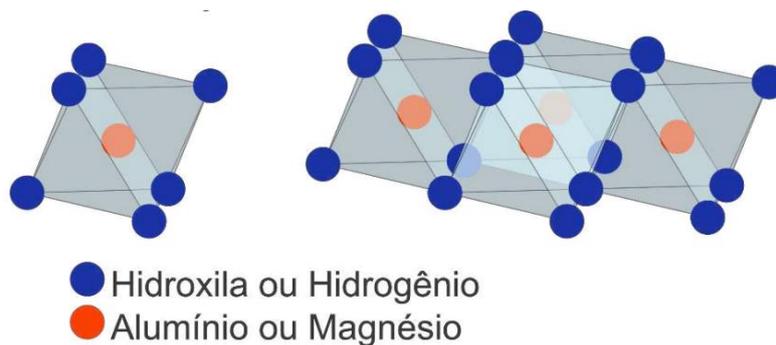
A composição dos argilominerais é o principal responsável pelo comportamento expansivo dos solos, estes são formados por duas estruturas básicas: tetraedros e octaedros. Os tetraedros são compreendidos por um átomo de silício ligado a quatro átomos de oxigênio (Figura 1) e os octaedros são compostos por um átomo de alumínio circundado por oxigênios ou hidroxilas (Figura 2). Para a formação dos argilominerais, os octaedros e os tetraedros se ligam por meio dos átomos de oxigênio, formando uma folha (Mitchell e Soga, 2005).

Figura 1: Estrutura básica dos tetraedros



Fonte: Adaptado de Mitchel e Soga (2005)

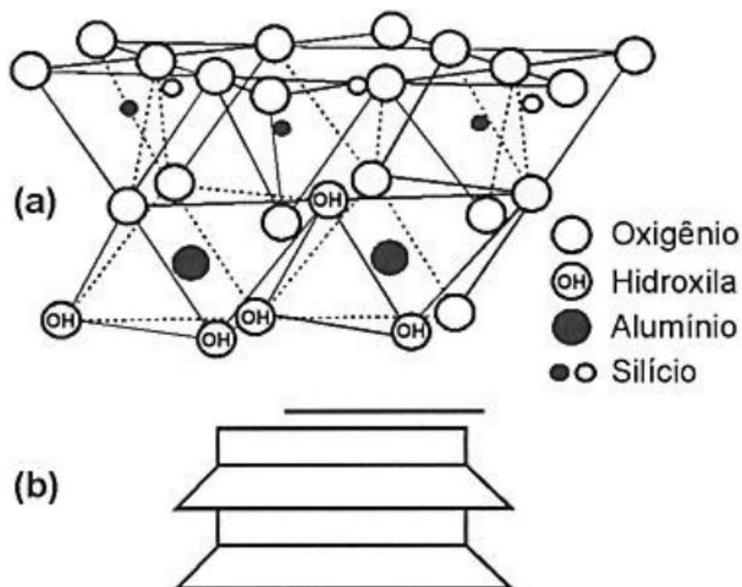
Figura 2: Estrutura básica dos octaedros



Fonte: Adaptado de Mitchel e Soga (2005)

Diferentes organizações dessas estruturas básicas entre si, formam os diversos grupos de argilominerais conhecidos. O arranjo estrutural 1:1 compreende o grupo das caulinitas. Estes possuem sua camada composta por uma folha tetraédrica e uma folha octaédrica. Então, múltiplas camadas são fortemente ligadas entre si, por pontes de hidrogênio entre o átomo de oxigênio dos tetraedros e a hidroxilas dos octaedros. Por esse motivo, as caulinitas possuem pouca distância interbasal, pouco deslocamento relativo das camadas e estrutura eletricamente neutra. Logo, as caulinitas são argilominerais volumetricamente estáveis na presença de água (Mitchell e Soga, 2005; Silva, 2022). A Figura 3 ilustra a estrutura da caulinita, (a) tem-se a representação atômica e (b) tem-se a representação simbólica.

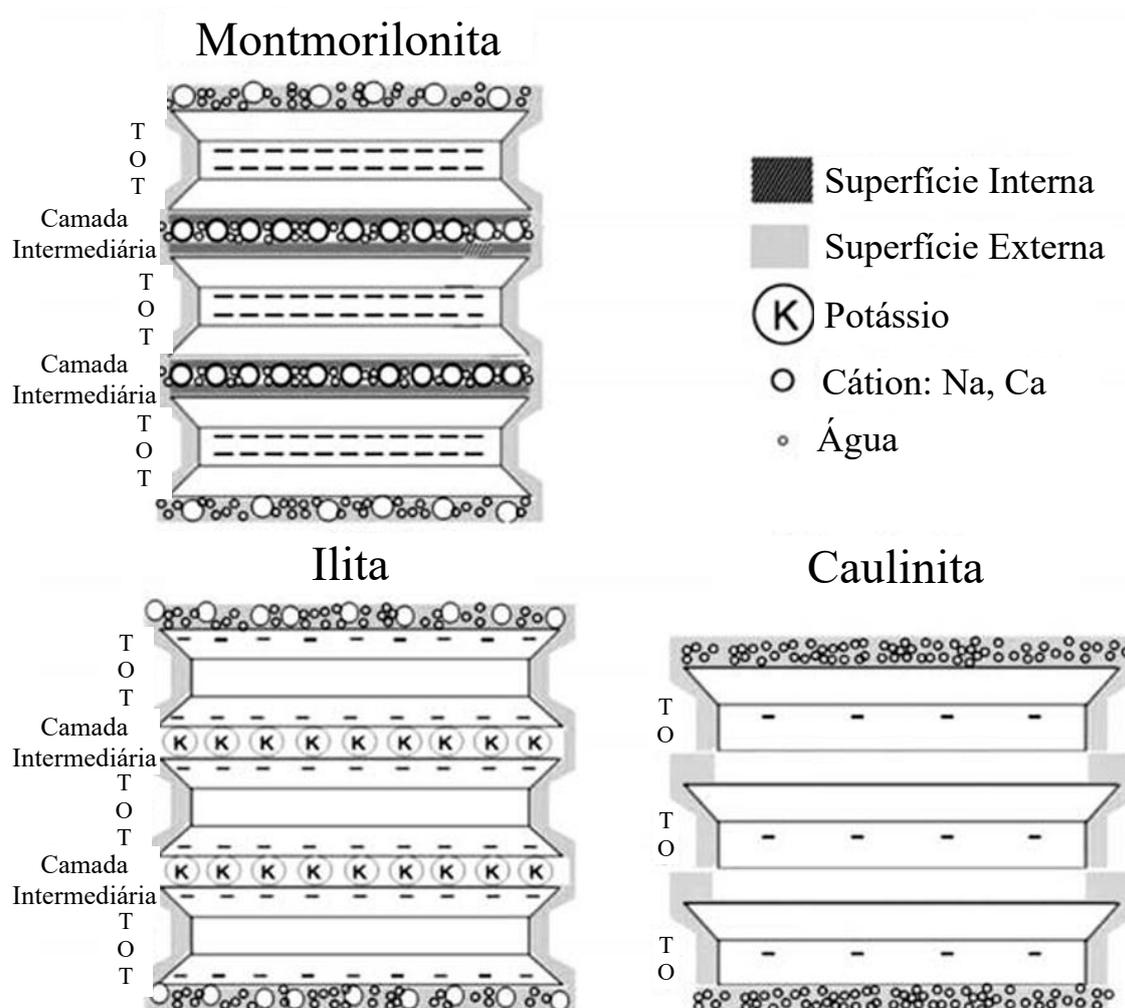
Figura 3: Arranjo estrutural das caulinitas



Fonte: Mitchael e Soga (2005)

O arranjo 2:1 compreende os grupos das esmectitas, micas, vermiculitas e cloritas. Esse grupo é composto por uma folha octaédrica entre duas folhas tetraédricas. A depender da força de ligação entre camadas, o argilomineral pode ser expansivo (Hower e Mowatt, 1966). No caso das Ilitas, as ligações entre camadas se dão por um íon de potássio que, geralmente, é suficientemente forte para impedir a entrada de água na estrutura, garantindo um comportamento estável. No caso das esmectitas e vermiculitas, as forças de Van der Waals e dos cátions adsorvidos que fazem a ligação entre camadas, não são suficientes para impedir a entrada de água na estrutura, resultando em propriedades expansivas (Carvalho *et al.*, 2023; Mitchell e Soga, 2005). Na Figura 4 pode-se ver a representação simbólica dos argilominerais: montmorilonita (esmectita) permitindo a entrada de água; ilita e caulinita não permitindo essa entrada, garantindo a estabilidade.

Figura 4: Arranjo estrutural dos argilominerais montmorilonita, ilita e caulinita

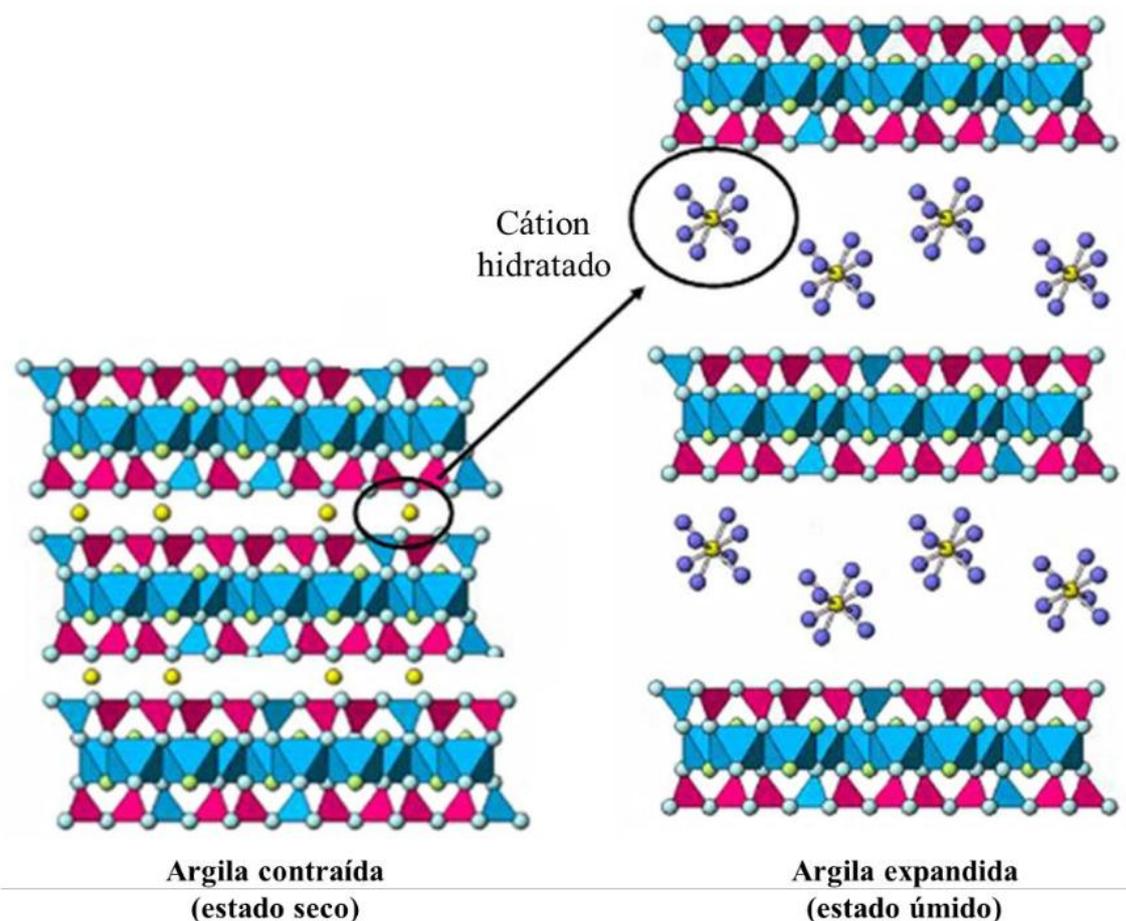


Fonte: Adaptado de Sánchez et al., (2008)

O grupo das esmectitas se destacam por desenvolverem as maiores expansões e contrações com variações de umidade, em especial o argilomineral montmorilonita. As esmectitas apresentam elevada área de superfície específica, elevada plasticidade, alta capacidade de troca catiônica, aumentam a retenção de água e reduzem a permeabilidade do solo em que estão inseridas (Pusch e Yong, 2006; Srikanth e Mishra, 2016).

Sobre o processo de expansão das esmectitas, as camadas do argilomineral apresentam superfície com carregamento negativo, atraindo cátions e água para ocorrer a estabilização elétrica. Devido à característica polar da água, ela assume uma orientação uniforme e gera uma repulsão com a água adsorvida na camada adjacente, fenômeno chamado de *diffuse double layer* (camada dupla difusa). Então, a baixa força de ligação juntamente com o surgimento dessa força de repulsão entre camadas, faz com que a distância interbasal aumente e o grão de argila sofra inchamento (Ikeagwuani e Nwonu, 2019). A Figura 5 ilustra a formação da dupla camada de água nas esmectitas.

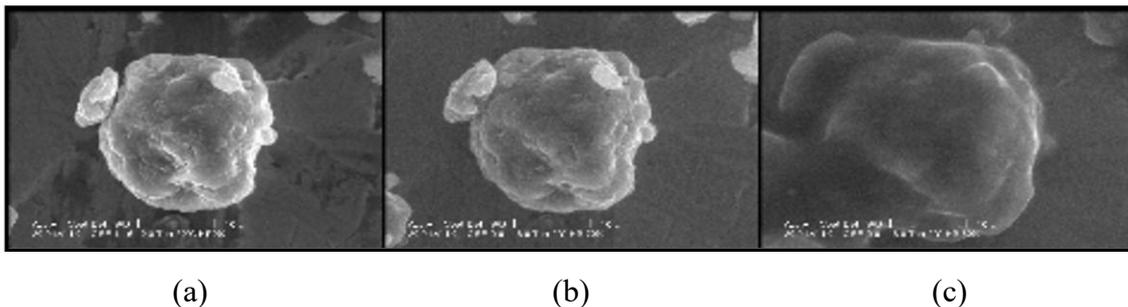
Figura 5: Fenômeno de expansão do solo



Fonte: adaptado de Tanyıldızı, Uz e Gökalp, (2023)

Montes et al. (2003) realizaram ensaio de imagem em uma bentonita (montmorilonita) com um microscópio eletrônico de varredura ambiental (ESEM), que permite observação de amostras úmidas ou enxarcadas. A Figura 6 mostra as imagens da cinética de inchamento da bentonita, desde o momento inicial com o grão seco e contraído, até o momento de saturação com o processo de inchamento em estabilização.

Figura 6: Cinética de inchamento de uma bentonita (montmorilonita), obtido por ESEM (a) grão seco no momento inicial (b) grão úmido sofrendo inchamento (c) grão saturado com inchamento cessando



Fonte: Montes et al. (2003)

Quanto a sua formação, as esmectitas podem ser consequência do intemperismo de rochas sedimentares argilosas ou calcárias, transformação de minerais primários e secundários ou neofornadas por soluções de silício, alumínio, magnésio e ferro (Carvalho *et al.*, 2023; Ferreira, 1995).

2.1.2. Ensaio de expansão em solos

Identificar solos expansivos não é uma atividade trivial, e os ensaios de campo mais executados (SPT e CPTU) não são suficientes para identificá-los na prática (Tenório, 2019). Algumas análises e ensaios podem ser feitos para tentar constatar o potencial de expansão dos solos, sendo geralmente divididos em dois tipos, métodos diretos e indiretos (Silva, 1975). Os métodos indiretos são categorizados em indicativos, qualitativos e orientativos. Eles são embasados em relações feitas, para o potencial de expansão, a partir dos limites de consistência, índices físicos, granulometria, observações visuais e de formação. Por isso, não trazem informações com alto grau de precisão e, geralmente, não são satisfatórios ou confiáveis (Carvalho *et al.*, 2023). A aplicação desses métodos serve apenas para análises preliminares e indicativos iniciais, se fazendo necessária a aplicação de métodos diretos para guiar e validar a tomada de decisão. Conforme observado na Tabela 2, diferentes estudos estabeleceram seus próprios valores de referência, trazendo pouca confiança neste tipo de correlação.

Tabela 1 dispõe um apanhado de metodologias para essa identificação.

Os métodos indiretos são categorizados em indicativos, qualitativos e orientativos. Eles são embasados em relações feitas, para o potencial de expansão, a partir dos limites de consistência, índices físicos, granulometria, observações visuais e de formação. Por isso, não trazem informações com alto grau de precisão e, geralmente, não são satisfatórios ou confiáveis (Carvalho *et al.*, 2023). A aplicação desses métodos serve apenas para análises preliminares e indicativos iniciais, se fazendo necessária a aplicação de métodos diretos para guiar e validar a tomada de decisão. Conforme observado na Tabela 2, diferentes estudos estabeleceram seus próprios valores de referência, trazendo pouca confiança neste tipo de correlação.

Tabela 1: Métodos para identificação de solos expansivos

MÉTODOS	SUB-DIVISÃO	BASE PARA DEFINIÇÃO DO CRITÉRIO	REFERÊNCIAS
INDIRETOS	Identificativos	Difração e raio - X	CARCERO <i>et al.</i> (1986)
		Microscopia eletrônica de varredura	
		Análise termodiferencial	
		Adsorção de etileno-glicol	
		Físico-químicos	FINK <i>et al.</i> (1971)
	Qualitativos	Granulometria, Consistência e índices Físicos e Classificação geotécnica	PRINKLONSIJ (1952); SKEMPOM (1953); SEED <i>et al.</i> (1962); VAN DER MERWE (1964); CHEN (1965); VIJAYVERVIYA, GHAZZALY (1973); RODRIGUEZ ORTIZ (1975); CUELLAR (1978)
Orientativos	Geologia, Geomorfologia, Pedologia e identificação visual	PATRICK, SNETHEN (1976); CARCEDO <i>et al.</i> (1986); FERREIRA (1990 e 1993)	
	Avaliativos	Ensaio de expansão de Lambe	LAMBE (1960)
DIRETOS	Quantitativos	Expansão livre e Tensão de expansão, Ensaio edométrico duplos e simples	SEED <i>et al.</i> (1962); CHEN (1965); VIJAYVERVIYA, GHAZZALY (1973); RODRIGUEZ ORTIZ (1975); CUELLAR (1978); JIMENEZ SALAS (1980)
		Ensaio edométrico de sucção controlada	ESCARIO (1967 e 1969); AITCHISON <i>et al.</i> (1973); JOHNSON (1978); McKEEN (1980)

Fonte: Ferreira (1995)

Tabela 2: Classificação do grau de expansão a partir dos limites de consistência

Grau de Expansão	Chen (1965)	Seed <i>et al.</i> (1962)	Daksanamurthy, Raman (1973)
Muito Alto	LL > 60	IP > 35	LL > 70
Alto	40 < LL ≤ 60	20 < IP ≤ 35	50 < LL ≤ 70
Médio	30 ≤ LL ≤ 40	10 ≤ IP ≤ 20	35 ≤ LL ≤ 50
Baixo	LL < 30	IP < 10	20 ≤ LL ≤ 35

Fonte: Carvalho et al., (2023)

Os métodos diretos se baseiam na medição da expansão real induzida à amostra de solo com variação da umidade (Carvalho *et al.*, 2023). Comumente se utiliza ensaios tipo edométrico, buscando sempre representar as condições de campo ou de estudo (Barbosa, 2013). Em geral, os métodos diretos buscam quantificar parâmetros como: expansão livre ou tensão de expansão.

Segundo a ASTM D4546 (2021), a expansão livre é tida como a deformação vertical que uma amostra confinada em um anel rígido sofre ao ser inundada, enquanto submetida a uma carga axial de assentamento. Portanto, a expansão livre pode ser calculada pela Equação 1.

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta H}{H_i} * 100 \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

ε_l : Expansão livre

ΔH : Variação de altura do corpo de prova

H_i : Altura inicial do corpo de prova

Por sua vez, a tensão de expansão é definida como a pressão gerada pelo solo, quando sofre um processo de expansão por umidificação, em condição confinada (Ferreira, 1995). Logo, é calculada a partir da mínima tensão axial que inibe a expansão vertical do solo confinado lateralmente. A determinação desse parâmetro é complexa, segundo a norma D4546 (ASTM, 2021) método A, para se obter esse parâmetro, realiza-se ensaios de expansão unidimensional, em prensa edométrica, com diferentes carregamentos axiais. A partir disso, plota-se a curva de tensão vertical x deformação de expansão e interpola-se a tensão que gera 0% de deformação. Essa metodologia também é conhecida na literatura como expansão e colapso sob tensão (Ferreira *et al.*, 2017; Paiva *et al.*, 2016).

A literatura reporta outras duas principais formas de mensurar a tensão de expansão de solos. A metodologia do carregamento após expansão, segue as indicações

da norma D4546 (ASTM, 2021) método C. A amostra é primeiramente inundada e deixada expandir livremente na prensa edométrica, sob aplicação de uma carga de assentamento. Após sua estabilização, inicia-se a aplicação de carga axial, até que o CP retorne ao seu estado inicial. A tensão necessária para isso é numericamente igual a tensão de expansão do solo.

A terceira forma de obter a tensão de expansão é chamada de volume constante. Consiste em inundar a amostra na prensa edométrica e fazer pequenos incrementos de carga axial, conforme a amostra for expandindo verticalmente. O objetivo é manter a altura próxima do valor inicial, durante todo o ensaio, até que a expansão tenha estabilizado. A tensão aplicada no momento de finalização do ensaio é a tensão de expansão da amostra (Du *et al.*, 2021; Ferreira *et al.*, 2017; Keskin *et al.*, 2023).

Estudos utilizam dados experimentais de expansão livre e tensão de expansão como forma de classificar a expansividade do solo. Carvalho *et al.* (2015) apresenta a Tabela 3 que faz um resumo com valores que podem ser usados como referência.

Tabela 3: Critérios de classificação da expansividade com base na expansão livre e tensão de expansão

Critério de Seed <i>et al.</i> (1962)	Critério de Vijayvergiya & Ghazzaly (1973)		Grau de Expansividade
Expansão livre (%)	Expansão livre (%)	Tensão de expansão (kPa)	
0 a 1	< 1	< 30	Baixa
1 a 5	1 a 4	30 a 120	Média
5 a 25	4 a 10	120 a 300	Alta
> 25	> 10	> 300	Muito Alta

Fonte: Carvalho *et al.* (2015)

2.2. Estabilização de Solos Expansivos

A estabilização de solos é definida por técnicas que melhoram as propriedades geomecânicas do solo (resistência, permeabilidade ou deformação) a fim de torná-lo estável e útil para a demanda de uso (Consoli, Morales e Saldanha, 2021). Ademais, a técnica a ser utilizada é definida com base nas características físicas e químicas do solo, bem como, das cargas e deformações impostas pelo empreendimento. De modo geral, as técnicas de estabilização se subdividem em três categorias: físicas, mecânicas e químicas.

A estabilização física visa melhorar as propriedades do solo a partir da alteração de sua composição ou textura. Essa técnica é caracterizada pelo incremento de um ou mais materiais inertes no solo a ser melhorado, comumente se utiliza fibras ou outro solo para alterar a curva granulométrica. O objetivo é que o solo composto final possua as características necessárias do ponto de vista técnico (Ikeagwuani e Nwonu, 2019; Silveira, Calheiros e Casagrande, 2018; Tanyıldızı, Uz e Gökalp, 2023; Tiwari, Satyam e Puppala, 2021).

A estabilização mecânica consiste em melhorar as propriedades do solo a partir da redução do seu índice de vazios. Em geral, se utiliza equipamentos mecânicos, aplicação de carregamentos, impactos ou vibrações para densificar o solo, assim, a composição do solo não é alterada, apenas sua estrutura. Os equipamentos mais utilizados são rolos compactadores, placas vibratórias e compactadores à percussão (Ikeagwuani e Nwonu, 2019; Kodikara, Islam e Sountharajah, 2018). Estudos anteriores mostraram que a compactação não é adequada para melhoramento de solos expansivos, pois, irá aproximar os argilominerais e reduzir o espaço interno para rearranjo das partículas, levando a expansões mais expressivas (Consoli, Araújo, *et al.*, 2020; Silvani, Silva e Guedes, 2023).

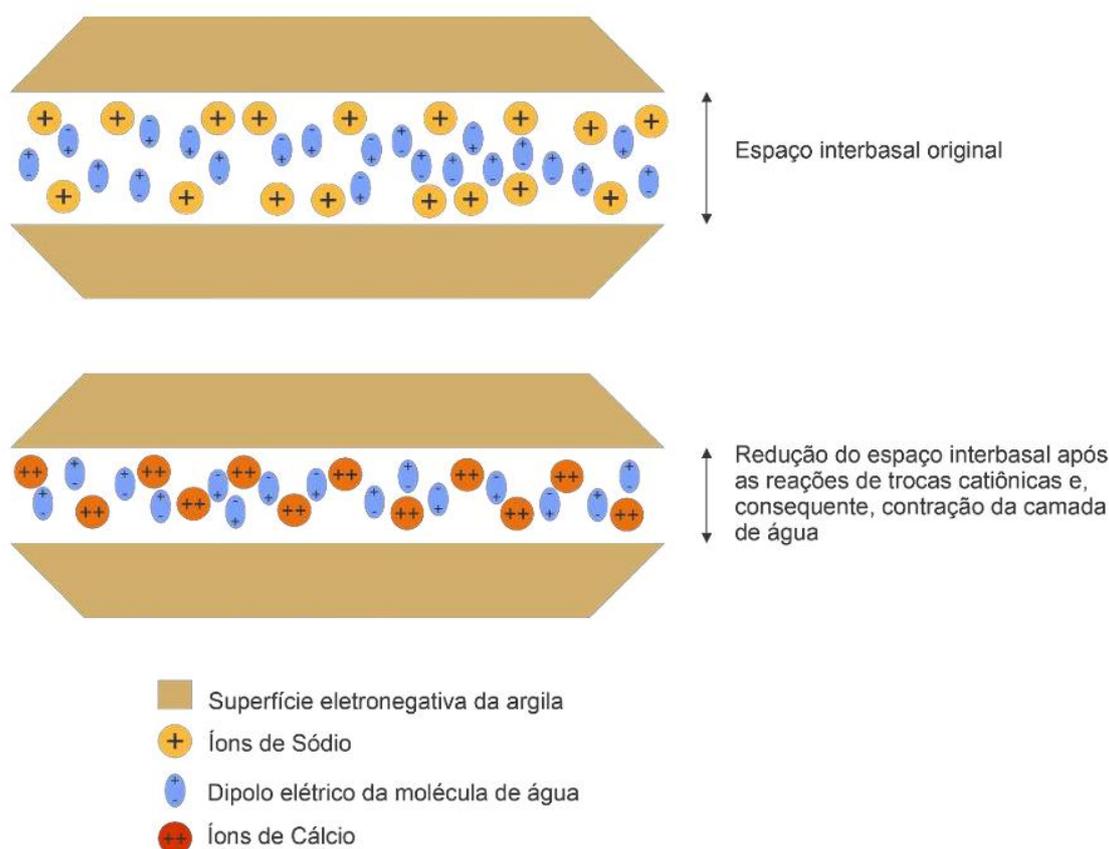
A estabilização química visa melhorar as propriedades do solo a partir do incremento de aditivos que reagem com o solo e fazem alterações permanentes de suas propriedades, como granulométrica, mineralogia e composição química. Ademais, pode-se utilizar agentes químicos para gerar uma cimentação artificial entre as partículas, trazendo uma melhora significativa de resistência, rigidez e deformabilidade (Barman e Dash, 2022; Consoli *et al.*, 2019; Quiñónez Samaniego *et al.*, 2021; Tanyıldızı, Uz e Gökalp, 2023).

Os aditivos mais clássicos são a cal e o cimento, porém, estudos recentes avaliam e propõem outras opções como: hidróxido de sódio, cinzas de queima de biomassa, microrganismos, resíduos industriais e de outras atividades humanas (Consoli *et al.*, 2021; Gowthaman, Nakashima e Kawasaki, 2022; Silvani *et al.*, 2022; Tanyıldızı, Uz e Gökalp, 2023; Tiwari, Satyam e Puppala, 2021). As misturas solo-cal e solo-cimento podem ser empregadas em diversas obras de engenharia, como exemplos: base de pavimento, fundação superficial sobre solo mole, reforço em aterros, proteção e estabilização de taludes, controle de solo expansivo e combate à liquefação de areias (Consoli *et al.*, 2019; Consoli, Vendruscolo e Prietto, 2003; Silvani *et al.*, 2020; Thomé *et al.*, 2005).

2.2.1. Efeito da cal em solos expansivos

A adição de cal no solo desencadeia uma série de reações que podem ser divididas em dois momentos. No momento inicial (algumas horas), há uma grande disponibilidade de íons de cálcio (Ca^{2+}) e hidroxilas (OH^-) no solo. Os íons de Ca^{2+} desencadeiam a troca catiônica com os cátions presentes nos grãos de solo, ocasionando a floculação dos argilominerais, como ilustrado na Figura 7. Assim, é provocada uma diminuição das forças de repulsão entre camadas do argilomineral e são reduzidas as superfícies disponíveis para interação com a água. Como resultado ocorre a melhora na trabalhabilidade, redução do potencial de expansão e aumento pouco expressivo na resistência do solo (Consoli *et al.*, 2019; Dang, Khabbaz e Ni, 2021; Herzog e Mitchell, 1963; Hilt e Davidson, 1960).

Figura 7: Processo de floculação de argilominerais devido a troca catiônica

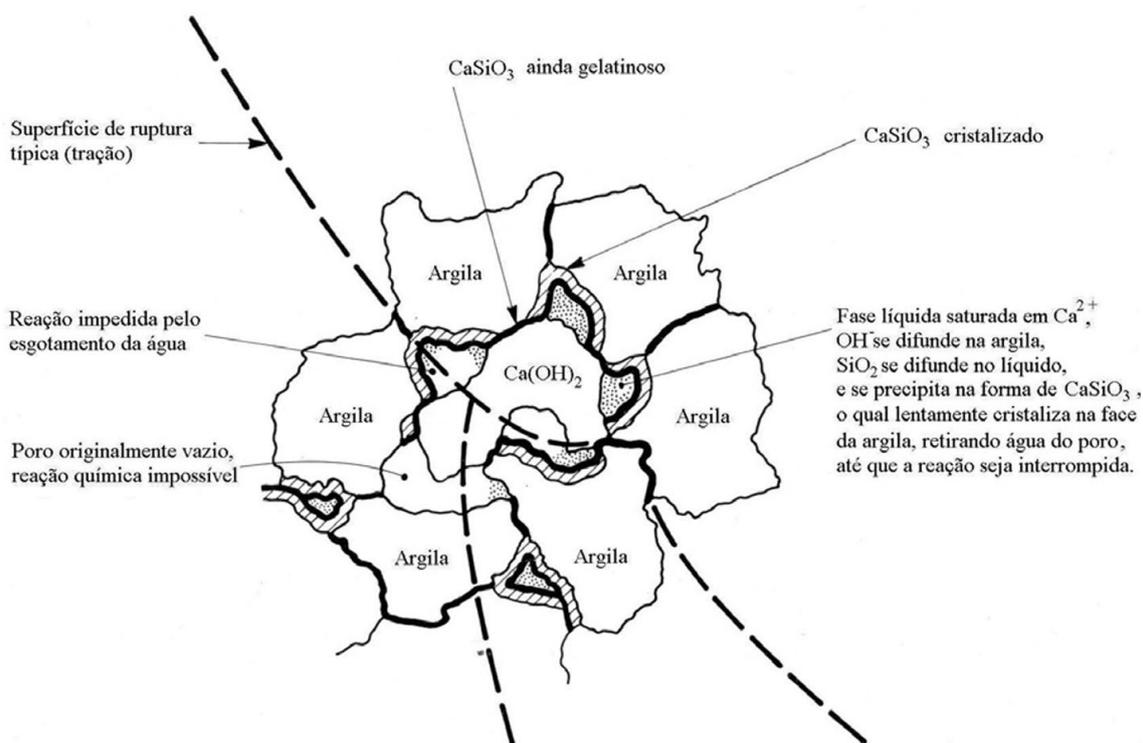


Fonte: Souza Júnior, (2021)

As hidroxilas liberadas pela cal hidratada elevam o pH do solo, dando início a dissolução da sílica e alumina constituinte dos argilominerais. Com o passar de semanas ou meses, ocorre o desenvolvimento de reações pozolânicas entre os íons Ca^{2+} e sílica e

alumina dissolvida. Conforme ilustrado na Figura 8, essa reação irá formar géis 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). Nesse momento, ocorrem os ganhos mais expressivo de resistência, rigidez e durabilidade, em virtude do endurecimento do gel cimentante envolvendo e unindo partículas de solo (Mitchell e Soga, 2005; Quiñónez Samaniego, 2015).

Figura 8: Formação de géis cimentícios em misturas solo-cal



Fonte: Adaptado de Ingles e Metcalf (1972)

Adicionalmente, ao longo das semanas e meses, ocorre uma reação paralela, entre a cal e o gás carbônico do ar atmosférico, chamada de carbonatação. Resultando na formação de Carbonato de Cálcio (CaCO₃), composto com cimentação fraca e pouco durável. Além disso, a carbonatação reduz a quantidade de cal disponível para reações pozolânicas reduzindo o ganho de resistência à longo prazo. Ademais, o armazenamento adequado da cal é fundamental para uma estabilização eficiente, visto que, carbonatação em excesso, antes da aplicação no solo, irá reduzir sua reatividade e reduzir seu potencial de floculação do solo (Barman e Dash, 2022).

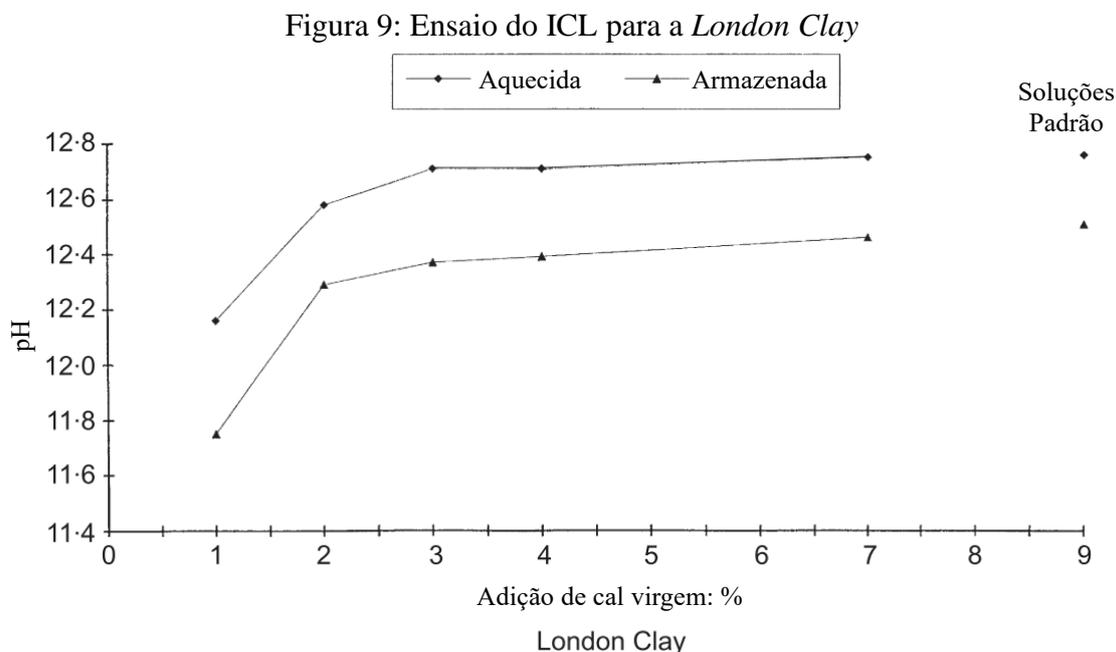
A escolha da estabilização com cal depende diretamente do tipo de solo, pois, como apresentado anteriormente, a formação dos géis cimentantes depende diretamente da presença de sílica, alumino silicatos e ferro silicatos, que se encontram mais abundantemente em solos argilosos (Quiñónez Samaniego, 2015). Para o bom desempenho em solos arenosos, deve-se adicionar uma fonte de pozolana em estado amorfo, para a cal conseguir desencadear as reações pozolânicas. Estudos apontam algumas boas fontes de sílica amorfa, como: cinza do bagaço da cana-de-açúcar, cinza volante, cinza da espiga do milho e cinza da casca do arroz (Aksoylan, Binici e Ortlek, 2016; Chen *et al.*, 2021; Cordeiro e Kurtis, 2017; Silvani *et al.*, 2022).

Estudos mostram que pequenas adições de cal irão desencadear apenas o primeiro estágio da estabilização (floculação) (Al-Mukhtar, Lasledj e Alcover, 2010; Landlin e Bhuvaneshwari, 2023; Rogers, Glendinning e Roff, 1997; Schanz e Elsayy, 2015). As pequenas adições de cal serão quase que inteiramente consumidas no processo de troca catiônica com os argilominerais, não ficando quantidade significativa de cal para desenvolvimento de cimentação (reações pozolânicas). A floculação do solo gera uma estrutura com maior resistência à energia de compactação, bem como, os grãos passam a ocupar mais os vazios internos, por essas razões, a floculação tende a reduzir o peso específico seco máximo do solo. Ademais a adição de cal tende a aumentar a demanda por água, devido sua necessidade de dissolução, por essa razão, a umidade ótima do solo tende a aumentar (Bell, 1996; Sadeghian, Maleki e Kazempour, 2024; Sivapullaiah, Prashanth e Sridharan, 1998).

A determinação do teor mínimo de cal necessário para desencadear a completa floculação do solo foi alvo de diversos estudos. Inicialmente, foi proposta por Eades e Grim, (1966), a metodologia do ponto de fixação de cal, que consiste em determinar o teor de cal necessário para gerar uma solução saturada de cal, nos vazios da argila, satisfazendo completamente a troca catiônica com os argilominerais. Assim, o método determinou que a saturação de cal ocorre ao solo atingir um pH de 12,4.

O ponto de fixação de cal é uma metodologia com algumas limitações, como: existe uma divergência significativa entre resultados de diferentes métodos de determinação do pH; o tempo de armazenamento da cal pode levar a sua hidratação ou carbonatação, alterando o pH da solução saturada; as características de algumas argilas impedem que o pH de 12,4 seja atingido (Rogers, Glendinning e Roff, 1997). Então, foi proposta a metodologia do consumo inicial de cal (ICL), por Rogers, Glendinning e Roff,

(1997), que define o teor de cal para totalidade da floculação como sendo o menor teor que garante a constância do pH do solo. A Figura 9 ilustra o comportamento do pH do solo em função do teor de cal adicionado. É possível observar que, a partir de 3% de cal a variação no pH é mínima, sendo este o ICL para este solo. Ademais, ensaios de plasticidade realizados pelos autores mostraram a mesma tendência.



Fonte: Adaptado de Rogers, Glendinning e Roff (1997)

Estudos mostram que pequenas adições de cal, próximo ao ICL, reduzem de forma significativa o comportamento expansivo de solos, sendo apontados como ponto de eficiência. Silvani et al., (2020) realizaram ensaios de expansão livre de um solo, em prensa edométrica, com diferentes teores de cal hidratada. O solo originalmente possuía uma expansão livre de 6,4%, que foi reduzida para 1,7%, ao adicionar 4% de cal (ICL), representando uma redução relativa de 73%. A adição de 6% de cal resultou numa expansão livre de 1,25%, representando uma redução relativa de 80%.

Landlin e Bhuvaneshwari, (2023) avaliaram as propriedades expansivas de um solo estabilizado com cal. O solo originalmente apresentou uma expansão livre de 18%, que reduziu para 3,5% ao adicionar 2% de cal, representando uma redução relativa de 81%. A adição de 4% de cal (ICL) resultou numa expansão livre de 1,5%, redução relativa de 92%. Com relação a tensão de expansão, o solo apresentou originalmente 640 kPa e reduziu para 205 kPa e 33 kPa, ao adicionar 2% e 4% de cal, respectivamente, representando uma redução relativa de 68% e 95%.

É possível observar que teores de cal até o ICL são bastante eficientes para combater propriedades expansivas, porém teores além do ICL passam a ser menos impactante nesse controle. Comportamentos semelhantes foram obtidos em outros estudos da literatura (Al-Mukhtar, Lasledj e Alcover, 2010; Al-Rawas, Hago e Al-Sarmi, 2005; Soltani *et al.*, 2017).

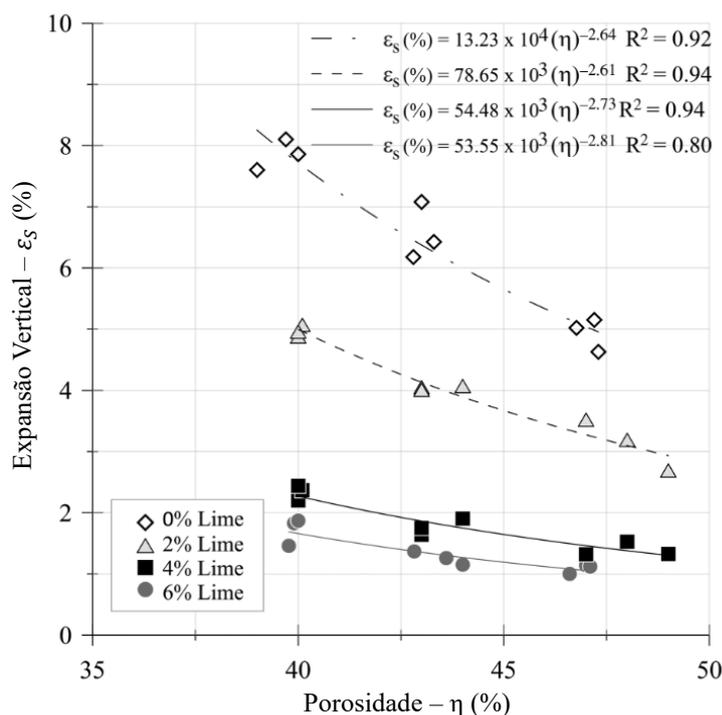
2.2.2. Efeito da porosidade em solos expansivos

O processo de compactação é amplamente utilizado na engenharia geotécnica visando reduzir vazios internos (porosidade) e trazer maior contato dos grãos de solo, resultando em ganhos de resistência, rigidez, durabilidade e redução de permeabilidade (Kodikara, Islam e Sountharajah, 2018). Por essa razão, a porosidade (ou peso específico seco) é uma propriedade de grande interesse no contexto geotécnico.

Estudos anteriores avaliaram a influência do peso específico seco sobre propriedades expansivas de diversos solos argilosos. Ferber *et al.*, (2009) trabalharam com quatro solos argilosos e variou o peso específico de 10 a 17 kN/m³. Yan e Wu, (2009) estudou 3 amostras diferentes de argila e variou o peso específico seco de 16,4 a 19,0 kN/m³. Consoli, Araújo, *et al.*, (2020) investigaram diferentes misturas de caulinita/bentonita, com peso específico entre 10,2 e 12,2 kN/m³. Silvani, Silva e Guedes, (2023) estudaram diferentes misturas areia/bentonita, com peso específico entre 12,75 e 16,75 kN/m³. Em todos os estudos citados, foi observada uma relação diretamente proporcional entre o peso específico seco e as propriedades expansivas do solo, podendo haver um aumento de até duas vezes na expansão livre e três vezes na tensão de expansão do solo.

Demais estudos também corroboram com essas observações e constataam esse efeito do peso específico seco (ou porosidade) nas propriedades expansivas dos solos (Ameta, Purohit e Wayal, 2007; Nowamooz e Masrouri, 2009; Silvani *et al.*, 2023). A Figura 10 expõe os resultados obtidos por Silvani *et al.*, (2020) ao avaliar o efeito da porosidade na expansão livre de diversas misturas solo-cal, reforçando a relação entre propriedades. Como justificativa, estruturas de solo muito compactas possuem muito contato grão a grão e poucos espaços vazios para reorganização, então, ao sofrer inundação e conseqüente inchamento, amostras mais compactas tendem a apresentar maiores deformações e tensões de expansão (Silvani *et al.*, 2020).

Figura 10: Efeito da porosidade sobre a expansão livre



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

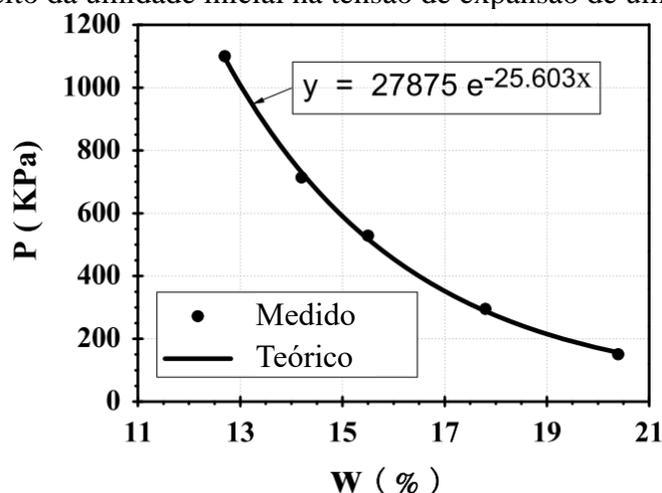
2.2.3. Efeito da umidade em solos expansivos

A umidade é um parâmetro de importância no processo de compactação, pois afeta diretamente a organização e a estrutura final das partículas de solo argilosos. Solos compactados com umidade abaixo do teor ótimo, tendem a apresentar uma estrutura interna mais desorganizada (floculada), com poros irregulares e de maior volume. Em contrapartida, uma compactação feita com umidade acima do teor ótimo, gera uma estrutura mais dispersa, em que boa parte das partículas assumem a mesma orientação, gerando anisotropia. A compactação no teor ótimo é o meio termo entre as duas estruturas citadas, e tem como vantagem, a possibilidade de atingir o peso específico seco máximo, visto que, possui água suficiente para lubrificar as partículas, mas não possui água em excesso para preencher os vazios da estrutura (Guedes *et al.*, 2024; Lambe, 1958; Mitchell, 1956; Seed e Chan, 1959).

Yan e Wu, (2009) avaliaram a influência da umidade inicial sobre as propriedades expansivas de três amostras de solo. As umidades adotadas variaram de 12,5% a 20,5% e foi possível observar uma relação inversamente proporcional com a tensão de expansão dos solos, com valores que variaram de 1100 a 125 kPa (Figura 11). Analogamente, esse

crescimento da umidade implicou na redução da expansão livre dos solos, com valores que variaram de 42% a 10%.

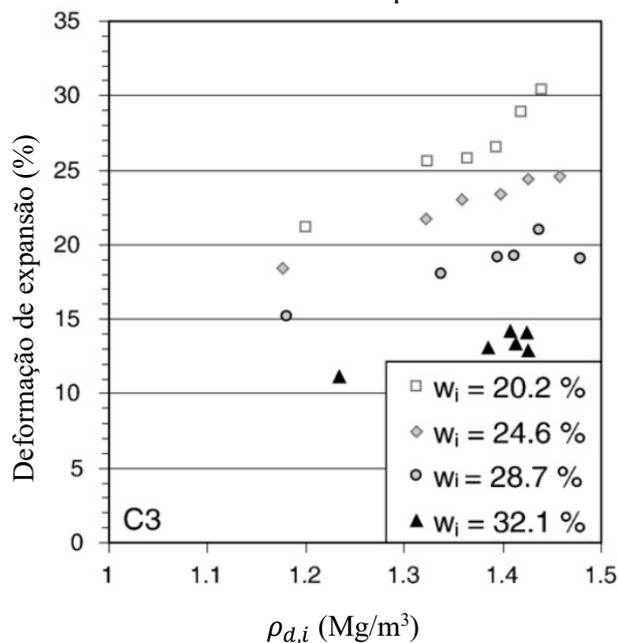
Figura 11: Efeito da umidade inicial na tensão de expansão de uma das amostras



Fonte: Adaptado de Yan e Wu (2009)

A investigação realizada por Ferber et al., (2009), em quatro argilas diferentes, também mostrou que a expansão livre é influenciada pela umidade inicial. A Figura 12 ilustra os resultados obtidos para a argila mais expansiva. As umidades iniciais variaram de 20,2% a 32,1% e observou-se uma redução da expansão livre, variando de 30,5% a 11%, conforme a umidade inicial aumenta. Ademais, observa-se que, para menores valores de umidade inicial, a influência do peso específico tende a ser maior. Nesse mesmo estudo, foram realizados ensaios de Porosimetria por intrusão de mercúrio e os autores constataram que a expansão é consequência do aumento do índice de vazios de microporos e que, durante a expansão, ocorre uma redução do índice de vazios de macroporos. Ademais, observaram que o aumento da umidade inicial gera crescimento no índice de vazios de microporos do solo expansivo, devido a absorção de água e seu respectivo inchamento pela repulsão elétrica das moléculas de água, enquanto, o processo de compactação gera apenas uma redução do índice de vazios de macroporos do solo.

Figura 12: Efeito da umidade inicial na expansão livre de uma das argila

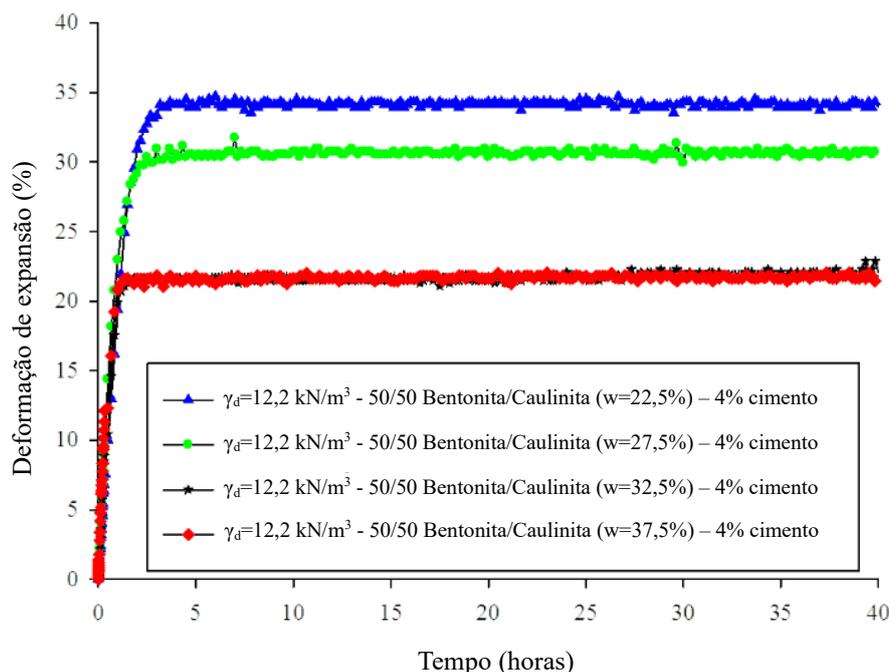


Fonte: Adaptado de Ferber *et al.* (2009)

Puppala, Manosuthikij e Chittoori, (2013) estudaram cinco diferentes argilas, moldadas ao longo da curva de compactação. As maiores magnitudes de expansão foram registradas no ponto de umidade inicial abaixo do teor de umidade ótima. Para os teores de umidade inicial acima da umidade ótima, as amostras apresentaram expansão pouco significativa.

Consoli, Araújo, et al., (2020) estudaram o efeito da umidade inicial em misturas caulinita/bentonita estabilizadas com cimento e seus resultados podem ser observados na Figura 13. Pode-se observar que quanto maior a umidade inicial, menos as amostras tenderam a expandir. Ademais, as amostras compactadas no ramo úmido, umidades de 32,5% e 37,5%, mostraram uma redução acentuada de sua expansão e tiveram um comportamento quase coincidente.

Figura 13: Efeito da umidade inicial na expansão livre de mistura caulinita/bentonita



Fonte: Adaptado de Consoli, Araújo, *et al.* (2020)

Outros estudos também corroboram com esses resultados e constataam a relação inversamente proporcional da umidade inicial com as propriedades expansivas dos solos (Ameta, Purohit e Wayal, 2007; Fattah, Al-Lami e Ahmed, 2015; Fattah, Salim e Irshayyid, 2017; Keskin *et al.*, 2023; Punthutaecha *et al.*, 2006; Sudjianto *et al.*, 2009; Zumrawi, 2013). Como justificativa, a umidade inicial afeta diretamente o volume dos microporos do solo. Teores de umidade no ramo seco até próximo ao valor da umidade ótima, implicam que a água disponível será alojada quase que inteiramente nos microporos dos argilominerais, devido às fortes forças de capilaridade, atribuídas a pequeno diâmetro das argilas e de adsorção, causada pela estrutura não balanceada eletricamente dos argilominerais. Esse aumento de saturação dos microporos gera um aumento de seu volume dos argilominerais devido a repulsão elétrica, como explicado no tópico 2.1. Teores de umidade próximo à ótima ou maiores, os microporos se encontrarão majoritariamente saturados e então sobrar a água para preencher os macroporos. Logo, para amostras compactadas no ramo seco, quanto maior a umidade inicial maior o volume inicial de água em seus microporos e, conseqüentemente, tendem a apresentar menor expansão, ao sofrerem inundação. Ademais, para amostras compactadas no ramo úmido, os microporos já se encontram essencialmente dilatados e o incremento de umidade inicial passa a influenciar pouco na expansão desenvolvida pelo solo (Ferber *et al.*, 2009).

2.2.4. Efeito da sucção em solos expansivos

Os solos que são encontrados na natureza geralmente apresentam três principais fases, sendo partículas sólidas, água e ar. Nessa situação, existe a formação de uma película contrátil na interface água-ar, sendo esta, a principal responsável pelo surgimento da tensão de sucção nos solos (Fredlund e Rahardjo, 1993). Marinho (1994) define a sucção como uma tensão isotrópica imposta pela água presente nos poros de solo, gerando um potencial de absorver mais água. Sob a teoria do estado de tensões, a sucção atua como uma poropressão negativa, que gera um aumento na tensão efetiva em que o solo está submetido (Fredlund, 2000). Ademais, quanto maior a sucção, maior a dificuldade de se remover uma unidade de água do interior dos poros do solo (Carvalho *et al.*, 2023).

A sucção total depende dos potenciais de energia no fluxo de água que ocorrem em solos nas zonas não saturadas. A Equação 2 expõe os principais fatores que compõem o potencial de água intersticial (sucção) no solo (Carvalho *et al.*, 2023).

$$\Psi_{total} = \Psi_m + \Psi_{osm} + \Psi_{temp} + \Psi_z + \Psi_{cin} + \Psi_p + \Psi_{pn} \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

Ψ_{total} : potencial total de água no solo

Ψ_m : potencial matricial

Ψ_{osm} : potencial osmótico

Ψ_{temp} : potencial térmico

Ψ_z : potencial de posição ou gravitacional

Ψ_{cin} : potencial cinético

Ψ_p : potencial de pressão de água

Ψ_{pn} : potencial pneumático

Amostras de solo compactadas ensaiadas em laboratório e submetidas à percolação de fluidos a temperatura constante, os potenciais mais relevantes são o potencial matricial e o potencial osmótico. Dessa forma, a sucção total do solo é determinada por dois componentes principais: a sucção matricial e a sucção osmótica. (Fredlund, 2000; Fredlund e Rahardjo, 1993).

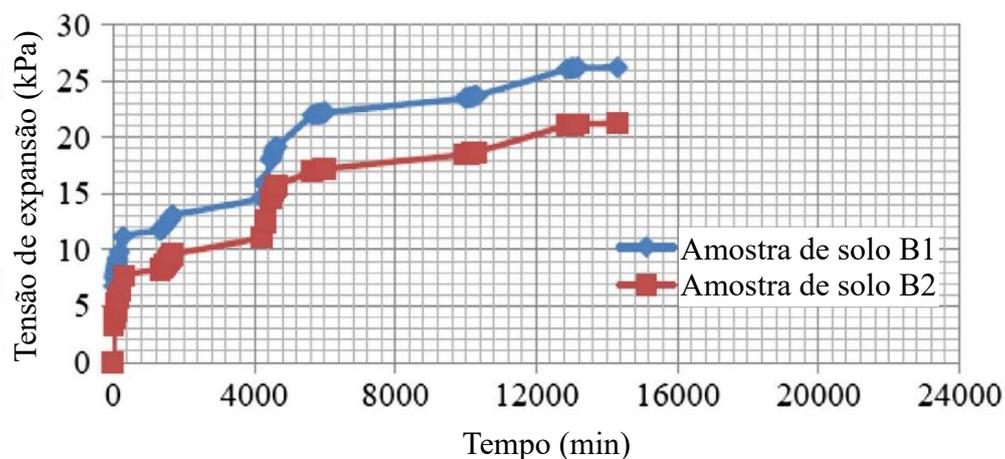
A sucção mátrica é definida como o efeito conjunto dos fenômenos da capilaridade e adsorção da água livre no solo. Assim, a sucção mátrica devido ao efeito da capilaridade está associada à interface ar-água (tensão superficial), responsável pelo fenômeno capilar

no solo. Fredlund e Rahardjo, (1993) a definem como a diferença entre a pressão do ar e a pressão da água nos poros do solo. Por sua vez, a sucção mátrica associada à adsorção ocorre devido a existência de cargas superficiais não balanceadas nas partículas de solo, podendo gerar atração ou repulsão da água e íons dissolvidos (Carvalho *et al.*, 2023). Nesse contexto, solos expansivos apresentam alto potencial para adsorção de água quando se encontram com baixa saturação, devido as forças de hidratação, resultando em significativa sucção. Porém, com a saturação do solo expansivo, ocorre a neutralização das cargas não balanceadas e as forças de hidratação se estabilizam, reduzindo o potencial de adsorção de água (Yong, 1999).

A sucção osmótica está associada às características do fluido percolante, como a concentração iônica e o pH. Por essa razão, ela independe da umidade do solo, sendo influenciada principalmente pela concentração de íons presentes e sua interação com a estrutura do solo (Fredlund e Rahardjo, 1993; Pulat, Yukselen-Aksoy e Egeli, 2014). A sucção osmótica torna-se desprezível nos solos saturados ou com baixa solução salina na água dos poros. Entretanto, solos contaminados ou naturais, ricos em íons em solução, que aumentam a capacidade de troca catiônica e a capacidade de troca aniônica, podem gerar um incremento significativo na parcela correspondente ao potencial osmótico (Carvalho *et al.*, 2023; Fredlund, 2000).

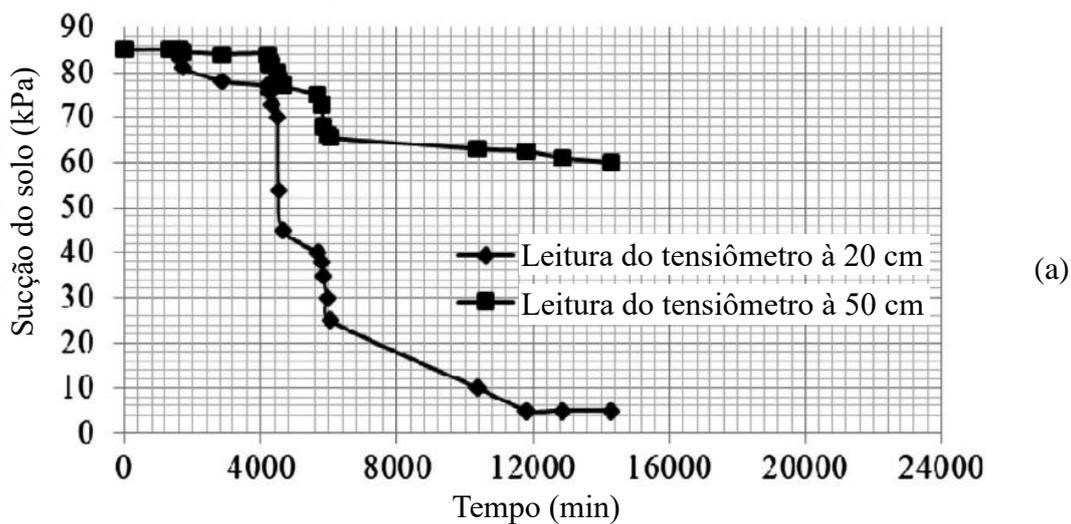
Fattah, Salim e Irshayyid, (2017) construíram um modelo instrumentado em larga escala, que foi submetido a um processo de saturação (fluxo descendente) e durante esse processo, foram feitas leituras de sucção (tensiômetros) e pressão de expansão (célula de pressão). Os tensiômetros foram posicionados nas profundidades de 20 e 50 cm, enquanto a célula de pressão ficou posicionada a 20 cm de profundidade. Na Figura 14 e Figura 15 estão expostos os resultados das amostras com bentonita cálcica, sendo B1 compactada na umidade 25% (ramo seco) e B2 compactada na umidade 34% (teor ótimo). Observa-se que, com o passar do tempo, a tensão de expansão cresce, até atingir pouco mais de 26 kPa, paralelamente, a sucção reduz dos 85 kPa iniciais até valores próximos a 0 kPa. No momento que o tensiômetro próximo a superfície marca sucção próxima de zero, o crescimento da tensão de expansão se estabiliza. Com isso, constata-se que, a bentonita cálcica ao ser inundada perde gradativamente a sucção inicial, enquanto desenvolve o processo de expansão, ambos tendem a se estabilizar conjuntamente. Comportamento esperado, pois, a sucção relaciona-se com a afinidade para adsorver água, então, com redução da sucção, a adsorção de água também reduz (Fattah, Salim e Irshayyid, 2017).

Figura 14: Tensão de expansão gerada pelo modelo em larga escala, em função do tempo

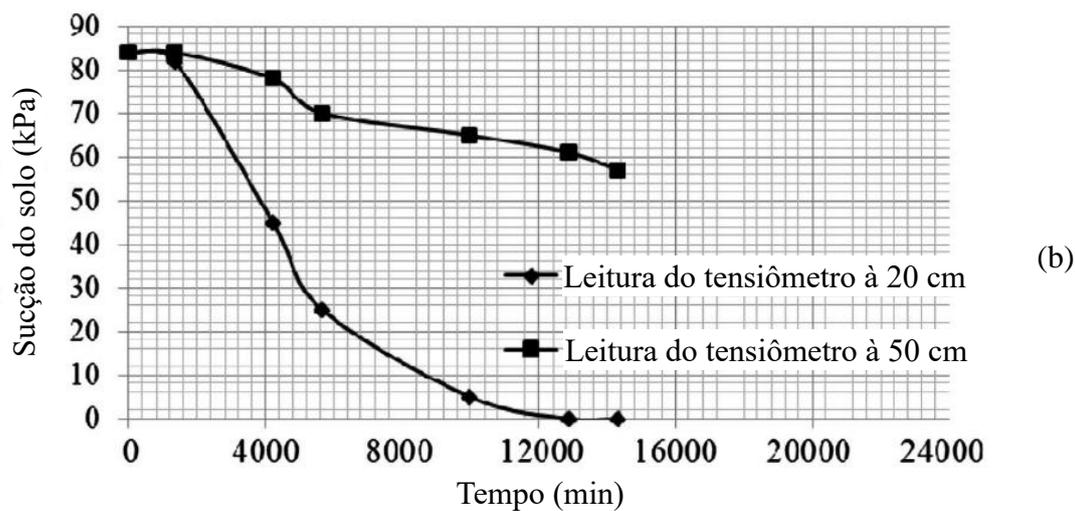


Fonte: Adaptado de Fattah, Salim e Irshayid, (2017)

Figura 15: Sucção em função do tempo, durante a saturação do modelo em larga escala, para as amostras (a) B1 (b) B2



(a)

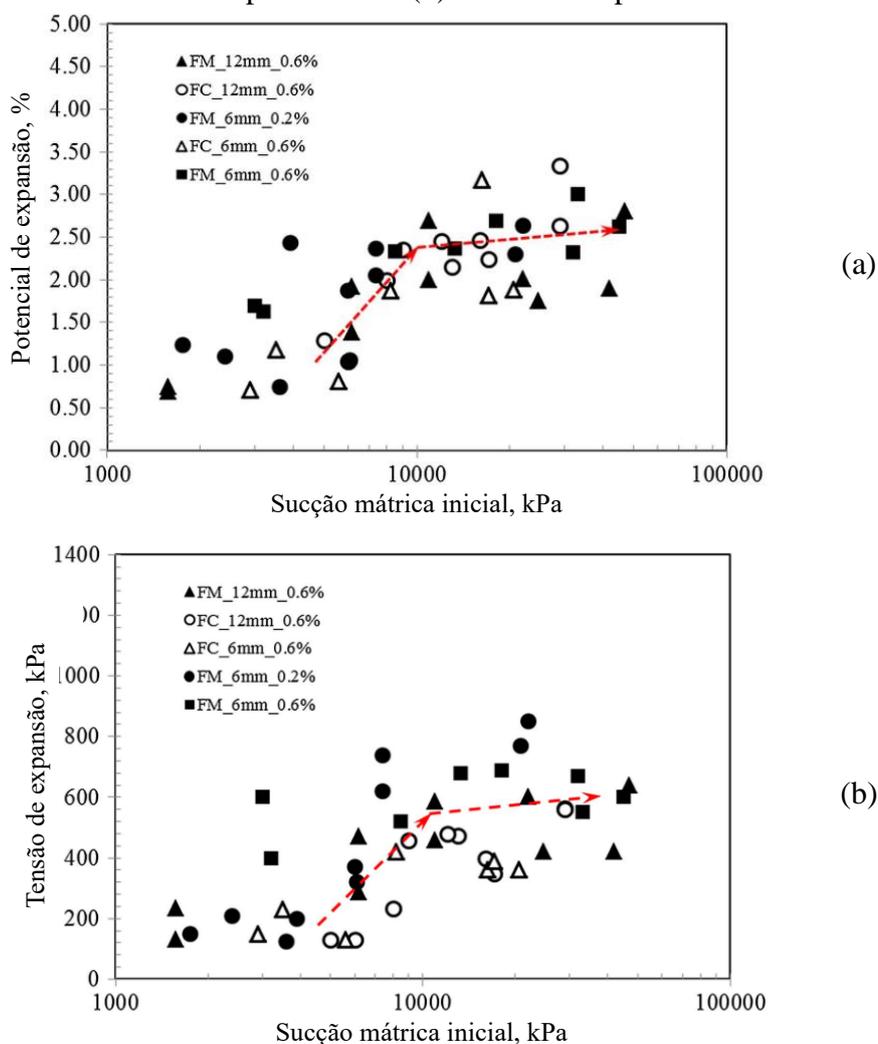


(b)

Fonte: Adaptado de Fattah, Salim e Irshayid, (2017)

Nos estudos de Al-Mahbashi, Al-Shamrani e Moghal, (2020) foi analisado o efeito da sucção mátrica inicial nas propriedades expansivas de um solo estabilizado com 6% de cal e reforçado com fibras (considerando diferentes texturas, teores e comprimentos). Observou-se que a expansão livre e a tensão de expansão do solo elevam significativamente com o aumento da sucção matricial inicial, até que o valor de sucção se aproximasse do estado residual, em torno de 10000 kPa (20% de saturação). Valores maiores de sucção mostraram que o efeito tende a ser mais suave e influenciar pouco nas propriedades expansivas, como pode ser visto na Figura 16. Esse comportamento é atribuído, segundo os autores, ao fato de que, no estado residual, não ocorrem mais alterações na macroestrutura da amostra devido ao aumento dos valores de sucção matricial.

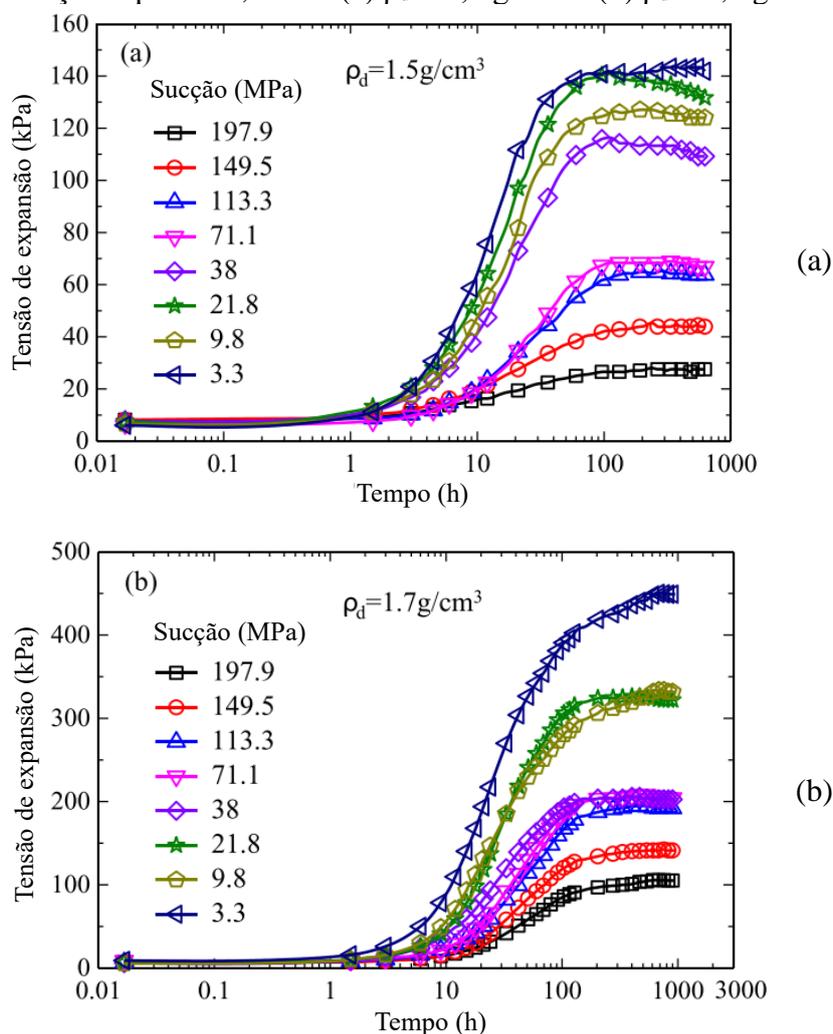
Figura 16: Efeito da sucção mátrica nas propriedades expansivas de um solo, sendo (a) expansão livre (b) tensão de expansão



Fonte: Adaptado de Al-Mahbashi, Al-Shamrani e Moghal, (2020)

Liang et al., (2021) avaliaram o comportamento da expansão de um solo argiloso com sucção artificialmente mantida constante durante todo o ensaio. A tensão de expansão foi medida durante um processo de inundação, no qual a sucção aplicada foi controlada por meio da técnica de equilíbrio de vapor (para alta sucção) ou da técnica osmótica (para baixa sucção). Foi adotada uma ampla faixa de sucção, com as massas específicas secas (ρ_d) de 1,5 e 1,7 g/cm³. Observa-se na Figura 17 que quanto menor a sucção (mantida constante durante toda a expansão) maior a tensão de expansão desenvolvida.

Figura 17: Tensão de expansão em função do tempo, para amostras sob diferentes sucções aplicadas, sendo (a) $\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$ e (b) $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$



Fonte: Adaptado de Liang et al., (2021)

2.3. Parâmetro η/L_{iv}

A dosagem do teor de aditivo para melhoramento de solo é de extrema importância, pois, incrementos insuficientes fazem o solo não apresentar características geotécnicas suficientes para implantação do empreendimento, bem como, aditivo em excesso impõe um custo monetário e ambiental desnecessário a técnica. Nessa linha, estudos iniciais de solo estabilizado com agente cimentante mostraram que a previsão de seu comportamento é complexa e sofre influência de uma série de fatores como: tipo e quantidade do agente cimentante, tempo e temperatura de cura, umidade de compactação e porosidade (Barman e Dash, 2022).

Buscando sanar a problemática, estudos tentaram dosar misturas de solo melhorado a partir dos fatores água-cimento e água-cal, de forma similar ao empregado em concretos e argamassas. Entretanto, não obtiveram resultados satisfatórios, visto que, não foi observada relação entre a resistência final e os fatores estudados (Consoli *et al.*, 2007; Consoli, Lopes Junior. e Heineck, 2009; Ribeiro, Néri e Cardoso, 2016). Como justificativa, Consoli *et al.* (2007) explicam que, diferentemente dos concretos e argamassas, os vazios do solo estabilizado não se encontram totalmente preenchidos por água, portanto, porosidade e volume de água são matematicamente diferentes.

Consoli *et al.* (2007) propõem um método racional de dosagem, a partir da utilização da porosidade (η) (em substituição da massa de água) e do teor volumétrico de cimento (C_{iv}) (em substituição a massa de cimento) para a dosagem do solo artificialmente cimentado. Assim, foi obtida uma boa correlação entre o parâmetro η/C_{iv} e a resistência à compressão simples de um solo arenoso estabilizado com cimento Portland. Para uma melhor modelagem da resistência, foi identificada a necessidade de elevar o denominador a um expoente, neste caso, no valor de 0,28, e então os autores sugerem que esse expoente depende do solo e do tipo de agente cimentante utilizado.

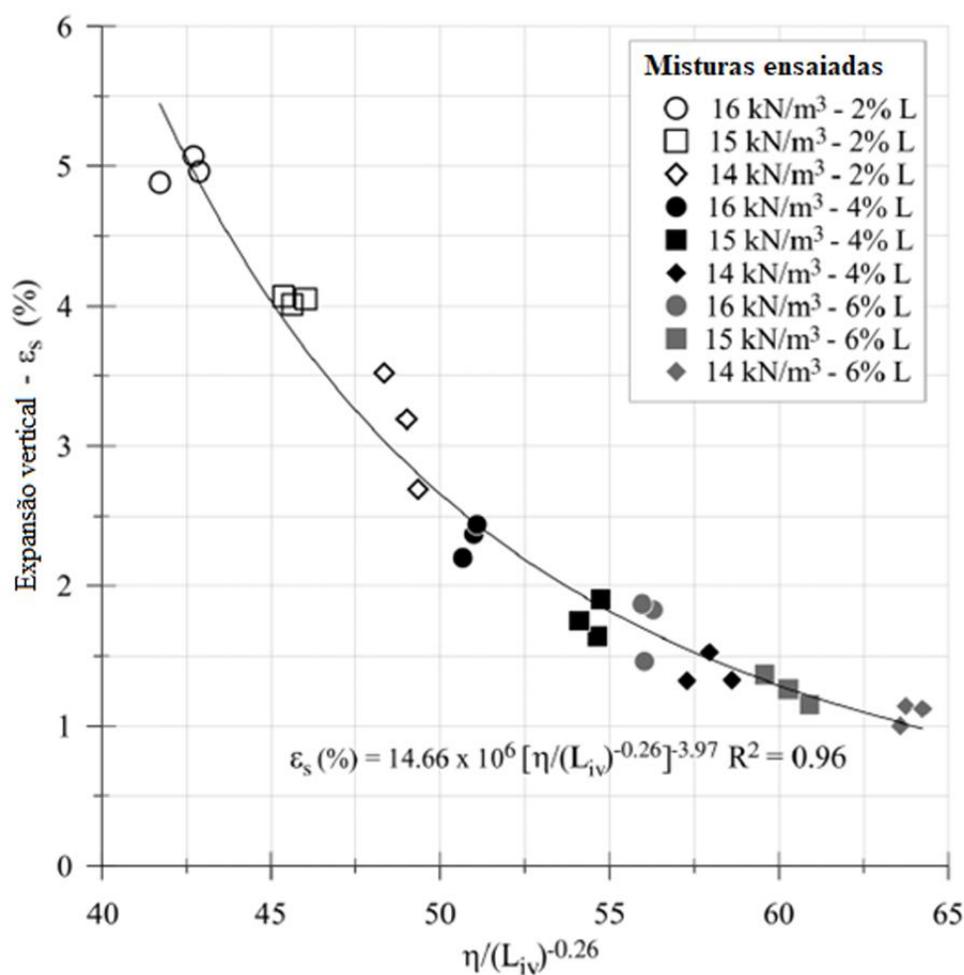
Dando prosseguimento à validação da metodologia proposta, Consoli, Lopes Junior e Heineck (2009) obtiveram bons resultados ao aplicá-la para resistência à compressão simples de solo estabilizado com cal. Uma adaptação foi feita, pelo agente cimentante ser a cal, resultando no parâmetro porosidade (η) / teor volumétrico de cal (L_{iv}).

Em pesquisas posteriores, pode-se constatar que o parâmetro porosidade / teor volumétrico de cal (η/L_{iv}) apresenta resultados satisfatórios ao modelar diversos

parâmetros de resistência, rigidez, durabilidade e permeabilidade, como: ângulo de atrito, coesão, resistência a tração por compressão diametral, módulo de cisalhamento inicial, módulo de cisalhamento máximo, perda de massa em ciclos de molhagem e secagem, para diversos solos estabilizados com cal, com variados tempos e temperaturas de cura (Consoli *et al.*, 2010; Consoli, Festugato, *et al.*, 2014, 2020; Consoli, Prietto, *et al.*, 2014; Consoli, Rocha, Da e Silvani, 2014; Consoli, Rocha e Silvani, 2014; Consoli, Rosa e Saldanha, 2010; Quiñónez Samaniego, 2015; Saldanha e Consoli, 2015; Silvani, Benetti e Consoli, 2019).

Silvani *et al.*, (2020) aplicaram de forma inédita o parâmetro η/L_{iv} para modelagem da propriedade expansiva de um solo estabilizado com cal. Nessa pesquisa foram adotados os pesos específicos de 14, 15 e 16 kN/m³ e os teores de cal de 2%, 4% e 6%, com amostras em triplicata. Como pode ser visto na Figura 18, o ajuste obtido foi satisfatório, com a aplicação de um coeficiente de ajuste no denominador de -0,26.

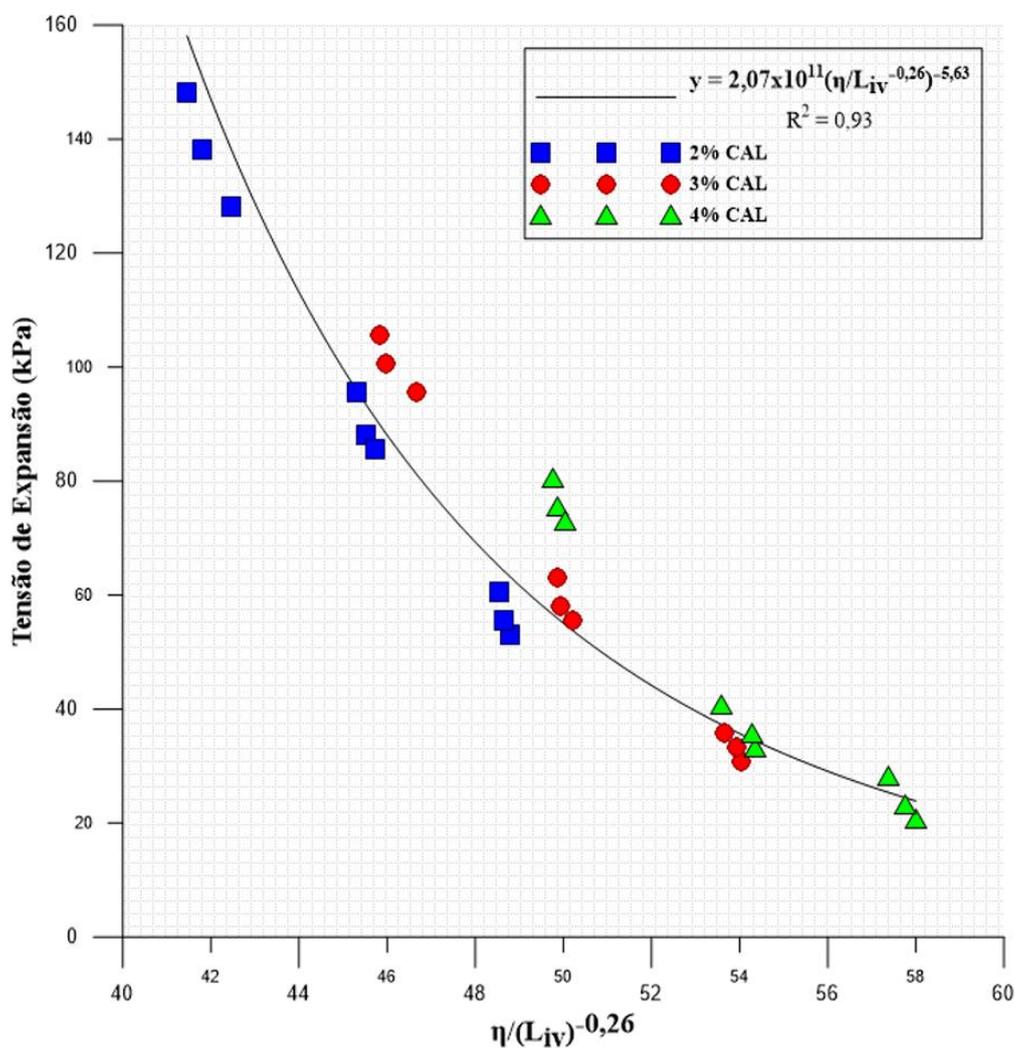
Figura 18: Aplicação do parâmetro $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ na expansão livre



Fonte: Silvani *et al.* (2020)

Em seus estudos Guimarães, (2023) ampliou a aplicação do parâmetro η/L_{iv} nas características expansivas de solos, conseguindo, com sucesso, modelar a tensão de expansão de um solo estabilizado com cal e cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Em sua pesquisa, foi fixado o teor de cinza em 6,5% e foram adotados os pesos específicos de 14, 15 e 16 kN/m³ e os teores de cal de 2%, 3% e 4%, com amostra em triplicata. Como exposto na Figura 19, foi obtido um ajuste satisfatório com aplicação do coeficiente de ajuste de -0,26.

Figura 19: Aplicação do parâmetro $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ na tensão de expansão



Fonte: Guimaraes (2023)

Com o mesmo solo utilizado por Silvani et al. (2020) e Guimaraes (2023), estudos avaliaram a aplicação da metodologia de dosagem para modelar resistência à compressão simples, ao estabilizar o solo com cimento Portland e cal (Guedes *et al.*, 2022; Silvani *et*

al., 2023). Nessas pesquisas, o coeficiente de ajuste adotado também foi de 0,26, sendo obtidos um resultado satisfatório.

Assim, observa-se que, apesar de lidar com o mesmo solo, o sinal do expoente de ajuste varia, a depender da propriedade que está sendo modelada. Para parâmetros diretamente proporcionais ao teor de cal, como a resistência à compressão simples, o expoente assume sinal positivo. Porém, para parâmetros inversamente proporcionais ao teor de cal, como expansão livre e tensão de expansão, o expoente assume sinal negativo (Silvani *et al.*, 2020). Essa observação está de acordo com os resultados de Consoli, Festugato, et al., (2020), ao modelar parâmetros de resistência e durabilidade (diretamente proporcionais ao teor de cal) e perda de massa à ciclos de molhagem e secagem (inversamente proporcional ao teor de cal).

Estudos anteriores utilizaram um processo matemático de normalização para estabelecer relações generalizadas entre propriedades mecânicas de solos e o parâmetro η/L_{iv} . Com essa abordagem, foi possível derivar uma única equação matemática capaz de modelar propriedades do solo para amostras sob diferentes condições (Consoli, Ibraim, *et al.*, 2017; Consoli, Marques, *et al.*, 2017; Silvani *et al.*, 2020).

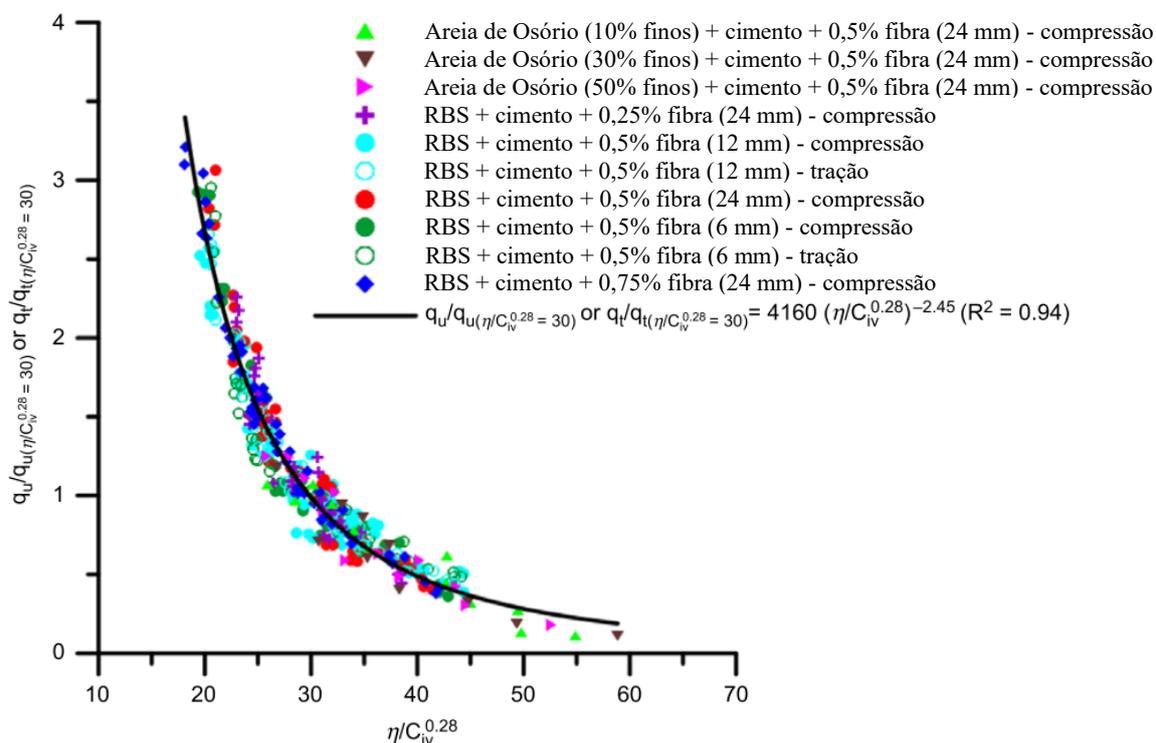
O procedimento aplicado nesses estudos consiste em dividir todos os resultados experimentais obtidos por um valor específico (Δ), correspondente a um parâmetro η/L_{iv} fixado. Esse método permite a obtenção de relações unificadas, facilitando a previsão do comportamento mecânico dos solos estabilizados e reduzindo a dispersão dos dados experimentais. Dessa forma, a normalização possibilita a interpolação dos resultados para diferentes condições de compactação e estabilização, tornando o modelo matemático mais robusto e aplicável a uma ampla gama de cenários geotécnicos.

Consoli, Ibraim, et al., (2017) realizaram a normalização em função do parâmetro η/L_{iv} de uma série de dados de resistência à compressão simples, cobrindo uma grande variedade de solos e cais, bem como, um grande intervalo de peso específico, teor de cal, umidade de compactação e temperatura de cura. Os autores adotaram um $\Delta = 30$, por estar presente no intervalo de estudo de todos os solos, e conseguiram ajustar os dados numa única expressão com boa correlação estatística ($R^2 = 0,88$).

Consoli, et al., (2017) realizaram, com base no parâmetro η/L_{iv} , a normalização de dados de resistência à compressão simples e resistência à tração em uma ampla variedade de solos estabilizados com cimento Portland e fibra. Para isso, os autores

consideraram uma extensa faixa de índices de vazios, teores de fibra, teores de cimento e índices de aspecto. Com a adoção de $\Delta = 30$, foi possível ajustar satisfatoriamente os resultados experimentais em uma única equação matemática, representando tanto a resistência à compressão simples quanto a resistência à tração, como pode ser visto na Figura 20. A elevada correlação estatística obtida ($R^2 = 0,94$) evidencia a eficácia do processo de normalização na unificação dos dados de resistência, permitindo uma modelagem precisa das propriedades mecânicas dos solos estabilizados.

Figura 20: Normalização das resistências à compressão simples e à tração de solos estabilizados com fibra e cimento

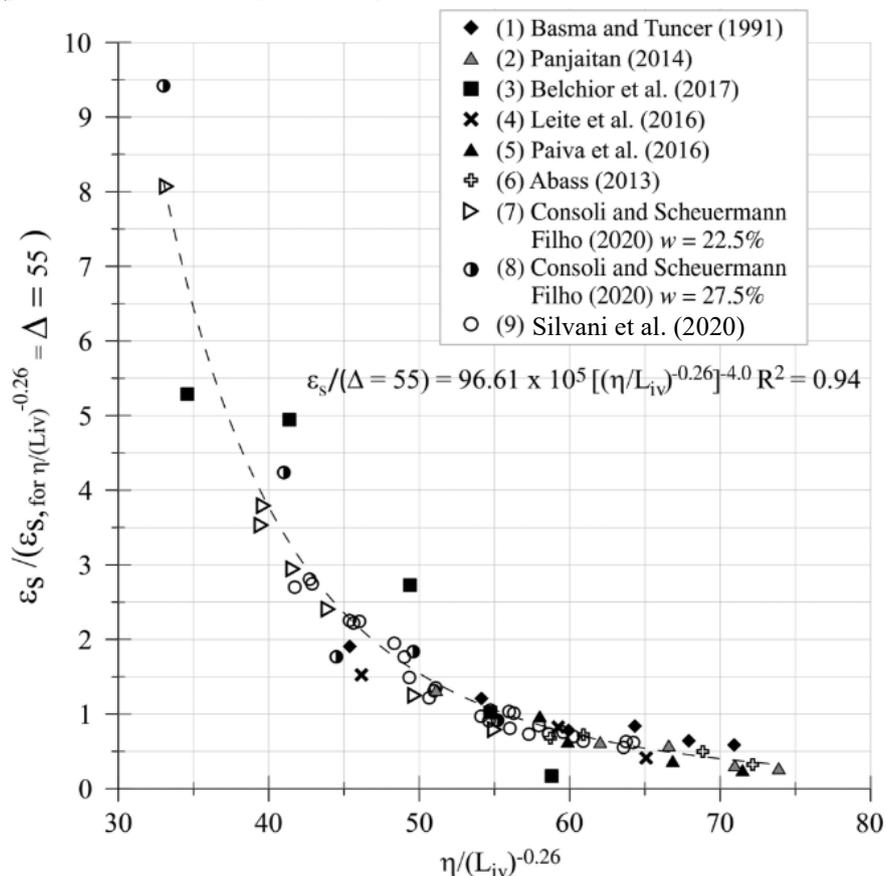


Fonte: Adaptado de Consoli et al., (2017)

Silvani et al., (2020) realizaram a normalização de dados de expansão livre em função do parâmetro η/L_{iv} para diversos solos expansivos estabilizados com cal, abrangendo uma ampla faixa de porosidade e teor de cal. Para garantir a compatibilidade dos dados experimentais, os autores adotaram um valor de $\Delta = 55$, que contemplava o intervalo de variação dos solos analisados. Como ilustrado na Figura 21, a aplicação da normalização permitiu a obtenção de uma única equação matemática capaz de descrever o comportamento da expansão livre das amostras estabilizadas, independentemente das condições específicas de cada solo. A alta correlação estatística obtida ($R^2 = 0,94$)

evidencia a eficácia da normalização na unificação dos resultados e na previsão do comportamento expansivo dos solos estabilizados com cal.

Figura 21: Normalização da expansão livre de solos estabilizados com cal



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

2.4. Relação entre expansão livre e tensão de expansão

O processo de expansão do solo é um desafio significativo para a engenharia civil, pois pode causar movimentos ascendentes imprevisíveis em estruturas construídas em sua área de influência (Carvalho *et al.*, 2023; Ikeagwuani e Nwonu, 2019). A determinação das propriedades de expansão do solo, como a porcentagem de expansão livre e a tensão de expansão, é um processo que demanda tempo, apresenta alto custo e depende de ensaios destrutivos. Nesse contexto, torna-se essencial o desenvolvimento de modelos de previsão confiáveis, capazes de serem aplicados de maneira ágil, econômica e não destrutiva. Essa abordagem seria especialmente relevante nas etapas iniciais de concepção de um empreendimento (Erzin e Gunes, 2013; Kayabali e Demir, 2011).

Nesse cenário, modelos de previsão das propriedades expansivas dos solos foram estabelecidas por trabalhos anteriores. A Tabela 4 expõe um compilado de correlações estabelecidas experimentalmente entre a expansão livre e tensão de expansão, para diferentes solos.

Tabela 4: Correlações entre expansão livre e tensão de expansão

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

*Sendo: E_L = expansão livre; T_e = tensão de expansão

Fonte: adaptado de Guimaraes (2023)

Guimaraes (2023) propôs uma expressão matemática, concebida a partir da regressão linear de uma série de dados, advindos de ensaios de expansão livre e tensão de expansão realizados com um solo expansivo estabilizado com cal e cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA). Apesar de terem sido adotadas amostras com diferentes pesos específicos e teores de cal, pode-se observar na Figura 22 que todos os dados são satisfatoriamente ajustados pela Equação 3.

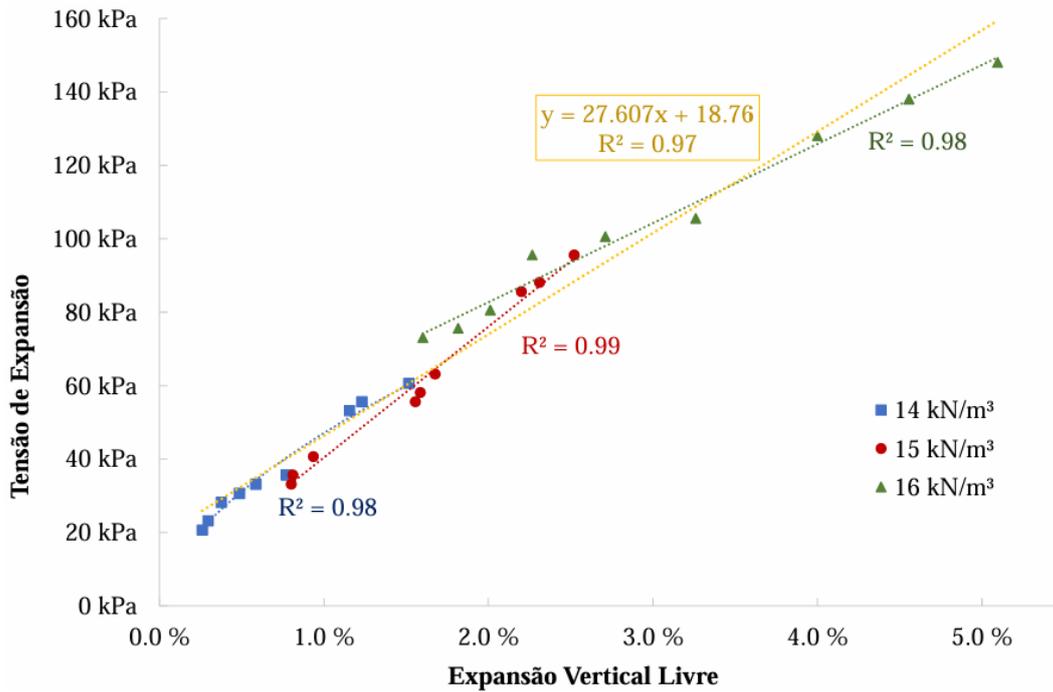
$$T_e = 27,607 \times \varepsilon_L + 18,76 \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

T_e : Tensão de expansão (kPa)

ε_L : Expansão Livre (%)

Figura 22: Relação entre expansão livre e tensão de expansão para um solo expansivo estabilizado com cal e CBCA



Fonte: Guimarães, (2023)

Adicionalmente, Guimaraes (2023) investigou a possibilidade de estabelecer uma relação entre expansão livre e tensão de expansão a partir de suas respectivas equações de dosagem, obtidas pelo parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$. As duas equações de dosagem seguem um modelo matemático baseado em funções de potência, descrito pela equação geral $y = Ax^B$, onde y representa a tensão de expansão ou a expansão livre, A é uma constante característica do sistema, x corresponde ao parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$ e B é um expoente externo que regula a relação entre as variáveis. Para viabilizar a comparação das duas equações de dosagem, o autor realizou a normalização das expressões, fixando-se empiricamente o expoente externo B , de maneira a garantir uma correlação otimizada entre as variáveis. Então, a fixação do expoente B igual a $-5,5$ viabilizou a razão expressa na Equação 4, resultando na Equação 5, que relaciona diretamente as propriedades expansivas.

$$\frac{T_e}{\varepsilon_L} = \frac{1,23 \times 10^{11} \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}} \right)^{-5,5}}{3,49 \times 10^9 \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}} \right)^{-5,5}} \quad \text{Eq. (4)}$$

$$T_e = 35,244 \times \varepsilon_L \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

T_e : Tensão de expansão (kPa)

ϵ_L : Expansão Livre (%)

η : Porosidade

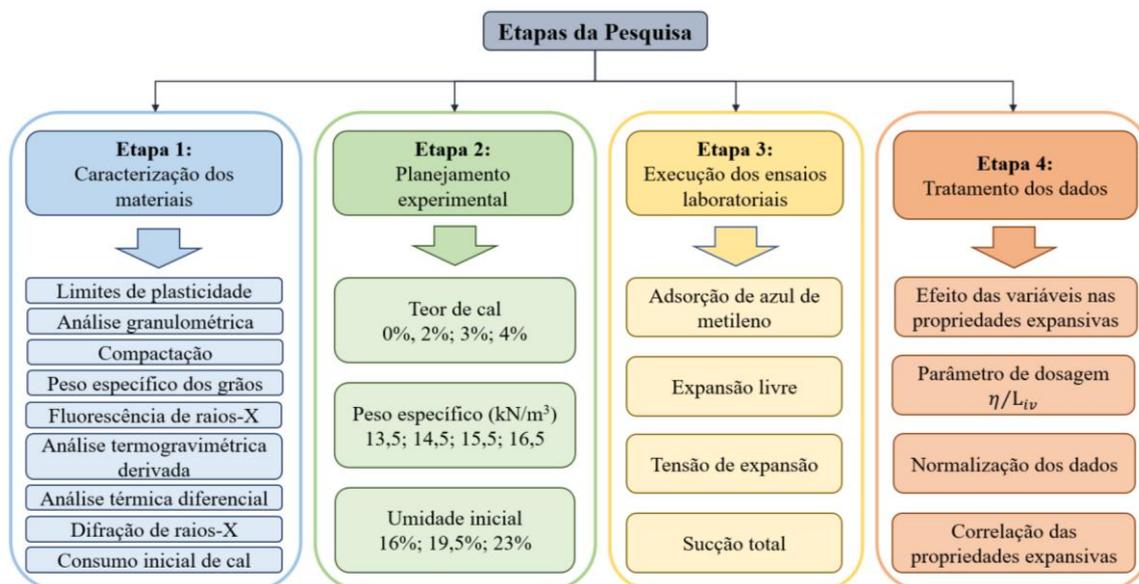
L_{iv} : Teor volumétrico de cal

Assim, Guimarães (2023) propôs as Equações 3 e 5, as quais foram derivadas por abordagens distintas. No entanto, ambas apresentam aplicabilidade na determinação da tensão de expansão a partir da expansão livre, fornecendo métodos alternativos, porém convergentes, para a previsão do comportamento expansivo das misturas solo/CBCA/cal.

3. METODOLOGIA

Esta seção explana os procedimentos metodológicos adotados para a presente pesquisa e apresenta as caracterizações dos materiais da pesquisa (solo expansivo e cal hidratada) bem como, o detalhamento dos ensaios geotécnicos realizados, visando analisar o efeito da umidade inicial no comportamento expansivo do solo estabilizado com cal. A Figura 23 expõe um fluxograma com as principais etapas desenvolvidas na pesquisa.

Figura 23: Fluxograma da pesquisa



A pesquisa iniciou com a investigação acerca do solo expansivo e da cal hidratada, que foram caracterizados previamente por Tenório (2019). A partir desse entendimento inicial, juntamente com a realização de alguns ensaios teste, foi possível proceder com a definição do planejamento experimental adotado na pesquisa. As misturas solo-cal foram ensaiadas em diferentes condições, contemplando quatro teores de cal, quatro pesos específicos e três umidades iniciais.

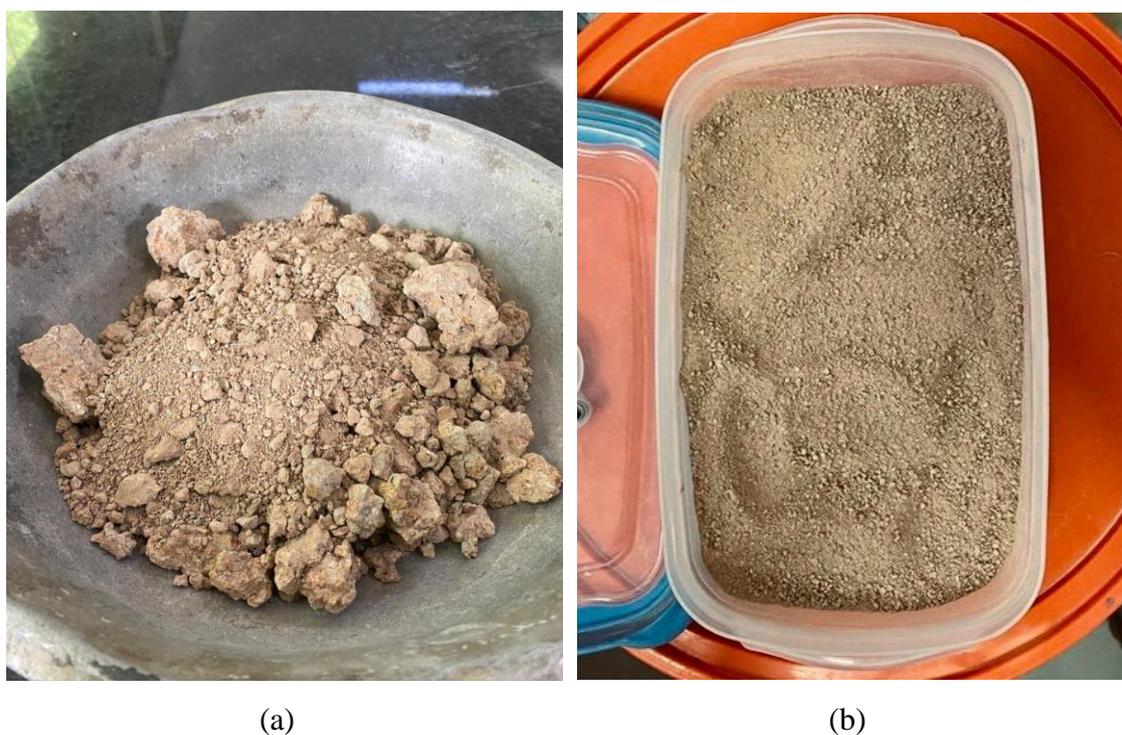
Em seguida, foram realizadas moldagens de corpos de prova (CP) e ensaios de expansão em célula edométrica, para obtenção da expansão livre e da tensão de expansão das amostras. Paralelamente, foram realizados ensaios, com papel filtro, para determinação da sucção total dos mesmos pontos definidos no planejamento experimental. Após a totalidade dos ensaios, procedeu-se o tratamento dos dados, com análise geral do comportamento obtido, definição das curvas de dosagem pelo parâmetro η/L_{iv} e determinação da correlação entre expansão livre e tensão de expansão.

3.1. Materiais

3.1.1. Solo expansivo

O solo que é objeto de estudo nesta pesquisa advém da zona rural do município de Paulista - PB. Em estudos anteriores Tenório (2019) e Guimaraes (2023) utilizaram o solo dessa mesma região e constataram seu carácter expansivo. Foi realizada uma coleta de amostras deformadas, extraídas de uma vala com dimensões de 2 metros de comprimento, 1 metro de largura e 1,4 metros de profundidade, conforme recomendações da NBR 9604 (ABNT, 2024a). Então, as amostras foram acondicionadas em sacolas plásticas e transportadas para o Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O solo expansivo (Figura 24) foi disposto ao ar livre para secagem, em seguida, foi destorroado e peneirado.

Figura 24: Solo expansivo (a) antes da preparação e (b) após destorroamento



A caracterização geotécnica do solo expansivo foi realizada por Tenório (2019) e está apresentada na Tabela 5, juntamente com as respectivas normas adotadas. O solo apresenta Limite de Liquidez (LL) de 49% e Limite de Plasticidade (LP) de 21%, resultando num alto Limite de Plasticidade (LP) de 28%. Esses valores de plasticidade obtidos indicam um comportamento coesivo, como esperado para solos ricos em argilominerais.

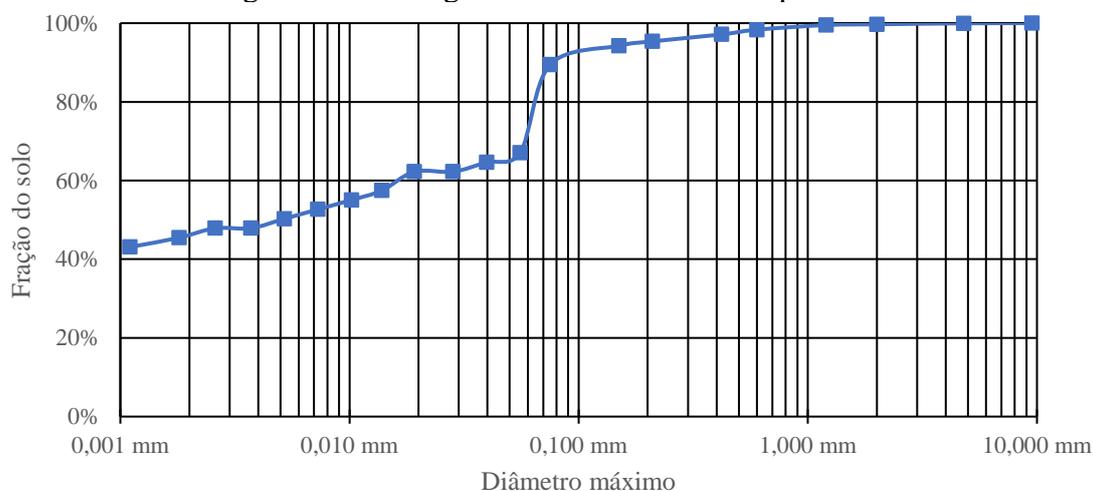
Tabela 5: Caracterização geotécnica do solo expansivo

Parâmetro	Solo	Norma
Limite de liquidez (%)	49	NBR 6459 (ABNT, 2016a)
Limite de plasticidade (%)	21	NBR 7180 (ABNT, 2016b)
Índice de plasticidade (%)	28	
Atividade da argila	0,62	
Peso específico dos grãos (kN/m^3)	26,5	NBR 6458 (ABNT, 2025a)
Areia grossa ($d > 0.60 \text{ mm}$) (%)	1,66	
Areia média ($0.20 \text{ mm} < d < 0.60 \text{ mm}$) (%)	2,96	
Areia fina ($0.06 \text{ mm} < d < 0.20 \text{ mm}$) (%)	28,34	NBR 7181 (ABNT, 2025b)
Silte ($0.002 \text{ mm} < d < 0.06 \text{ mm}$) (%)	21,58	
Argila ($d < 0.002 \text{ mm}$) (%)	45,46	
Peso específico aparente máximo (kN/m^3)	15,4	
Umidade ótima (%)	23	NBR 7182 (ABNT, 2016c)
Classificação SUCS	CL-CH	D2487 (ASTM, 2025)
Classificação HRB	A-7-6	D3282 (ASTM, 2024a)

Fonte: adaptado de Tenório (2019)

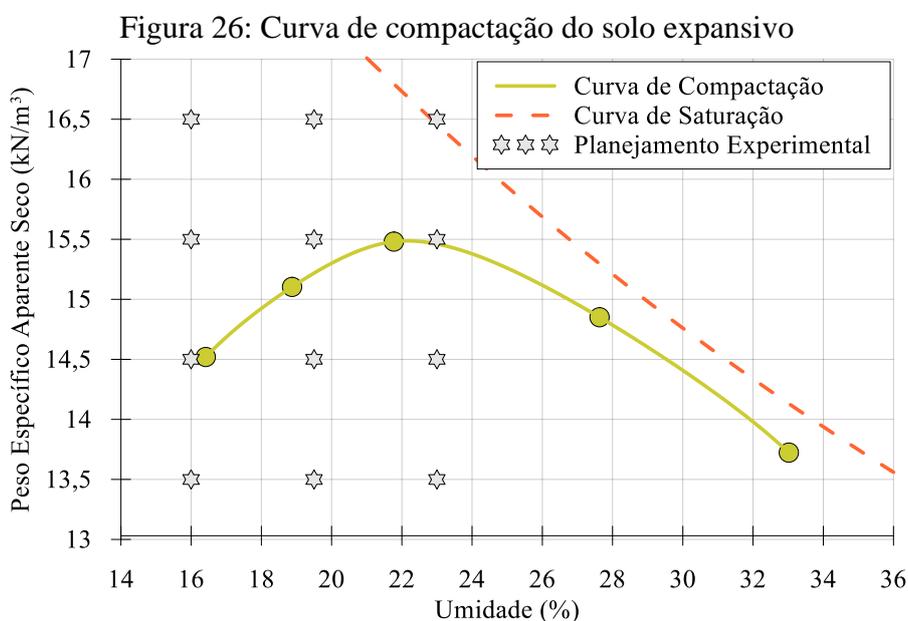
O peso específico obtido para os grãos de solo foi de $26,5 \text{ kN/m}^3$. Ademais, a curva granulométrica do solo expansivo pode ser vista na Figura 25. A partir das frações estabelecidas pela NBR 7181 (ABNT, 2025b), o solo expansivo possui 32,96% de areia, 21,58% de silte e 45,46% de argila, indicando ser um solo predominantemente fino.

Figura 25: Curva granulométrica do solo expansivo



Fonte: Adaptado de Tenório (2019)

A curva de compactação do solo expansivo é ilustrada pela Figura 26, obtida conforme a NBR 7182 (ABNT, 2016c). O ensaio foi realizado na energia Proctor normal, com reutilização de material e com o cilindro de compactação pequeno. A umidade ótima do solo foi de 23%, sendo considerada um valor alto, típico de solos finos, além disso, o peso específico seco máximo foi definido como 15,5 kN/m³. Também é possível observar a distribuição dos pontos experimentais de moldagem, que será discutida com maior detalhe no próximo tópico. Além disso, no caso das amostras estabilizadas, a adição de cal promove um deslocamento da curva de compactação ligeiramente para baixo e para a direita, resultando em uma redução do peso específico seco máximo e um aumento no teor de umidade ótima. (Bell, 1996; Sadeghian, Maleki e Kazempour, 2024; Sivapullaiah, Prashanth e Sridharan, 1998).



Fonte: adaptado de Tenório (2019)

Conforme o Sistema Unificado de Classificação de solos (SUCS), norma D2487 (ASTM, 2025), o solo expansivo obteve classificação dupla, sendo CL-CH, indicando ser uma argila com baixa compressibilidade (CL) ou uma argila com alta compressibilidade (CH). Por meio do sistema rodoviário, *Highway Research Board* (HRB), norma D3282 (ASTM, 2024a), o solo expansivo é classificado como A-7-6, indicando ser um solo fino argiloso com alta compressibilidade.

A Tabela 6 expõe a composição química do solo expansivo, obtida por Tenório (2019), por meio do ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX), conforme a NBR 16137 (ABNT, 2016d). O ensaio foi realizado sob atmosfera de vácuo e foram utilizados cátodos

de cobre. A partir do FRX, pode-se constatar que os principais constituintes do solo são compostos de silício (54,94% de SiO_2) e de alumínio (25,09% de Al_2O_3), sendo esses, diretamente relacionados ao desenvolvimento de reações pozolânicas, quando em contato com a cal (MITCHELL; SOGA, 2005).

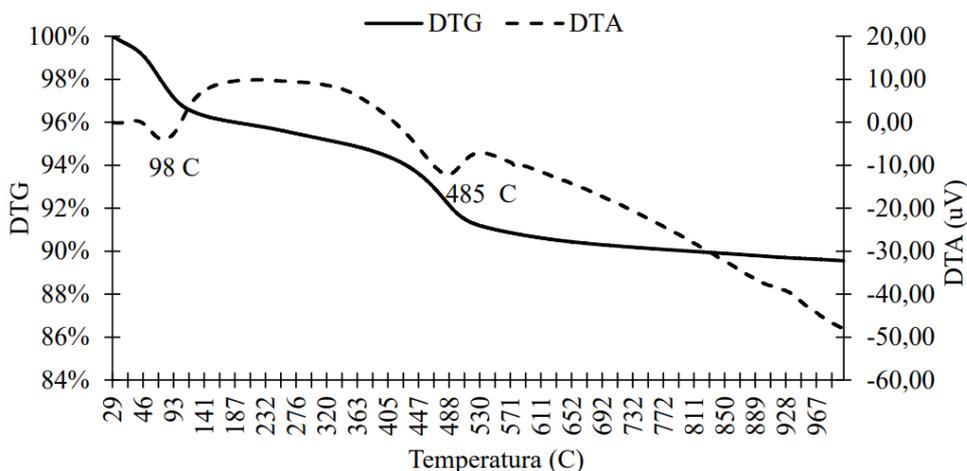
Tabela 6: Resultado do ensaio FRX para o solo expansivo

Composto	Fração (%)	Composto	Fração (%)
SiO_2	54,94	TiO_2	0,85
Al_2O_3	25,09	SO_3	0,18
Fe_2O_3	4,68	Outros	0,12
K_2O	2,35	Perda ao Fogo	10,45
MgO	1,34		

Fonte: Adaptado de Tenório (2019)

Tenório (2019) realizou a análise termogravimétrica derivada (DTG) e a análise térmica diferencial (DTA) do solo expansivo, com resultado exposto na Figura 27. Com relação as condições do ensaio, utilizou-se uma atmosfera de nitrogênio com fluxo de 100 ml/min e uma taxa de aquecimento de 12 °C por minuto. A partir disso, no ensaio DTA, foi observada a formação de um pico endotérmico próximo aos 100 °C, bem como, no ensaio DTG, uma perda pronunciada de massa. Essa primeira reação está ligada ao processo de evaporação da água livre presente no solo. Analogamente, é possível observar a formação de outro pico endotérmico próximo dos 485 °C, com uma pronunciada perda de massa. Essa segunda reação está relacionada com a perda de hidroxilas da constituição dos argilominerais do solo.

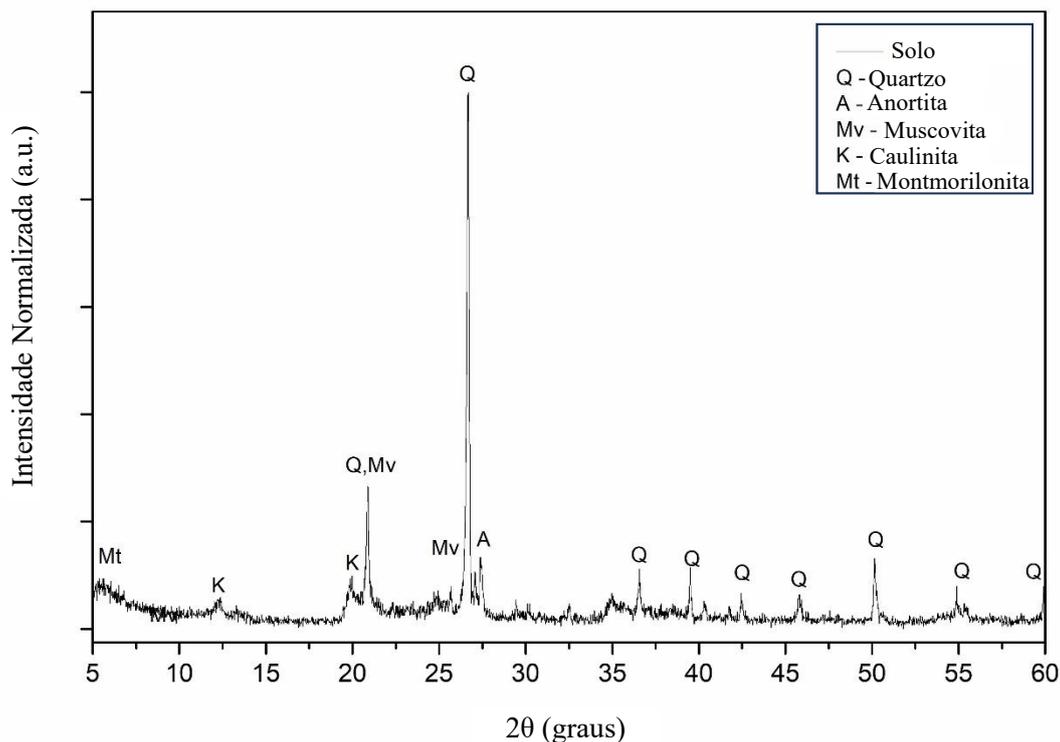
Figura 27: Resultados das análises térmicas do solo expansivo



Fonte: Tenório (2019)

A Figura 28 expõe a caracterização mineralógica do solo expansivo, realizado por Tenório (2019), por meio do ensaio de Difração de Raios-X (DRX). A amplitude do ensaio foi de 5° a 60° com uma velocidade de varredura de $2^\circ/\text{min}$. O equipamento utilizado possui cátodo de cobre, com diferença de potencial de 40 kV e corrente de 30 mA. A partir disso, observa-se a presença de picos de quartzo, caulinita e muscovita, bem como, picos de esmectita, que são um argilomineral com características expansivas.

Figura 28: Resultado do ensaio DRX para o solo expansivo



Fonte: Adaptado de Tenório (2019)

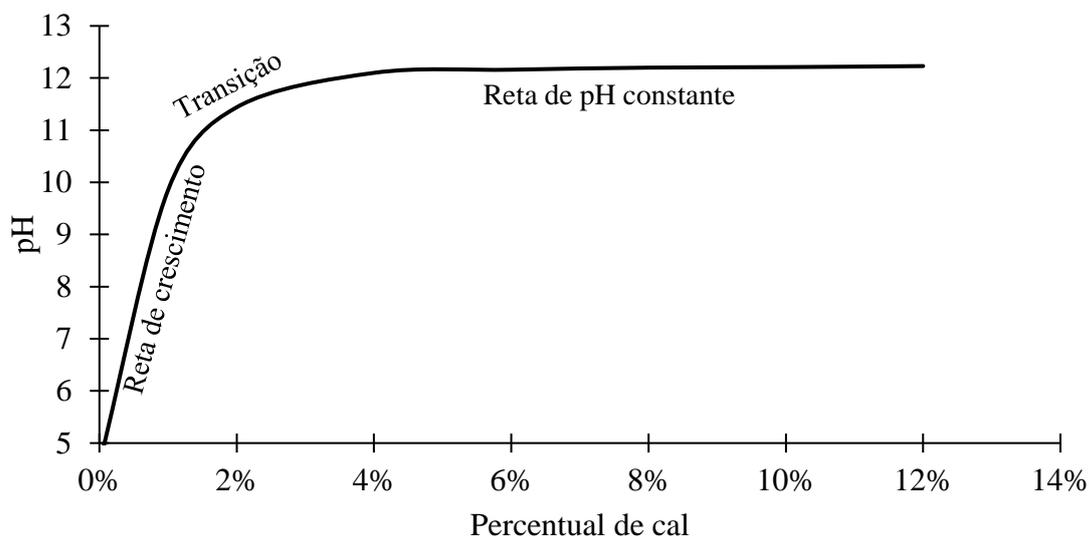
3.1.2. Cal

A cal utilizada na pesquisa é do tipo hidratada da marca “MegaÓ”, adquirida no comércio local de Campina Grande - PB. Esta mesma cal foi utilizada por Tenório (2019), que determinou um peso específico de 24 kN/m^3 , para a mesma. O armazenamento foi feito em recipiente adequado, para evitar a carbonatação, que é uma reação da cal hidratada com o gás carbônico formando carbonato de cálcio.

A Figura 29 ilustra a curva obtida no ensaio de consumo inicial de cal (ICL) realizado por Tenório (2019), para a cal e o solo expansivo, conforme a norma D6276 (ASTM, 2019). As adições de cal utilizadas foram de 1%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10% e 12%, em relação a massa seca de solo. Com o ensaio, obteve-se que a partir de 4% de cal, o pH do solo se mantém constante, sugerindo que o comportamento expansivo foi

completamente combatido (TENÓRIO, 2019). Teores de cal até 1,5%, mantem o solo na reta de crescimento de pH, em que, seu comportamento expansivo não está controlado. Teores entre 1,5% e 4%, o solo estaria numa fase de transição entre os dois comportamentos.

Figura 29: Curva do ensaio ICL para o solo expansivo



Fonte: Tenório (2019)

3.2. Métodos

3.2.1. Planejamento experimental

As propriedades expansivas das misturas solo-cal foram analisadas com base no ensaio de expansão unidimensional em prensa edométrica, sendo obtidas como respostas a expansão livre e a tensão de expansão. Assim, visando entender o comportamento das misturas solo-cal, foram adotados diferentes níveis para as variáveis de estudo, sendo elas: umidade inicial, peso específico seco e teor de cal.

Os teores de cal adotados para essa pesquisa foram definidos com base no ensaio de ICL realizado no solo expansivo, apresentado na seção 3.1.2. Então, similar ao estudo de Guimaraes (2023), os teores de cal adotados foram de 2%, 3% e 4% por se encontrarem na zona de transição, entre a reta de crescimento e a reta de pH constante. Nessa zona, a expansão não ocorre de forma descontrolada, porém não está completamente combatida. Assim, foi possível avaliar como as variáveis de estudo impactam na expansão do solo. Ademais, foi adotado o teor de 0% de cal, para entender o comportamento de referência do solo expansivo, sem adição de cal.

As umidades iniciais foram obtidas com base na curva de compactação do solo, com energia Proctor normal, apresentada na Figura 26. Então, visando obter um melhor entendimento do comportamento do solo, será considerada a umidade ótima (23%) e dois pontos abaixo desse valor, escolhidos com base em ensaios teste realizados previamente. Assim, os níveis adotados para a umidade inicial foram de 16%, 19,5% e 23%. Destaca-se que não foram adotados pontos acima da umidade ótima, pois os ensaios prévios demonstram que amostras saturadas apresentam expansão reduzida.

Os pesos específicos adotados para essa pesquisa também foram definidos com o ensaio de compactação com energia Proctor normal, apresentado na Figura 26. Então, partiu-se do peso específico seco máximo ($\gamma_d = 15,5 \text{ kN/m}^3$) e variou-se esse valor em um ponto acima e dois abaixo, visando a viabilidade de execução dos corpos de prova. Assim, os níveis adotados para o peso específico seco foram de 13,5; 14,5; 15,5 e 16,5 kN/m^3 . A adoção de um peso específico seco relativamente baixo (13,5 kN/m^3) fundamentou-se na necessidade de preservar a representatividade das curvas de dosagem, frente um comportamento adverso discutido posteriormente nas amostras com $\gamma_d = 16,5 \text{ kN/m}^3$ e $w_i = 23\%$.

A Tabela 7 resume as variáveis e níveis adotadas para a realização dos ensaios de expansão em prensa edométrica, sendo realizados ensaios, no mínimo, em duplicata. Então, com base na combinação desses níveis adotados, foram realizados um total de 96 ensaios de expansão para as misturas solo-cal.

Tabela 7: Variáveis e níveis adotados para o ensaio de expansão unidimensional

Variável	Níveis
Teor de Cal	0%; 2%; 3%; 4%
Umidade de Compactação	16%; 19,5%; 23%
Peso Específico (kN/m^3)	13,5; 14,5; 15,5; 16,5

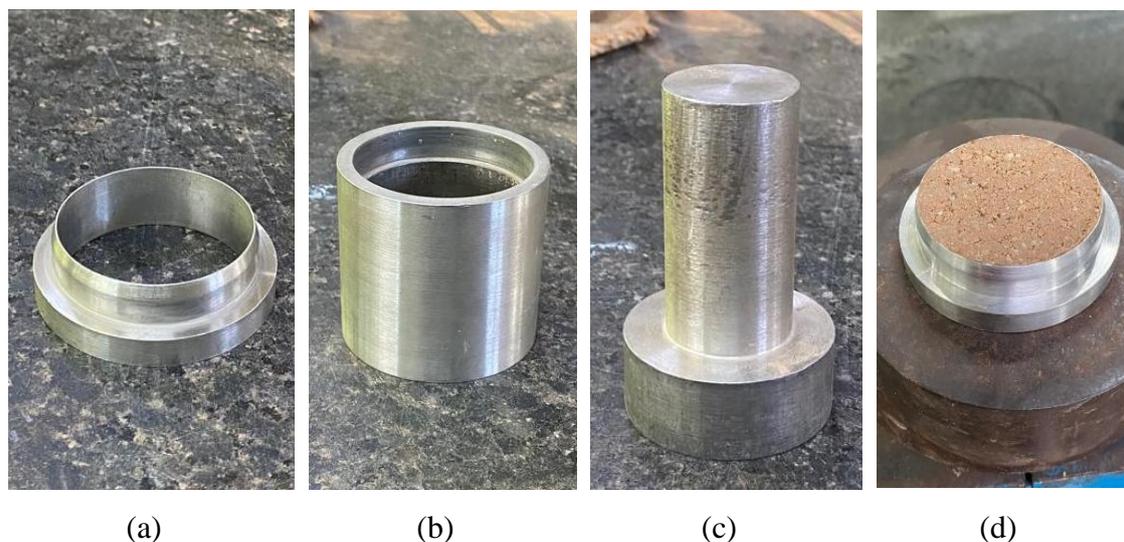
3.2.2. Preparação de amostras

A norma D4546 (ASTM, 2021), referente ao ensaio de expansão edométrica, recomenda que a menor dimensão do corpo de prova seja 6 vezes maior que o diâmetro das partículas que lhe constituem. Por essa razão, o solo expansivo destorroado foi passado na peneira com abertura de 2 mm. Após o peneiramento, foi feita a pesagem e adição de cal, seguido de sua homogeneização, visando atingir os teores de cal definidos

no planejamento. Na sequência, com auxílio de uma proveta, adicionou-se e homogeneizou-se a quantidade de água para atingir a umidade inicial definida no planejamento. Esse procedimento de preparação do solo foi executado para as amostras utilizadas nos ensaios de expansão, bem como, nos ensaios de sucção.

A moldagem de amostras para os ensaios de expansão foi realizada imediatamente após a mistura dos materiais e diretamente no anel metálico da prensa edométrica (Figura 30 (a)), com auxílio de um colarinho metálico (Figura 30 (b)). A mistura solo-cal foi compactada estaticamente com o auxílio de um soquete metálico (Figura 30 (c)), em camada única, até atingir a altura do anel edométrico. O corpo de prova finalizado pode ser visto na Figura 30 (d), sendo um CP confinado pelo anel edométrico, com 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura. Imediatamente após a moldagem, o CP era levado para a prensa edométrica para início do ensaio. Assim, todos os ensaios de expansão edométricos foram realizados com 0 dias de cura.

Figura 30: Processo de moldagem para ensaios de expansão (a) anel edométrico (b) colarinho (c) soquete (d) corpo de prova



A moldagem de amostras para os ensaios de sucção foi realizada imediatamente após a mistura dos materiais e foi feita em um molde metálico tripartido com auxílio de um soquete metálico, que podem ser vistos na Figura 31 (a) e (b) e Figura 30 (c), respectivamente. A mistura solo-cal foi colocada no molde (50 mm de diâmetro interno) e compactada estaticamente, em camada única de 20 mm. Então, o molde era aberto para que o CP fosse coletado. Na sequência, o CP era imediatamente empregado na execução do ensaio, assim, todos os ensaios de sucção foram iniciados com 0 dias de cura.

Figura 31: Molde tripartido usado para moldagem das amostras de sucção, sendo (a) montado (b) desmontado



(a)

(b)

Ademais, tanto para os ensaios de expansão quanto sucção, os CPs foram moldados individualmente, com verificação da umidade de moldagem pela estufa, com pelo menos duas cápsulas, conforme a norma NBR 6457 (ABNT, 2024b). A conferência do peso específico de moldagem foi feita a partir da aferição da massa e volume no final do processo de compactação.

3.2.3. Ensaio de expansão

Os ensaios de expansão unidimensional foram realizados conforme a norma D4546 (ASTM, 2021) método C. O CP moldado e confinado no anel metálico foi posicionado na prensa edométrica (Figura 32), onde recebeu a carga axial de 10 kPa para assentamento do sistema. Esse carregamento axial foi definido com base na metodologia adotada por Guimaraes (2023) e outros estudos brasileiros (Ferreira *et al.*, 2017; Ferreira e Ferreira, 2009; Paiva *et al.*, 2016; Silva, Bello e Ferreira, 2020; Silvani *et al.*, 2020; Silvani, Silva e Guedes, 2023). Na sequência, os CPs eram inundados com água e tiveram sua deformação axial monitorada com auxílio do extensômetro do equipamento, que possui precisão de 0,01 mm. Assim, foram realizadas leituras nos intervalos 0; 0,5; 1; 2; 4; 8; 15; 30 minutos e 1, 2, 4, 8, 12, 24, 36, 48, 60 e 72 horas. Assim, a expansão livre da amostra é igual a deformação axial sofrida após a inundação.

Figura 32 : Prensas edométricas utilizadas para realização dos ensaios de expansão unidimensional sendo (a) prensa 1 e (b) prensa 2



(a)

(b)

Após obtida a expansão livre, o CP foi adensado por meio de incrementos sucessivos de carga, até que retornasse a altura inicial (20mm). Assim, a tensão de expansão foi obtida a partir da carga necessária para retornar o CP ao seu estado inicial (antes da inundação). Então, a partir dos 10 kPa, foram feitos incrementos de carga de 12,5; 25; 50; 100; 200 kPa.

3.2.4. Adsorção de Azul de Metileno

O ensaio de adsorção de azul de metileno foi realizado conforme a norma C837 (ASTM, 2024b), para o solo expansivo, bem como, para o solo expansivo com diferentes adições de cal. A partir desse ensaio foi possível calcular a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e estimar a superfície específica do solo.

A execução do ensaio iniciou com a disposição da amostra a ser analisada (1g de solo) em um béquer, com a adição de 300mL de água destilada, seguida da agitação até que seja observado a completa dispersão do solo. Em seguida, foi feita a titulação e agitação, com a solução de azul de metileno (concentração molar de 10g/L), até que se atinja a máxima capacidade adsortiva do solo. A verificação da completa adsorção do solo

é feita com auxílio de um papel filtro, em que, ao gotejar a solução de solo com azul de metileno, ocorre a formação de um halo azul, como visto na Figura 33.

Figura 33: Execução do ensaio de adsorção de azul de metileno



Assim, com base no volume de Azul de Metileno utilizado na amostra, foi possível calcular sua capacidade de troca catiônica (CTC), com a Equação 6, proposta pela norma C837 (ASTM, 2024b).

$$CTC = \frac{C \times V}{m_s} \times 100 \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

CTC: Capacidade de Troca Catiônica (mEq/100g)

C: Concentração da solução de Azul de Metileno (mEq/mL)

V: Volume utilizado da solução de Azul de Metileno (mL)

m_s : Massa de solo utilizada como amostra (g)

A estimativa da superfície específica foi feita a partir da proposição de Hang e Brindley (1970), conforme a Equação 7. Demais estudos da literatura também utilização essa proposição para solos cimentados (Guimarães, 2023; Silva, 2022; Souza, 2023).

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

Onde:

SE: Superfície Específica (m²/g)

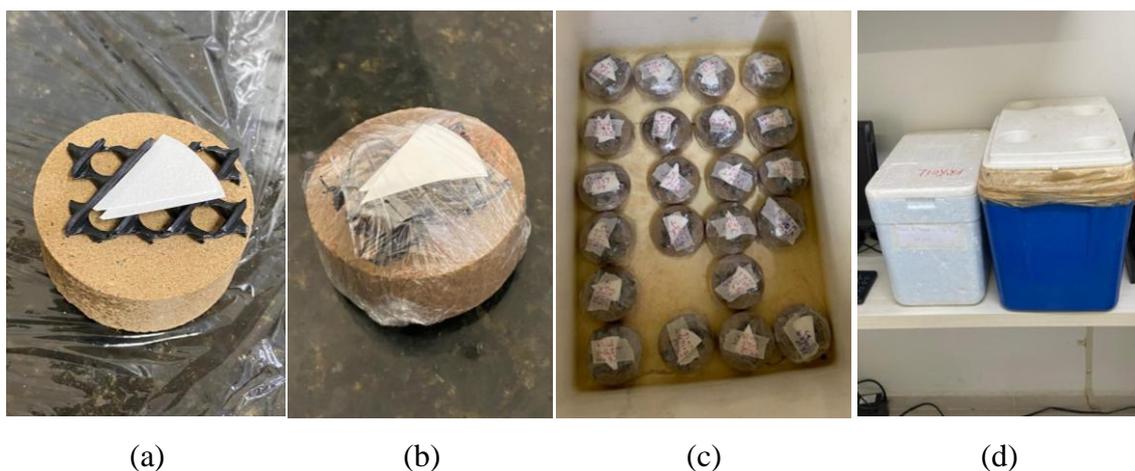
CTC: Capacidade de Troca Catiônica (mEq/100g)

3.2.5. Ensaio de sucção

O ensaio para mensurar a sucção total das amostras foi realizado pela metodologia do papel filtro, conforme a norma D5298 (ASTM, 2016). O método é baseado na absorção e equilíbrio de umidade entre a amostra de solo e um papel filtro calibrado, sem que haja contato físico entre eles. O ensaio se destaca pela sua simplicidade e capacidade de trazer resultados confiáveis para os mais diversos tipos de solos (Chandler, Crilly e Montgomery-Smith, 1992; Chandler e Gutierrez, 1986; Marinho, 1995). Nesta pesquisa, foi utilizado o papel Whatmann nº 42.

A execução do ensaio consistiu na utilização de dois papéis filtro sobre o CP de solo compactado, com uma rede plástica impedindo o contato direto com o CP (Figura 34 (a)). Então, esse conjunto, foi envolvido por quatro voltas de plástico filme, visando isolar o sistema do ar atmosférico e impedir a perda de umidade da amostra (Figura 34 (b)). Na sequência, as amostras embaladas foram armazenadas em caixas térmicas, para reduzir os efeitos da variação de temperatura do ambiente externo (Figura 34 (c) e (d)). As amostras foram deixadas em repouso por 15 dias, para que a umidade do papel filtro entrasse em equilíbrio com o corpo de prova, conforme recomendação de (Marinho, 1994).

Figura 34: Execução do ensaio de sucção (a) inserção da tela plástica e papel filtro (b) embalagem com plástico filme (c) disposição em caixa térmica (d) caixas térmicas utilizadas



Ao final do período de repouso, as amostras foram desembaladas e o papel filtro foi coletado e imediatamente pesado em uma balança analítica, com precisão de 0,0001g. Então, o papel filtro foi posicionado em cápsula metálica (Figura 35) e levado à estufa

para secagem, à 105°C por 2 horas. Após seco, o papel filtro foi novamente pesado na balança analítica.

Figura 35: Papéis filtro coletados e posicionados em cápsulas metálicas



Por meio da umidade obtida no papel filtro, foi possível obter a sucção total das amostras por meio das Equações 8 e 9, propostas por Chandler, Crilly e Montgomery-Smith, (1992) e adaptadas por Marinho, (1995) para o papel Whatmann nº 42 e solos tropicais. As equações foram desenvolvidas para solos naturais, porém estudos anteriores mostraram resultados satisfatórios para solos estabilizados (Araújo, 2022; Silvani, 2013).

$$\text{Para } w_p \leq 47\%, S = 10^{(4,84 - 0,0622w_p)} \quad \text{Eq. (8)}$$

$$\text{Para } w_p > 47\%, S = 10^{(6,05 - 2,48 \log w_p)} \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde:

w_p : Umidade do papel filtro

S: Sucção da amostra

3.2.6. Parâmetro η/L_{iv}

O método de dosagem estabelecido por Consoli, Lopes Junior e Heineck (2009) se baseia na relação entre porosidade e teor volumétrico de cal. Conforme proposto e validado por Silvani et al. (2020) e Guimaraes (2023) será adotado um coeficiente de ajuste no denominador de -0,26. As variáveis modeladas foram expansão livre e tensão de expansão das misturas solo-cal.

A porosidade inicial (η) da amostra foi calculada a partir da razão entre o volume de vazios e o volume total do corpo de prova. Fazendo o desenvolvimento da expressão têm-se como resultado a Equação 10.

$$\eta = 100 \times \left\{ 1 - \left\{ \frac{\gamma_d \times \{1 - [L/(1+L)]\}}{\gamma_{sS}} + \frac{\gamma_d \times [L/(1+L)]}{\gamma_{sL}} \right\} \right\} \quad \text{Eq. (10)}$$

Onde:

η : Porosidade

L: Teor gravimétrico de cal

γ_d : Peso específico aparente seco da amostra (kN/m^3)

γ_{sS} : Peso específico real do solo (kN/m^3)

γ_{sL} : Peso específico real da cal (kN/m^3)

O teor volumétrico de cal da amostra foi calculado a partir da razão entre o volume de cal adicionado e o volume total do CP. Fazendo uma substituição na expressão têm-se como resultado a Equação 11.

$$L_{iv} = \frac{V_L}{V_{CP}} = \frac{m_L/\gamma_{sL}}{V_s} \quad \text{Eq. (11)}$$

Onde:

L_{iv} : Teor volumétrico de cal

V_L : Volume de cal

V_{CP} : Volume do CP

m_L : Massa de cal

γ_{sL} : Peso específico real da cal

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção serão apresentados e discutidos os resultados do planejamento experimental realizado. Assim, serão contemplados os ensaios de adsorção de azul de metileno, sucção e expansão em célula edométrica.

4.1. Adsorção de azul de metileno

A partir dos ensaios de adsorção de azul de metileno foram obtidas a CTC do solo expansivo, bem como, para diferentes adições de cal, conforme exposto na Figura 36. Ademais, as estimativas da superfície específica estão indicadas na Figura 37. Assim, o solo expansivo apresentou CTC de 75,04 mEq/100g e superfície específica de 585,60 m²/g, valores esses, considerados elevados, reforçando a natureza fina do solo e a alta afinidade à absorção de água. Valores altos de CTC e superfície específica são característicos de solos com comportamento expansivo, além disso, refletem a alta carga negativa presente na superfície das partículas de solo (Mitchell e Soga, 2005; Nalbantoğlu, 2004). Estudos reportam valores similares para solos ricos em montmorilonita (Maček *et al.*, 2013; Meier e Nüesch, 1999; Yukselen-Aksoy e Kaya, 2010).

Figura 36: CTC do solo em função da adição de cal

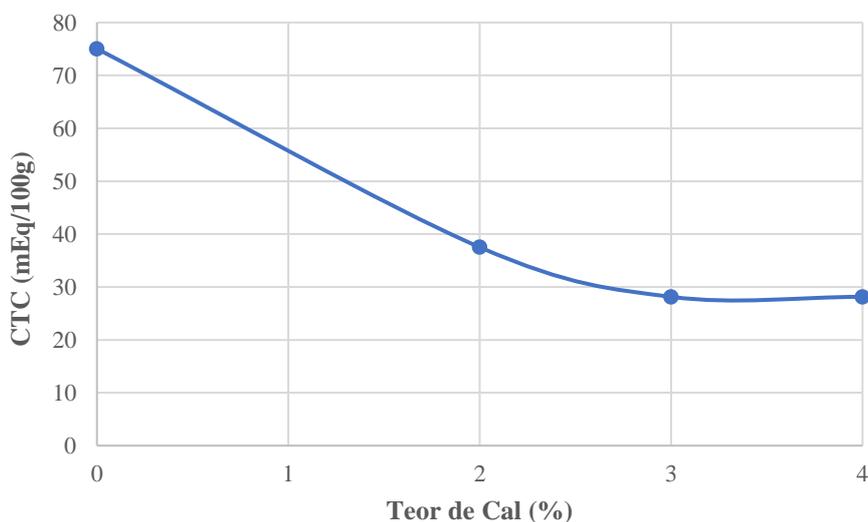
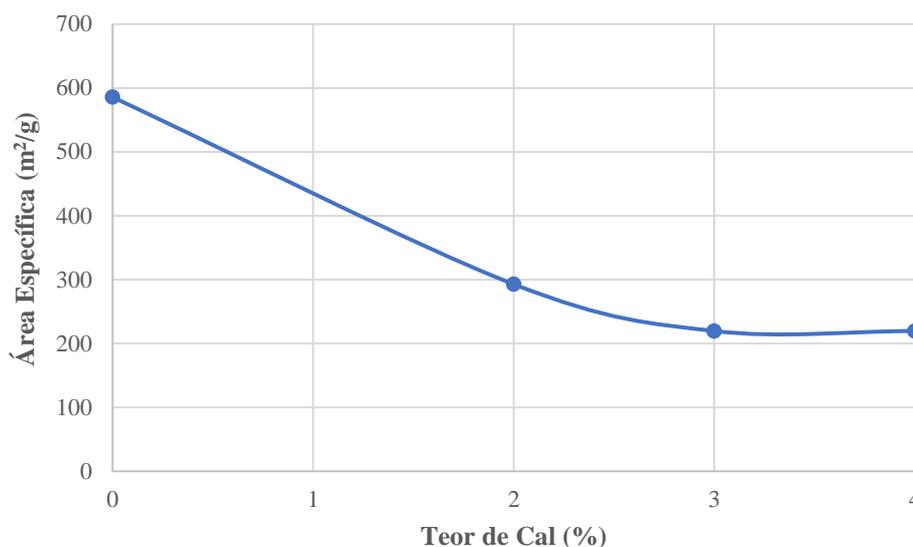


Figura 37: Superfície específica do solo em função da adição de cal



Após a adição de até 4% de cal, a CTC estabilizou em 28,14 mEq/100g e a superfície específica em 219,60 m²/g, (redução relativa de 62,5%) indicando a totalidade do processo de floculação química do solo, corroborando com o valor do ICL (4% de cal). Esse comportamento é explicado, pois, ocorre a troca catiônica entre os íons Ca²⁺ da cal e os cátions de menor carga dos argilominerais, gerando uma redução da carga negativa dos argilominerais e tornando-os mais grossos e estáveis. Assim, a reação com a cal provoca alterações mineralógicas e tendem a reduzir a CTC e a superfície específica do solo, tornando-o menos suscetível a absorção de água (Diamond e Kinter, 1965; Nalbantoğlu, 2004; Silvani, Silva e Guedes, 2023).

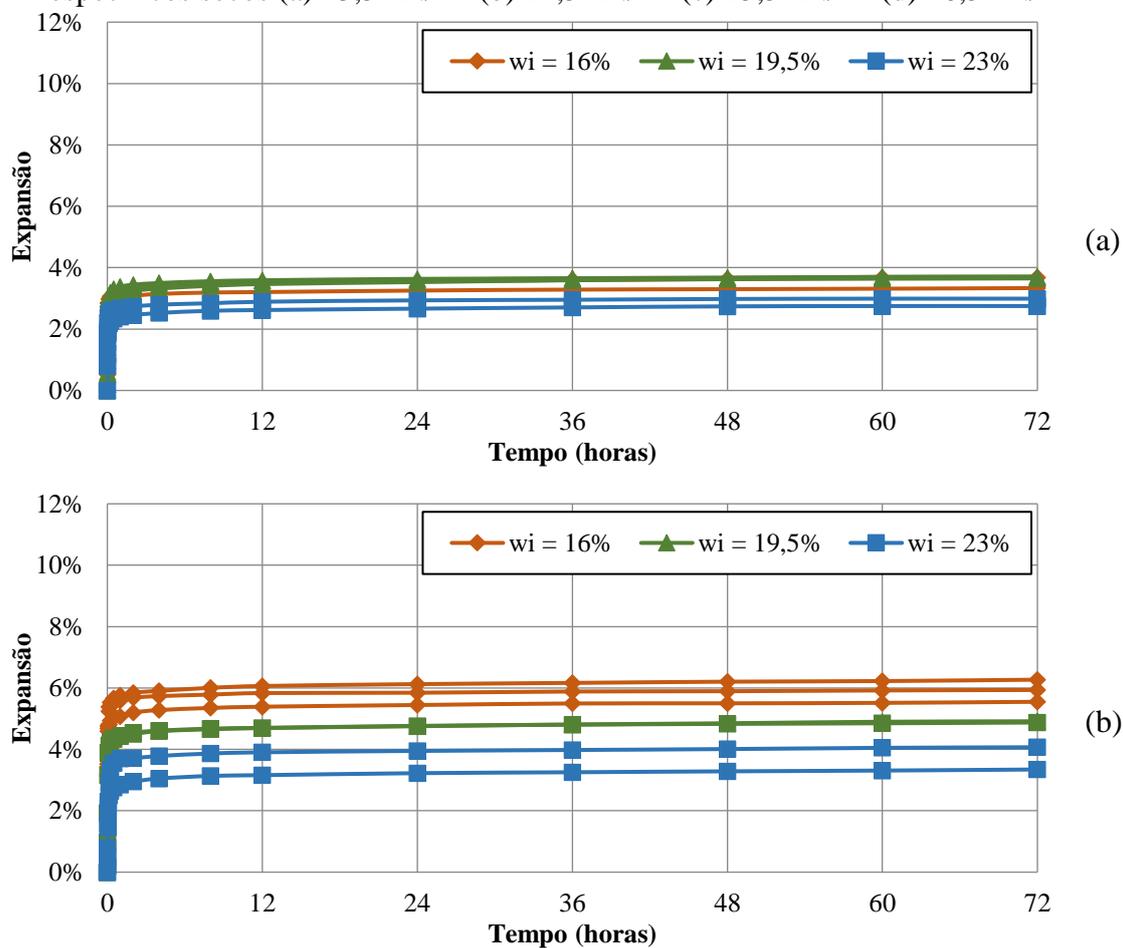
Em solos expansivos, essa redução da CTC e área específica indica a redução da instabilidade volumétrica dos argilominerais, pois, a substituição pelos cátions Ca²⁺ resulta em maior força de ligação na microestrutura e uma menor entrada de água na estrutura dos argilominerais (Dang, Khabbaz e Ni, 2021; Hilt e Davidson, 1960). Resultados similares foram observados por Nalbantoğlu, (2004), ao estudar argilas estabilizadas com cinza volante tipo C, e por Silvani, Silva e Guedes, (2023) ao estudar uma mistura solo/bentonita estabilizada com cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

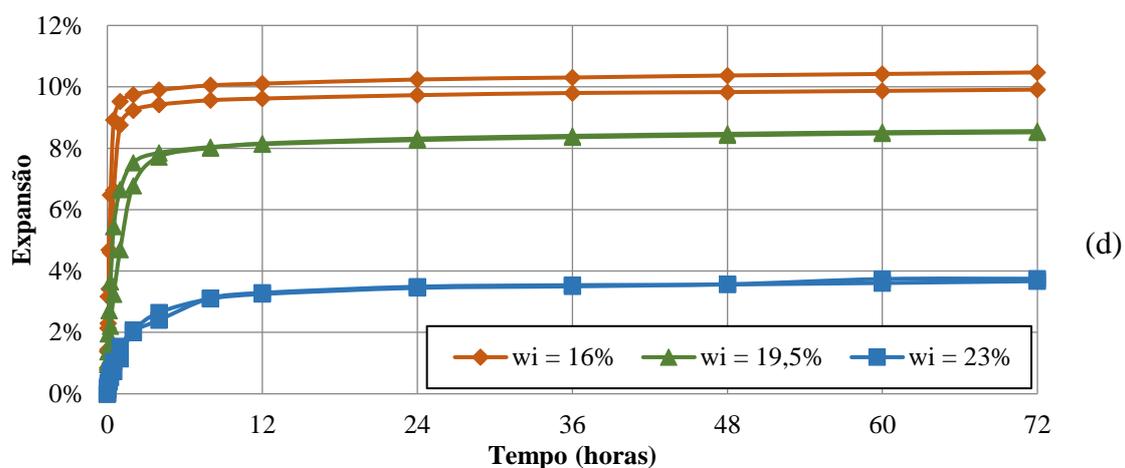
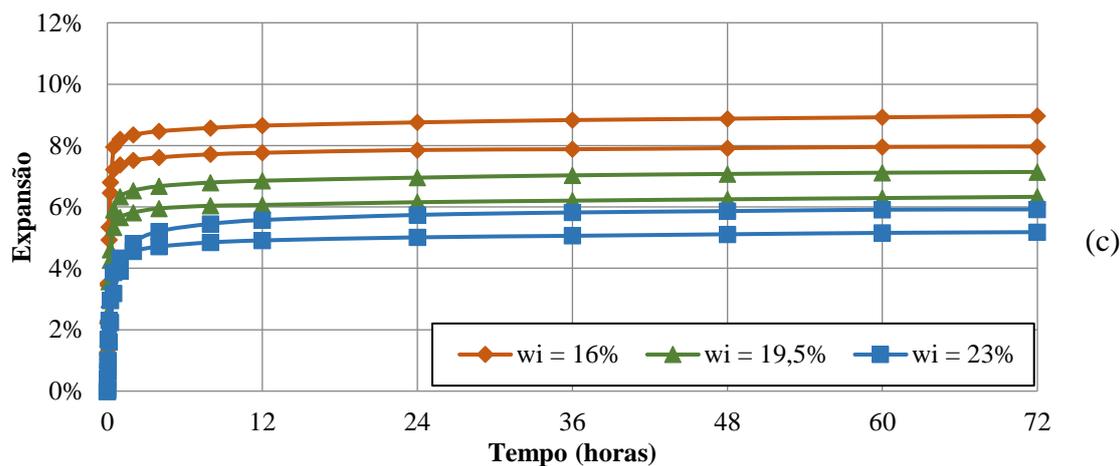
4.2. Ensaio de Expansão do Solo Puro

A partir dos ensaios de expansão unidimensional em prensa edométrica foram obtidos os comportamentos do solo puro (0% de cal), considerando os diferentes níveis adotados para peso específico seco (13,5; 14,5; 15,5; 16,5 kN/m³) e umidade inicial (16%; 19,5%; 23%).

A Figura 38 ilustra o comportamento obtidos para as amostras do solo puro, sendo apresentadas a expansão desenvolvida em função do tempo. Observa-se que as amostras de solo puro requerem algumas horas para atingir a estabilização da expansão, e esse tempo tende a aumentar ligeiramente à medida que o peso específico seco da amostra se eleva. Esse fenômeno ocorre porque, quanto maior a compactação da amostra, menor é o índice de vazios internos, conseqüentemente, há uma diminuição da permeabilidade do material (Menger *et al.*, 2020; Osinubi, 1998; Rawi e Awad, 1981). Então, a compactação dificulta a penetração da água na matriz do solo e, por extensão, o processo de hidratação dos argilominerais presentes no interior da amostra.

Figura 38: Expansão do solo puro ao longo do tempo, para os diferentes pesos específicos secos (a) 13,5 kN/m³ (b) 14,5 kN/m³ (c) 15,5 kN/m³ (d) 16,5 kN/m³





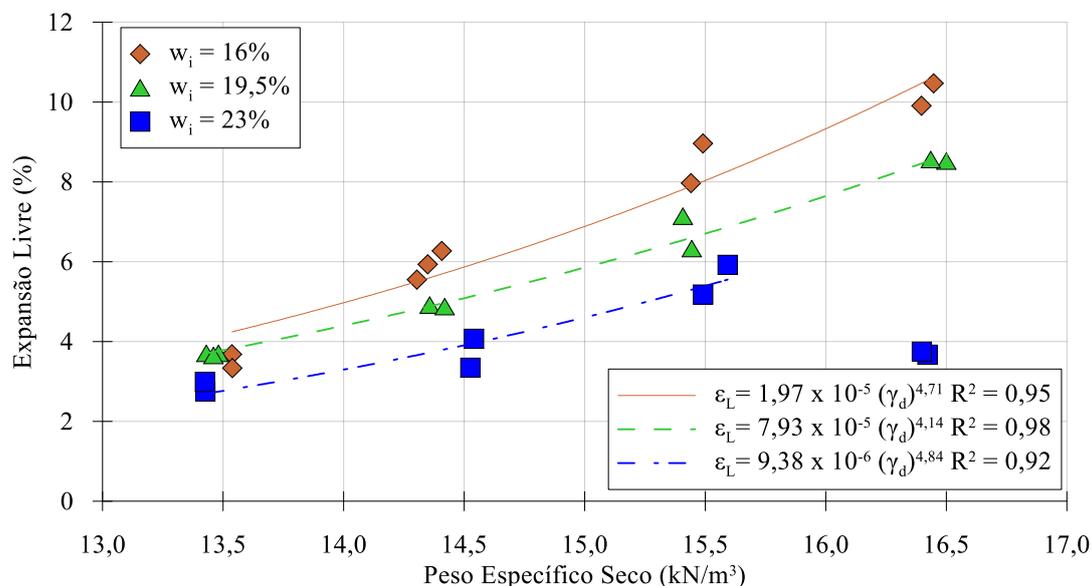
Além disso, observa-se um aumento no tempo necessário para a estabilização da expansão à medida que a umidade inicial da amostra se eleva, especialmente em solos com maior peso específico seco. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que a umidade de compactação influencia diretamente a estrutura final do solo. Amostras compactadas em condições de baixa umidade tendem a apresentar uma estrutura mais floculada, caracterizada pela presença significativa de macroporos que facilitam a percolação da água (Ferber *et al.*, 2009; Mitchell, 1956; Seed e Chan, 1959). Essa maior permeabilidade acelera o processo de hidratação dos argilominerais, reduzindo o tempo necessário para que a expansão se estabilize. Em contrapartida, amostras compactadas com umidade inicial elevada apresentam uma estrutura mais dispersa, com menor conectividade entre os poros e menor permeabilidade vertical (Guedes *et al.*, 2024; Mitchell, 1956; Osinubi, 1998; Seed e Chan, 1959). Por isso, as amostras compactadas com elevada umidade apresentam dificuldade para entrada de água, prolongando o tempo de estabilização da expansão.

As amostras com menor peso específico seco, apesar de serem compactadas em condições de alta umidade, não desenvolvem uma estrutura significativamente mais

dispersa. Isso ocorre porque a baixa energia de compactação aplicada nessas condições não é suficiente para promover uma orientação expressiva das partículas do solo (Mitchell, 1956; Seed e Chan, 1959). Como consequência, a conectividade entre os poros e o grau de flocculação da estrutura permanecem relativamente constantes (entre as diferentes amostras), justificando a ausência de variação significativa no tempo de estabilização da expansão, mesmo com o aumento da umidade inicial.

A Figura 39 ilustra o compilado de todos os resultados obtidos para expansão livre em função do peso específico, para o solo expansivo. A partir disso, é possível observar a formação de três curvas de tendência, sendo uma para cada umidade inicial adotada, destaca-se os elevados valores para o R^2 . Com isso, pode-se afirmar que, independentemente da umidade inicial, quanto maior o peso específico seco, maior a expansão livre desenvolvida pela amostra. Uma exceção tem que ser feita para a amostra com $\gamma_d = 16,5 \text{ kN/m}^3$ e $w_i = 23\%$, que apresentou comportamento destoante, nesta análise, apresentando expansão livre menor do que o esperado. Essa amostra apresenta saturação inicial teórica de 100% e, por causa disso, não houve variação significativa de umidade ao sofrer inundação, logo, a expansão livre desenvolvida refletiu essa característica, resultando num valor baixo e destoante das demais amostras.

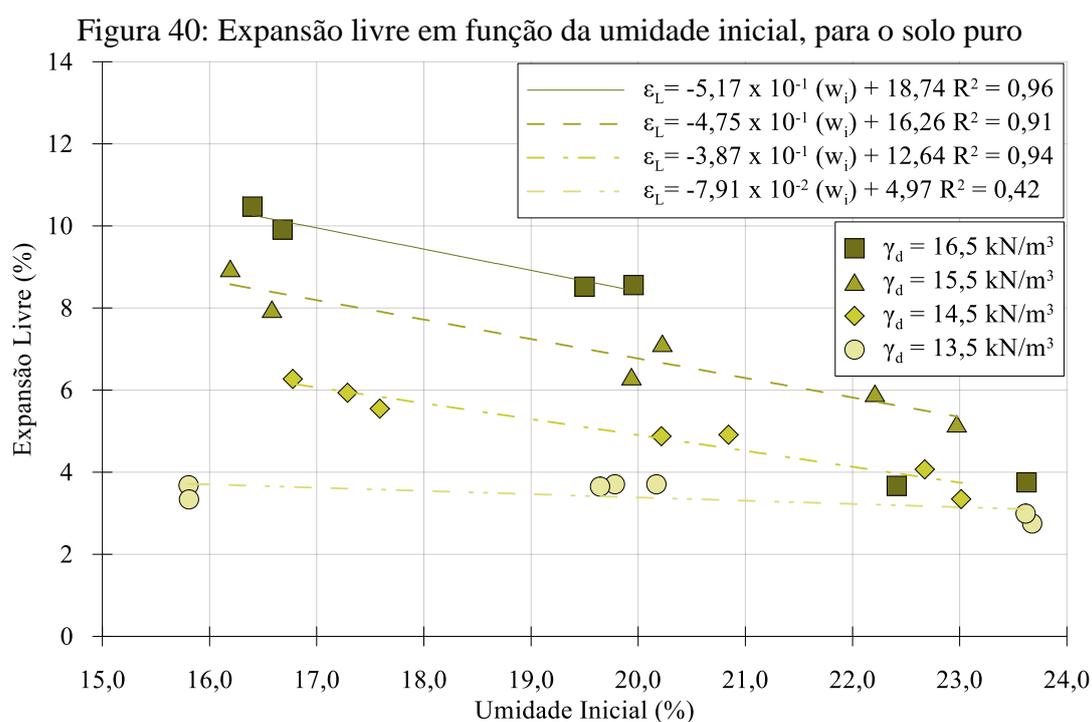
Figura 39: Expansão livre em função do peso específico seco, para o solo puro



A relação diretamente proporcional obtida entre expansão livre e peso específico seco corrobora com diversos estudos anteriores, que trabalharam com diversos solos expansivos sem estabilização (Consoli, Araújo, *et al.*, 2020; Ferber *et al.*, 2009; Silvani

et al., 2020, 2024; Silvani, Silva e Guedes, 2023). Com destaque aos estudos de Guimaraes (2023), Silvani et al., (2020), Yan e Wu, (2009) que obtiveram uma relação exponencial entre essas variáveis, assim como observado na presente pesquisa. O peso específico seco relaciona-se com a quantidade de argilominerais presentes na amostra, bem como, relaciona-se inversamente com a quantidade de vazios (macroporos) disponíveis para reorganização, logo, ao ocorrer a inundação, o solo expandirá mais, proporcionalmente ao quão densa estiver sua estrutura (Consoli, Araújo, *et al.*, 2020; Silvani *et al.*, 2020).

A Figura 40 expõe o compilado dos resultados de expansão livre em função da umidade inicial, para o solo expansivo. Assim, é possível observar a formação de quatro curvas de tendência, respectivamente, para cada peso específico adotado, sendo obtidos elevados valores para o R^2 . Logo, pode-se estabelecer, que, quanto maior a umidade inicial, menor a expansão livre desenvolvida pelo solo, com exceção das amostras com $\gamma_d = 13,5 \text{ kN/m}^3$, que apresentaram um comportamento horizontalizado, indicando a que a umidade inicial não influenciou de forma significativa na expansão. Como possível justificativa, essas amostras apresentam a maior quantidade de macroporos internos, devido ao baixo peso específico seco (Ferber *et al.*, 2009; Seed e Chan, 1959). Então, possuem bastante espaço interno para reorganização de suas partículas, o que resultou em baixos valores de expansão livre e pouca influência da umidade inicial.

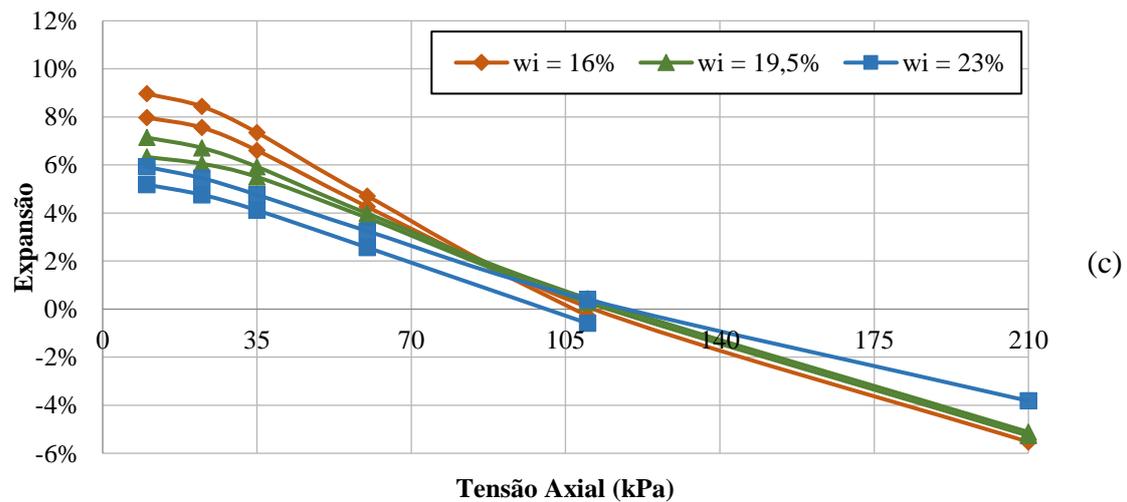
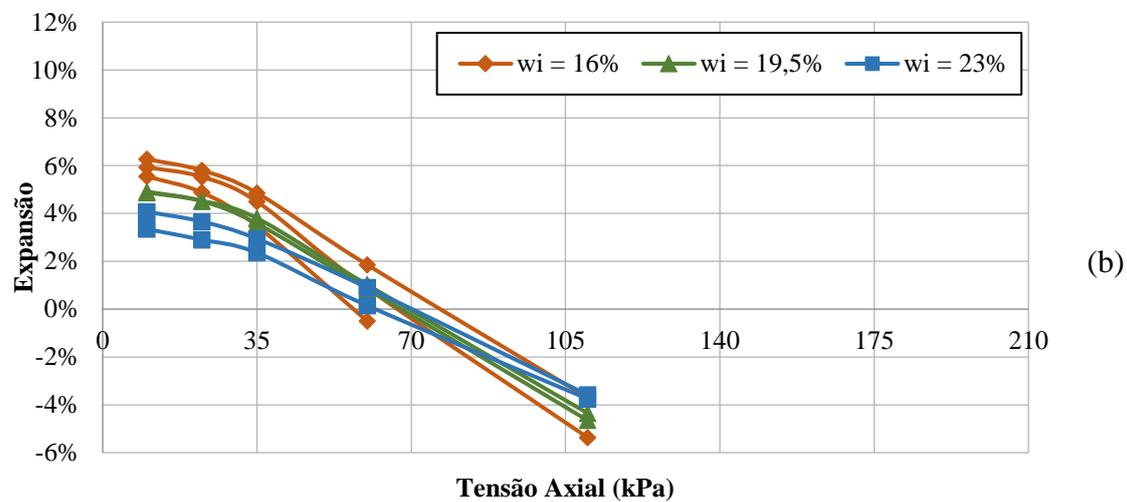
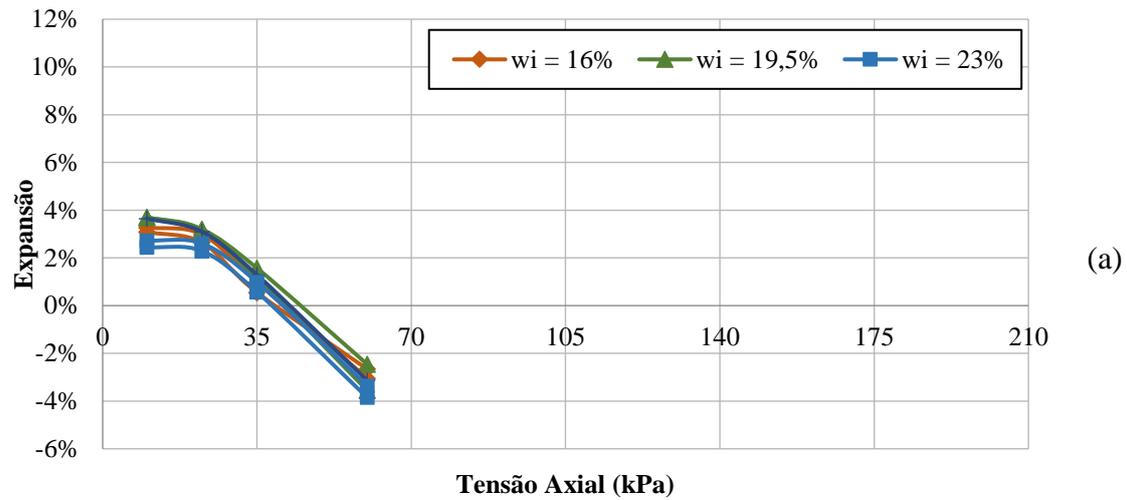


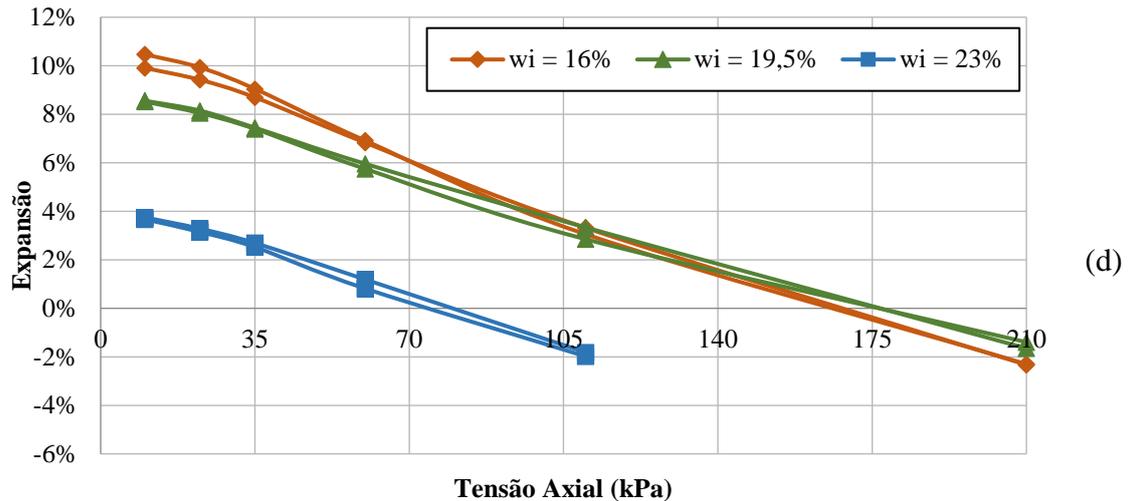
Nessa análise as amostras com $\gamma_d = 16,5 \text{ kN/m}^3$ e $w_i = 23\%$ também apresentaram comportamento destoante das demais, expandindo relativamente pouco comparada as demais, provavelmente devido a sua saturação inicial teórica de 100%. Nesse sentido, para misturas de bentonita/caulinita/cimento compactadas no ramo úmido com mesmo peso específico seco e diferentes umidades, Consoli, Araújo, et al., (2020) encontraram comportamento quase coincidente, ao analisar a expansão livre em função do tempo. Ademais, as misturas no ramo úmido apresentaram expansão sensivelmente inferior as amostras compactadas no ramo seco.

Essa relação inversamente proporcional entre umidade inicial e expansão livre está de acordo com as observações feitas por diversos estudos, com diferentes solos expansivos sem estabilização (Ferber *et al.*, 2009; Puppala, Manosuthikij e Chittoori, 2013; Yan e Wu, 2009). A umidade inicial está diretamente atrelada a saturação e ao inchamento dos microporos dos argilominerais expansivos, previamente à moldagem da amostra, logo, ao serem adotadas maiores umidades iniciais, o solo tende a desenvolver menores deformações de expansão, devido a menor disponibilidade de espaço para adsorção adicional de água nos microporos (Ferber *et al.*, 2009).

A Figura 41 ilustra o carregamento das amostras, após a realização da expansão livre, para que seja obtida a tensão de expansão. Observa-se um comportamento bilinear nas amostras com menor peso específico seco. Esse comportamento está provavelmente relacionado à desproporção entre os vazios internos, resultante da baixa compactação (Khattab, Al-Mukhtar e Fleureau, 2007; Mitchell, 1956; Seed e Chan, 1959). Inicialmente, a aplicação da carga provoca um rearranjo estrutural mais discreto, uma vez que a estrutura inicial consegue resistir ao baixo carregamento. Em um segundo estágio, o rearranjo estrutural torna-se mais acentuado, devido a perda da estrutural inicial, ocorre o fechamento dos vazios internos de maior calibre e a reorganização das partículas do solo, resultando em um maior recalque da amostra. Observa-se também que, para as amostras mais compactas, o comportamento se apresenta de forma mais linear. Isso provavelmente se deve a distribuição mais uniforme dos vazios internos, sem a formação de poros desproporcionalmente grandes (Mitchell, 1956; Seed e Chan, 1959). Levando a um comportamento mais constante durante a compressão.

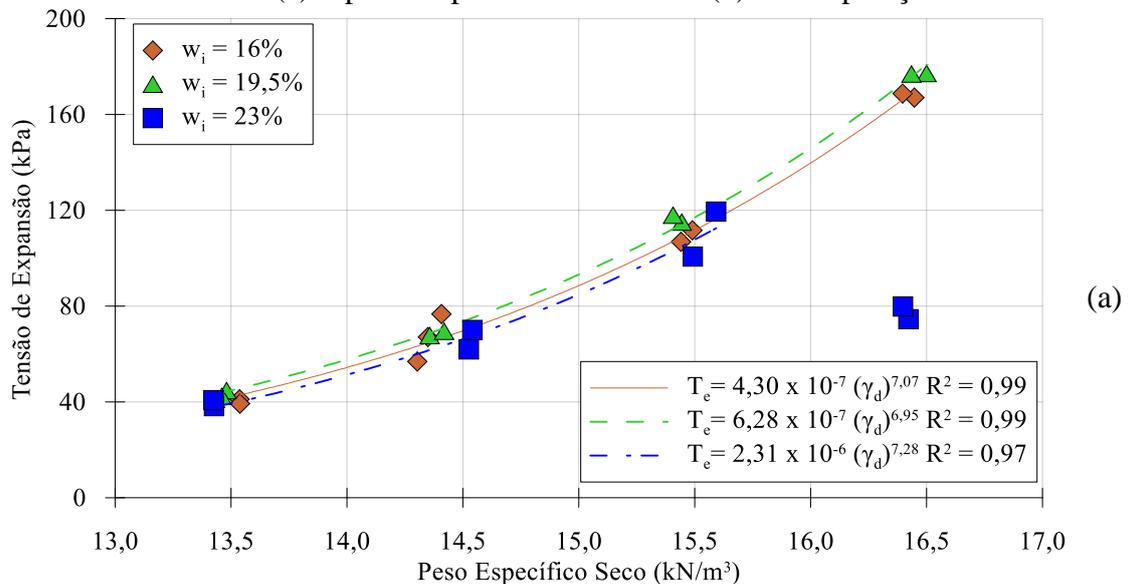
Figura 41: Carregamento do solo puro após a expansão livre, para os pesos específicos secos (a) $13,5 \text{ kN/m}^3$ (b) $14,5 \text{ kN/m}^3$ (c) $15,5 \text{ kN/m}^3$ (d) $16,5 \text{ kN/m}^3$

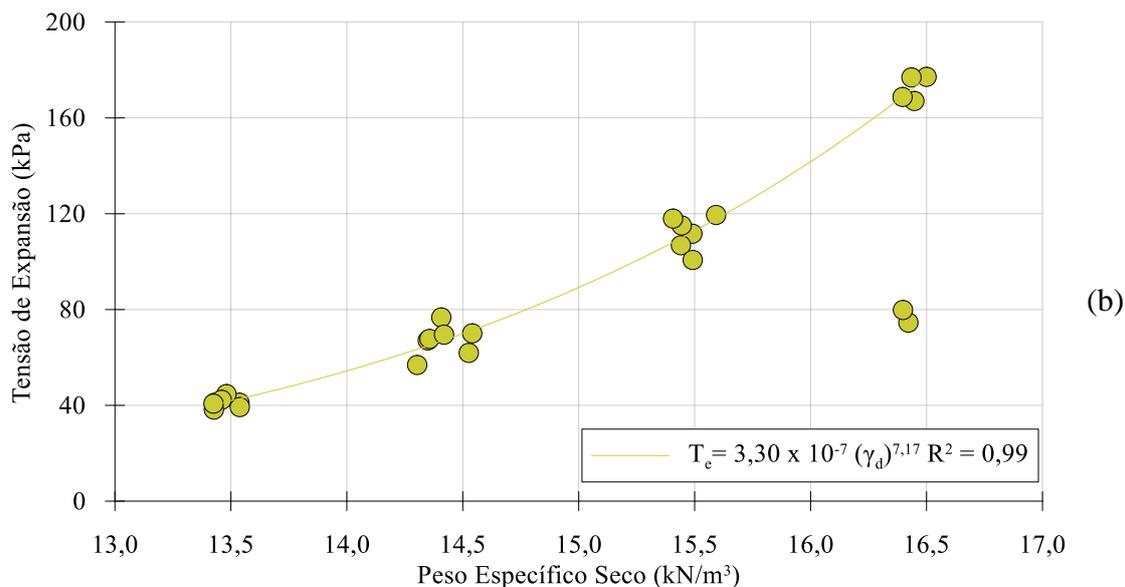




A Figura 42 (a) expõe o compilado de todos os resultados obtidos para tensão de expansão em função do peso específico, para o solo expansivo. Assim, foi possível observar o comportamento diretamente proporcional entre o peso específico e a tensão de expansão desenvolvida pelo solo. Esse comportamento provavelmente se deve ao maior contato entre as partículas e a ausência de macroporos para reorganização, resultando em maior tensão na estrutura ao sofrer inundação (Ferber *et al.*, 2009; Guimarães, 2023). Ao plotar as curvas de tendência, para cada umidade inicial, observou-se que são praticamente coincidentes, indicando que, as diferentes umidades iniciais analisadas, não afetam a tensão de expansão desenvolvida pelo solo expansivo. Por essa razão, na Figura 42 (b) foi feito um novo ajuste sem segmentar os dados para as diferentes umidades iniciais adotadas, obtendo um R^2 de 0,9858.

Figura 42: Tensão de expansão em função do peso específico seco, para o solo puro sendo (a) separadas por umidade inicial (b) sem separação





Assim como foi observado na análise a expansão livre, a tensão de expansão das amostras com $\gamma_d = 16,5 \text{ kN/m}^3$ e $w_i = 23\%$ também apresentaram comportamento divergente do esperado, quando comparado com as demais amostras do solo puro. Devido a saturação teórica inicial de 100%, grande quantidade dos microporos dos argilominerais já encontravam saturados antes do início do ensaio, por isso, o processo de inundação gerou pouca adsorção de água e uma reorganização estrutural de menor grau, refletindo numa menor tensão na estrutura.

4.3. Ensaio de Expansão do Solo Expansivo Estabilizado com Cal

A partir dos ensaios de expansão unidimensional em prensa edométrica, também foram obtidos os comportamentos do solo expansivo estabilizado com três teores de cal (2%, 3% e 4%), considerando os diferentes níveis adotados para peso específico seco (13,5; 14,5; 15,5; 16,5 kN/m³) e umidade inicial (16%; 19,5%; 23%).

4.3.1. Expansão livre do solo expansivo estabilizado com cal

As Figura 43, Figura 44 e Figura 45 ilustram a expansão em função do tempo das amostras do solo estabilizado com 2%, 3% e 4% de cal, respectivamente, separados para os diferentes pesos específicos seco.

Figura 43: Expansão do solo com 2% de cal para os diferentes pesos específicos secos (a) 13,5 kN/m³ (b) 14,5 kN/m³ (c) 15,5 kN/m³ (d) 16,5 kN/m³

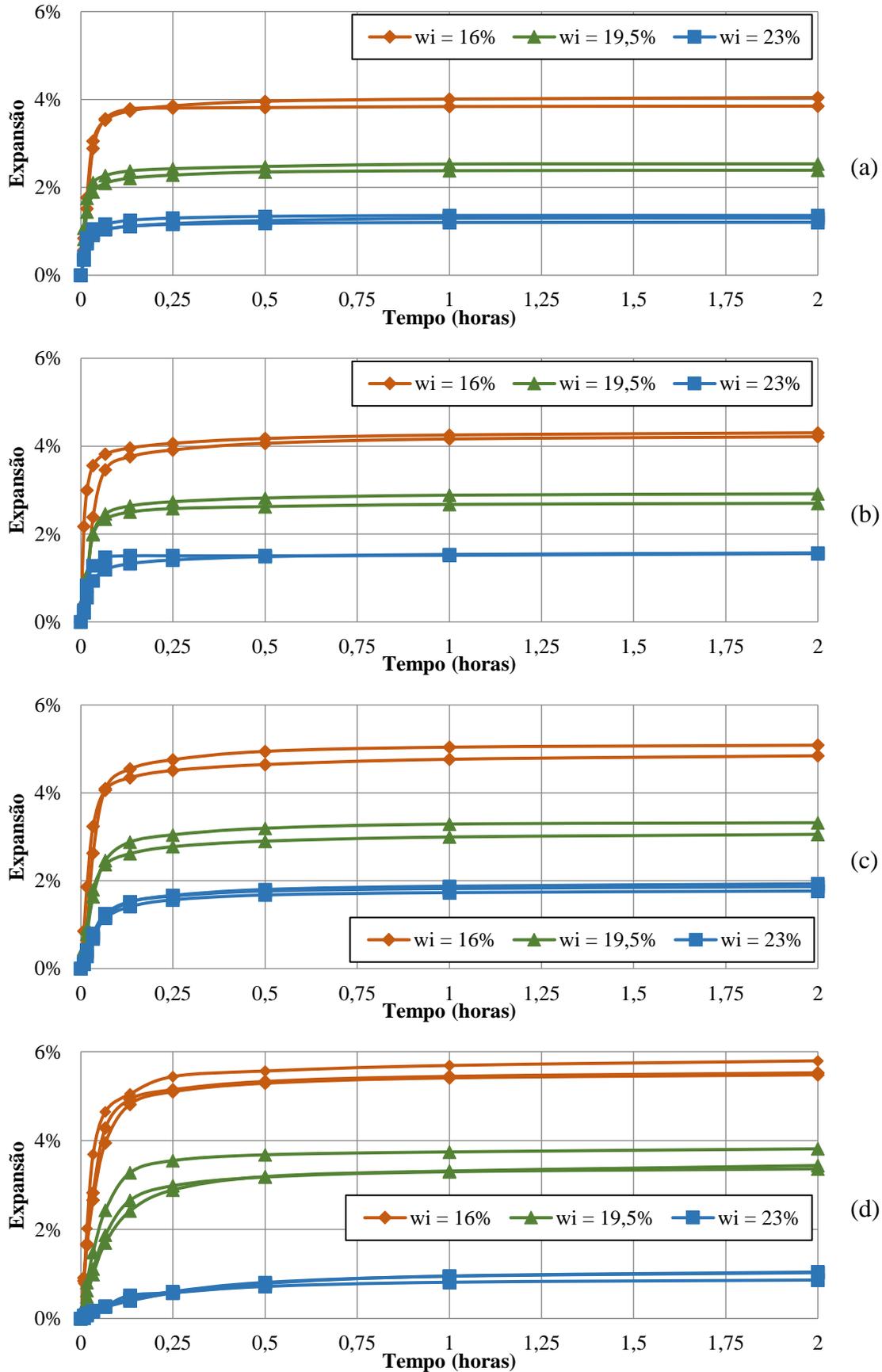


Figura 44: Expansão do solo com 3% de cal para os diferentes pesos específicos secos (a) 13,5 kN/m³ (b) 14,5 kN/m³ (c) 15,5 kN/m³ (d) 16,5 kN/m³

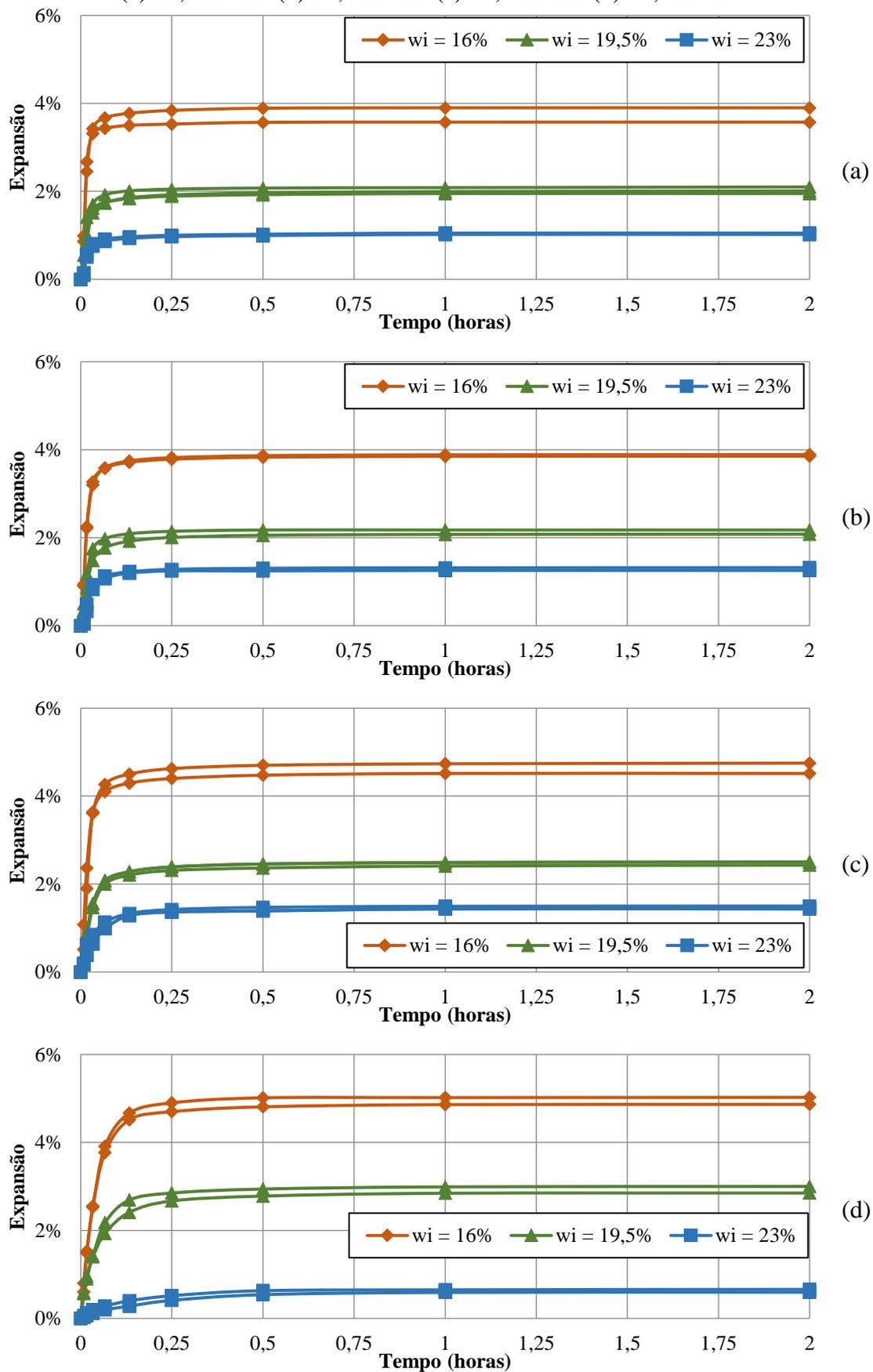
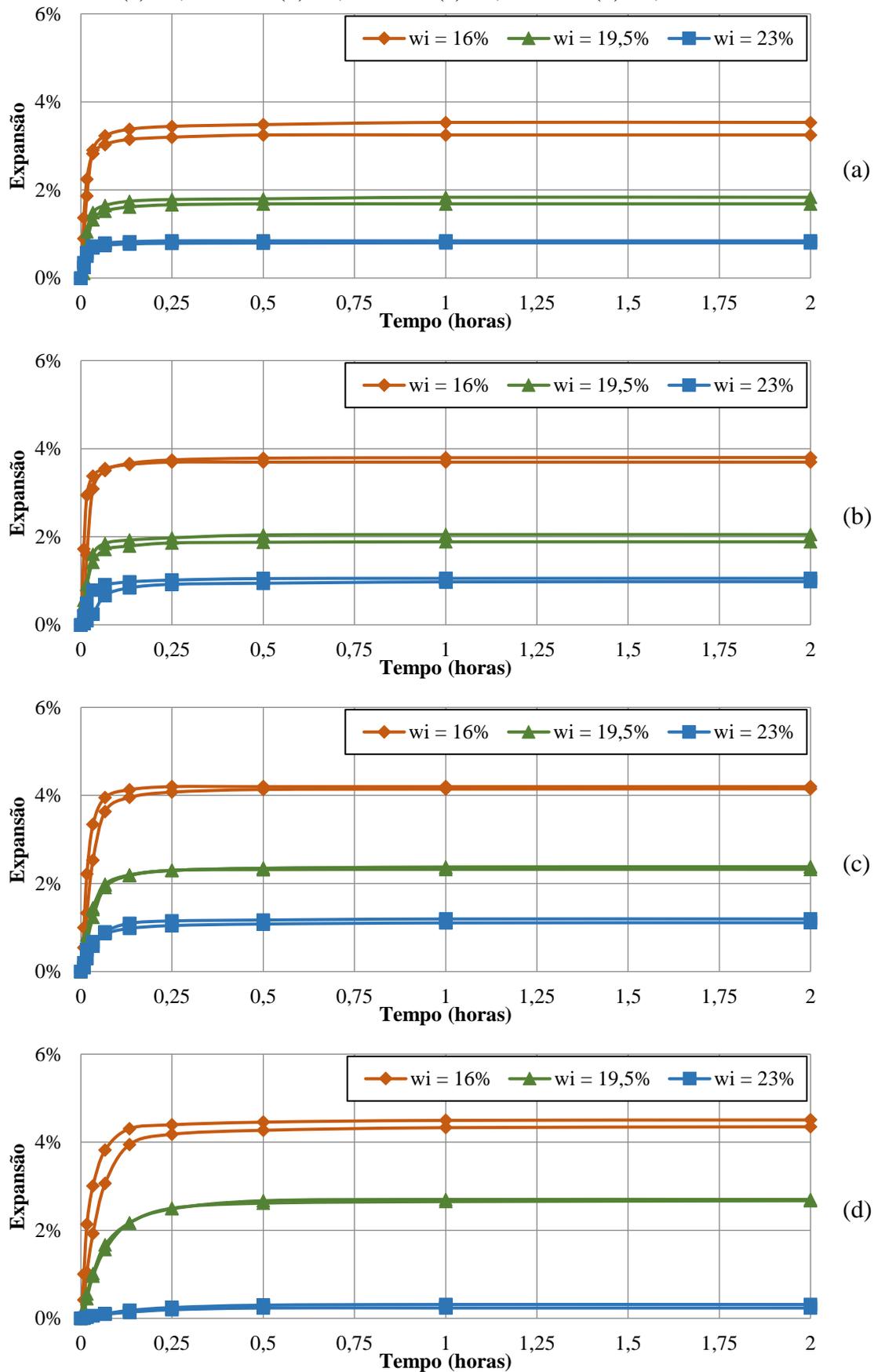


Figura 45: Expansão do solo com 4% de cal para os diferentes pesos específicos secos (a) 13,5 kN/m³ (b) 14,5 kN/m³ (c) 15,5 kN/m³ (d) 16,5 kN/m³

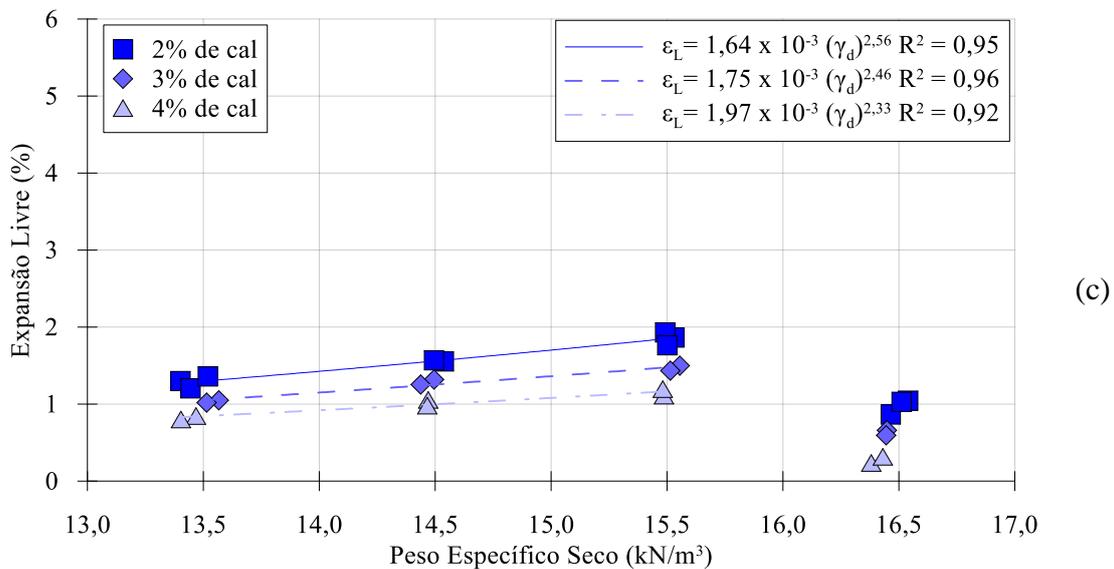
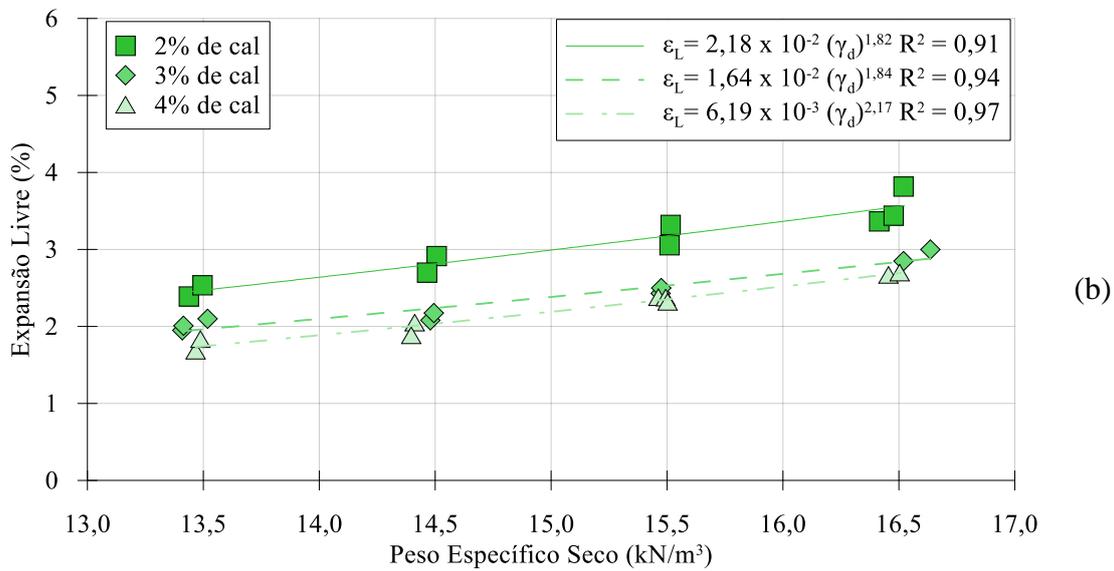
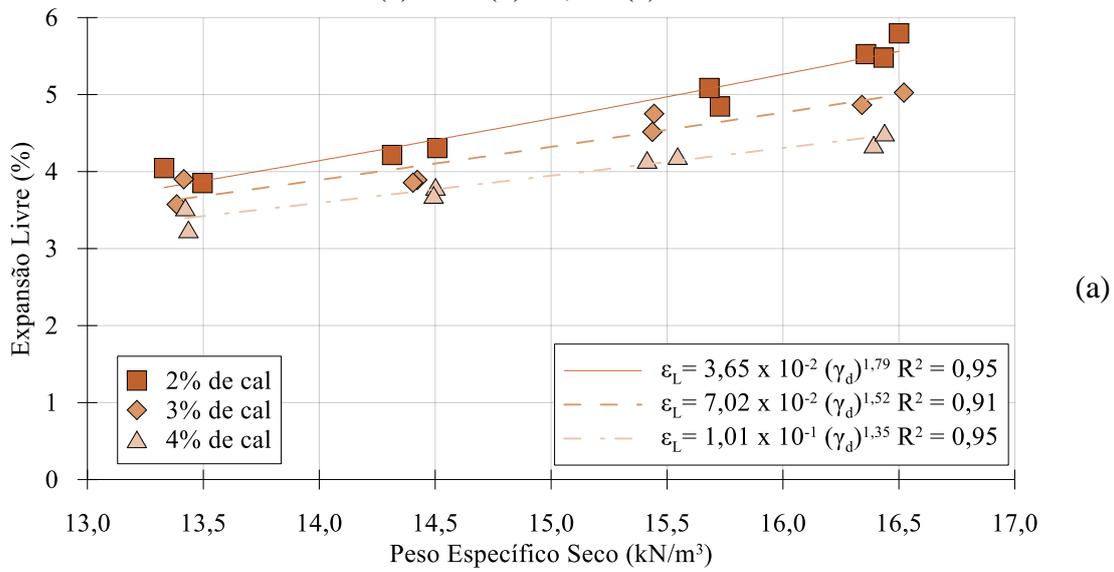


A partir dos gráficos, pode-se observar uma redução expressiva no tempo de estabilização da expansão, quando comparado com as amostras do solo puro, apresentadas anteriormente. Independente das variáveis de moldagem, a maioria das amostras do solo estabilizado cessou sua expansão em menos de 30 minutos. Diferentemente dos ensaios realizados com o solo puro, não foi possível observar efeito significativo da umidade inicial, peso específico ou teor de cal no tempo necessário para cessar a expansão do solo. Esses comportamentos ocorrem devido a estabilização com cal promover mudanças significativas na estrutura do solo causando floculação, aumento de permeabilidade e combate a instabilidade volumétrica dos argilominerais, o que acelera a hidratação dos argilominerais e diminui o tempo necessário para o processo de expansão se estabilizar (Diamond e Kinter, 1965; Menger *et al.*, 2020; Rawi e Awad, 1981).

Adicionalmente, observa-se nas Figura 43, Figura 44 e Figura 45 um efeito da umidade inicial sobre a expansão livre, em que, quanto maior a umidade inicial, mais as curvas de tendência são deslocadas para baixo, indicando menores valores de expansão livre. Esse comportamento relaciona-se diretamente com a saturação dos microporos inicialmente, resultando numa menor afinidade da amostra à adsorção de água e no menor desenvolvimento de expansão (Fattah, Salim e Irshayyid, 2017; Ferber *et al.*, 2009). Resultados semelhantes foram obtidos por Consoli, Araújo, et al., (2020), ao estudar mistura de caulinita/bentonita estabilizadas com cimento.

A Figura 46 ilustra um compilado dos valores obtidos para expansão livre, em função do peso específico, separados por umidade inicial. Observa-se que foi possível obter curvas de tendência para cada teor de cal adotado, com altos valores de R^2 . Assim, para o solo expansivo estabilizado com cal, observa-se uma relação diretamente proporcional entre o peso específico seco e a expansão livre da amostra, independente da umidade inicial e do teor de cal adotado. Resultados semelhantes foram obtidos por Guimaraes (2023), Silvani et al., (2024), Tenório (2019).

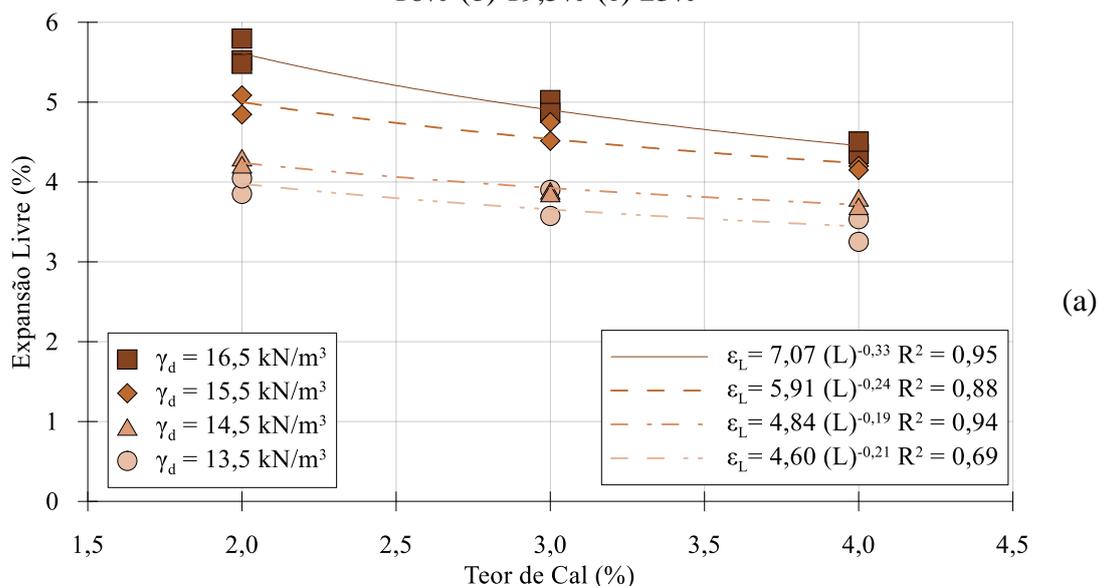
Figura 46: Expansão livre em função do peso específico seco, para as umidades iniciais
(a) 16% (b) 19,5% (c) 23%

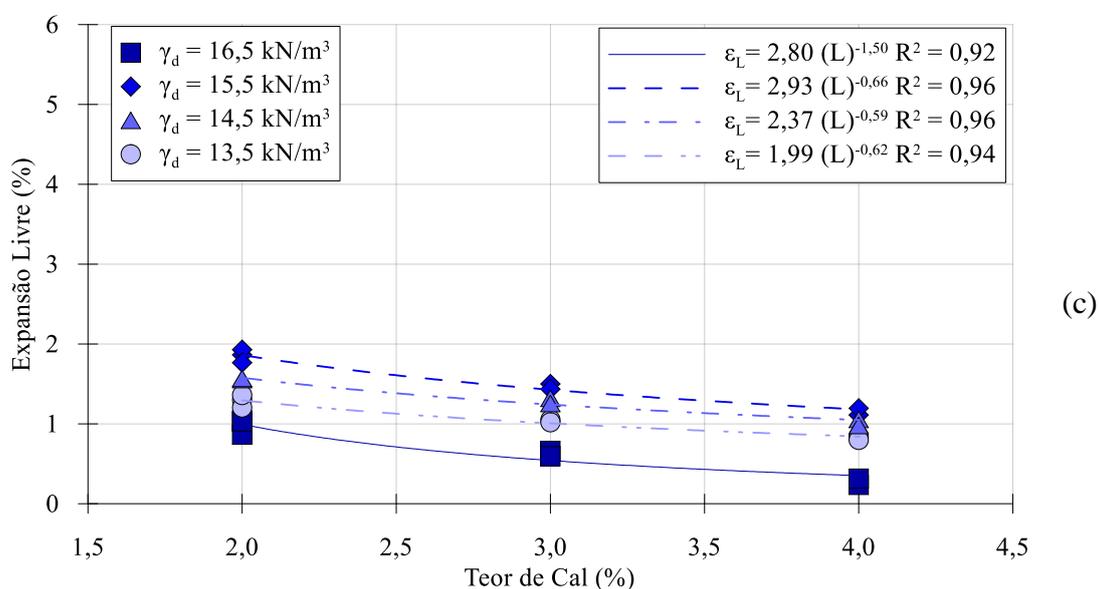
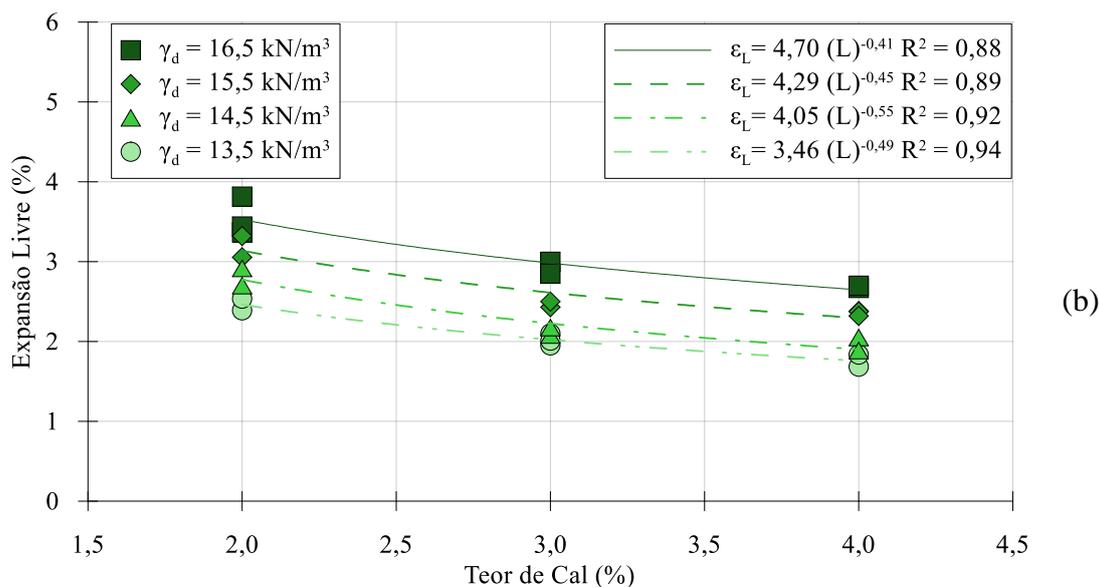


Como explicado na seção 2.2.2, aumento no peso específico seco implica em maior contato entre os argilominerais expansivos e menor volume de macroporos para reorganização das partículas, logo, ao serem hidratados, o fenômeno de inchamento é realçado (Ferber *et al.*, 2009; Silvani *et al.*, 2020). Assim como ocorreu para o solo puro, uma exceção tem que ser feita para as amostras com $\gamma_d = 16,5 \text{ kN/m}^3$ e $w_i = 23\%$, pois, apresentaram expansão livre inferior ao esperado com base nas demais amostras. A saturação teórica inicial dessas amostras também é de 100%, independente do teor de cal adicionado, levando a uma menor adsorção de água durante a inundação.

A Figura 47 ilustra um compilado dos dados de expansão livre em função do teor de cal, separados pelas diferentes umidades iniciais. Observa-se a formação de curvas de tendência para cada peso específico seco adotado, com altos valores de R^2 . A partir dos gráficos, é possível estabelecer a relação inversamente proporcional entre teor de cal e expansão livre das amostras, independente do peso específico seco e umidade inicial adotados. Resultados semelhantes foram obtidos outros estudos da literatura (Guimarães, 2023; Indiramma, Sudharani e Needhidasan, 2020; Silvani *et al.*, 2020). Esse fenômeno ocorre, pois, a adição de cal desencadeia troca catiônica com os argilominerais expansivos, gerando floculação e redução da instabilidade volumétrica (Herzog e Mitchell, 1963; Hilt e Davidson, 1960).

Figura 47: Expansão livre em função do teor de cal, para as umidades iniciais de (a) 16% (b) 19,5% (c) 23%

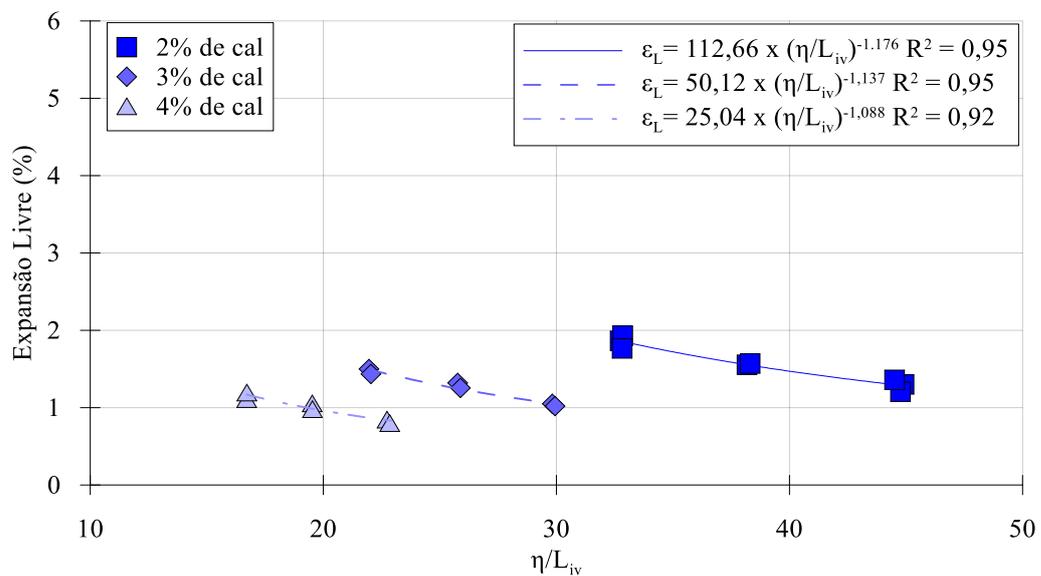
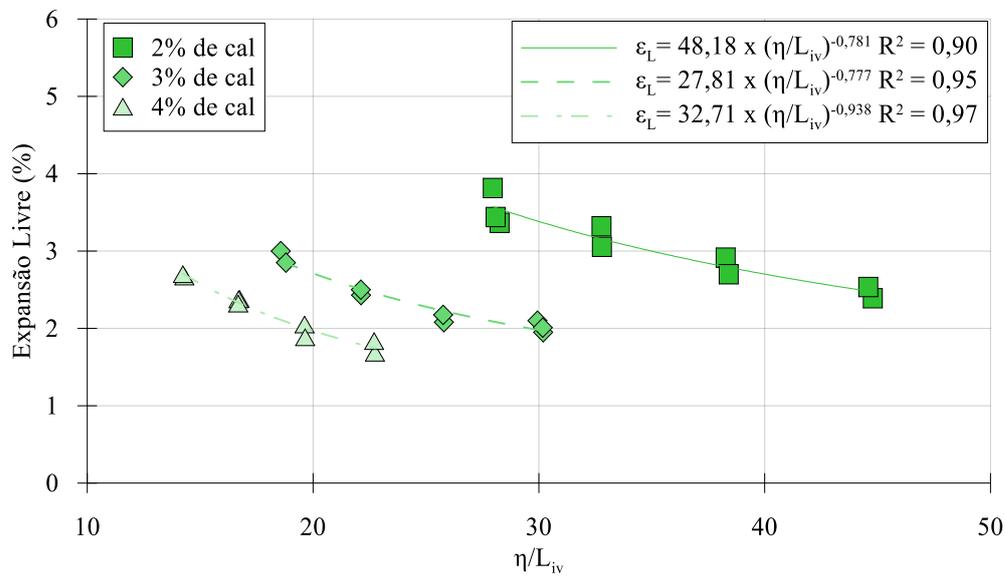
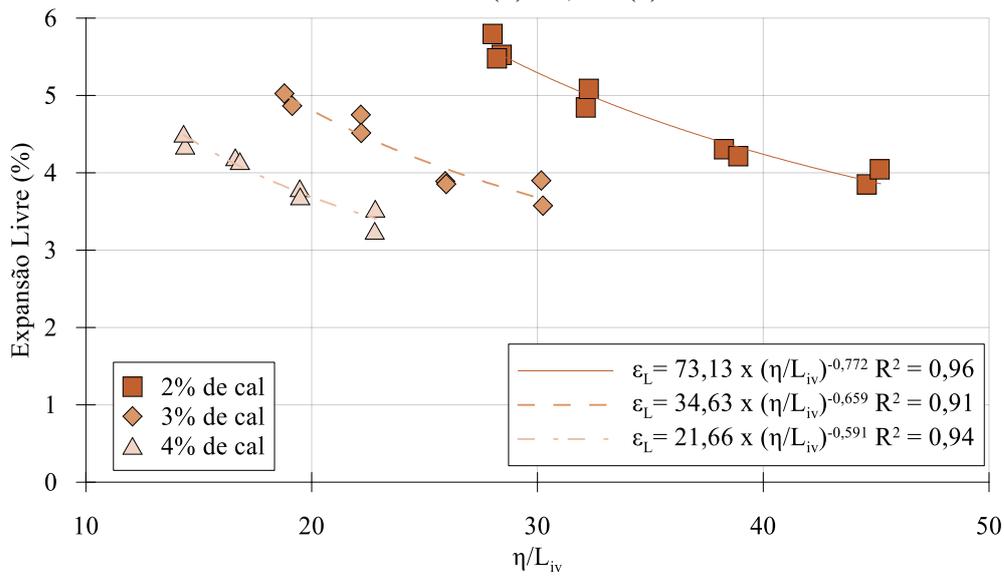




As análises seguintes deste tópico seguiram sem os dados das amostras com $\gamma_d = 16,5 \text{ kN/m}^3$ e $w_i = 23\%$, em detrimento de seu comportamento adverso, devido sua saturação inicial próxima a 100%.

A Figura 48 expõe a expansão livre das amostras em função do parâmetro η/L_{iv} , para cada uma das umidades iniciais. É possível observar boa capacidade do parâmetro η/L_{iv} em descrever a expansão livre das misturas solo-cal, a partir da formação de linhas de tendência, para os diferentes teores de cal, com altos valores de R^2 . Assim, é possível estabelecer a relação inversamente proporcional entre o parâmetro η/L_{iv} e a expansão livre das misturas solo-cal, independente da umidade inicial.

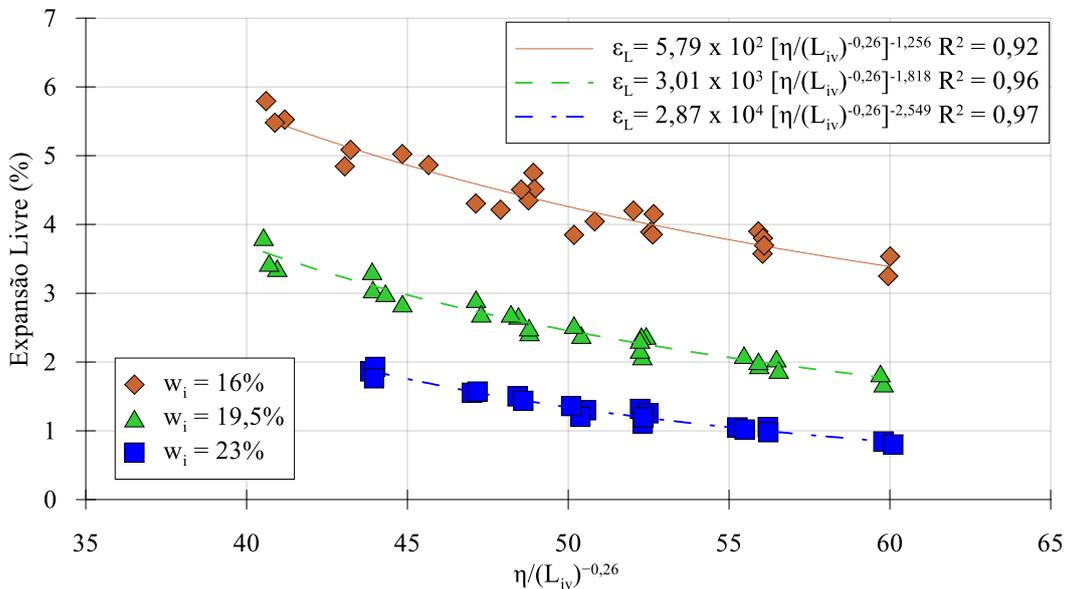
Figura 48: Expansão livre em função do parâmetro η/L_{iv} , para as umidades iniciais (a) 16% (b) 19,5% (c) 23%



A formação de uma curva de tendência para cada teor de cal, na Figura 48, indica que as variáveis, porosidade e teor volumétrico de cal, exercem efeitos com diferentes magnitudes sobre a expansão livre (Silvani *et al.*, 2020). Porém, para se obter uma curva de dosagem, é necessário converter as três curvas obtidas em uma curva única. Por essa razão, estudos anteriores, que aplicaram esse parâmetro de dosagem, indicam a necessidade de aplicar um expoente de ajuste no denominador, para representar melhor a magnitude dos efeitos sobre a variável resposta. O ajuste foi feito com um expoente no denominador de -0,26, valor este, que foi utilizado com sucesso por Silvani *et al.* (2020) e Guimaraes (2023) ao modelar a expansão livre desse mesmo solo estabilizado com cal.

A Figura 49 ilustra a expansão livre das misturas solo-cal, em função do parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$. É possível observar que o comportamento de todos os dados de expansão livre foi condensado em três curvas de tendência, sendo uma para cada umidade inicial, com altos valores de R^2 . Assim, o expoente de ajuste de -0,26, foi considerado satisfatório para a presente pesquisa. As linhas de tendência estão descritas a seguir, respectivamente, pelas Equações 12, 13, 14, para as umidades iniciais 16%, 19,5% e 23%.

Figura 49: Expansão livre em função do parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$, para as diferentes umidades iniciais



$$\text{Para } w_i = 16\% \quad \epsilon_L = 5,79 \times 10^2 \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}} \right)^{-1,256} \quad \text{Eq. (12)}$$

$$\text{Para } w_i = 19,5\% \quad \epsilon_L = 3,01 \times 10^3 \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}} \right)^{-1,818} \quad \text{Eq. (13)}$$

$$\text{Para } w_i = 23\% \quad \epsilon_L = 2,87 \times 10^4 \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}} \right)^{-2,549} \quad \text{Eq. (14)}$$

Onde:

w_i : Umidade inicial

ε_L : Expansão livre (%)

η : Porosidade

L_{iv} : Teor volumétrico de cal

Por fim, a aplicação da metodologia de dosagem pelo parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$ se mostrou satisfatória para modelar a expansão livre de misturas solo-cal com diferentes umidades iniciais, resultando na formação de uma curva de dosagem para cada umidade inicial. Esse método de previsão se mostrou eficaz para estimar a expansão livre do solo estabilizado com cal, com base no peso específico seco, teor de cal e umidade inicial. A partir disso, pode-se ter um uso mais racional e otimizado da cal, bem como, prever o comportamento do solo para um dimensionamento mais assertivo de projetos geotécnicos, com um reduzido número de ensaios.

4.3.2. Tensão de expansão do solo expansivo estabilizado com cal

As Figura 50, Figura 51 e Figura 52 expõem o carregamento após a expansão livre das amostras do solo estabilizado com 2%, 3% e 4% de cal, respectivamente, separados para os diferentes pesos específicos seco. Observa-se que todas as amostras apresentam comportamento essencialmente linear, diferentemente do que foi observado nos ensaios com solo puro, que as amostras menos compactas apresentaram tendência bilinear. Como possível explicação, estudos apontam que a adição de cal gera uma mudança de estrutura do solo, por meio de uma distribuição mais uniforme dos macroporos (Khattab, Al-Mukhtar e Fleureau, 2007). Assim, a redução da desproporção dos macroporos gera um comportamento mais linear das amostras, mesmo nas baixas densidades estudadas.

Adicionalmente, ao analisar as Figura 50, Figura 51 e Figura 52 nota-se o deslocamento das curvas para baixo, conforme a umidade inicial aumenta, de forma semelhante ao observado nos dados de expansão livre. Esse comportamento evidencia a relação inversamente proporcional entre umidade inicial e tensão de expansão. Como justificativa, a umidade inicial aumenta a saturação dos microporos, reduzindo o potencial de adsorção de água da amostra (Ferber *et al.*, 2009). Com isso, o processo de inundação do solo tende a gerar uma tensão na estrutura menos significativa.

Figura 50: Carregamento após expansão livre do solo com 2% de cal, para os diferentes pesos específicos secos (a) 13,5 kN/m³ (b) 14,5 kN/m³ (c) 15,5 kN/m³ (d) 16,5 kN/m³

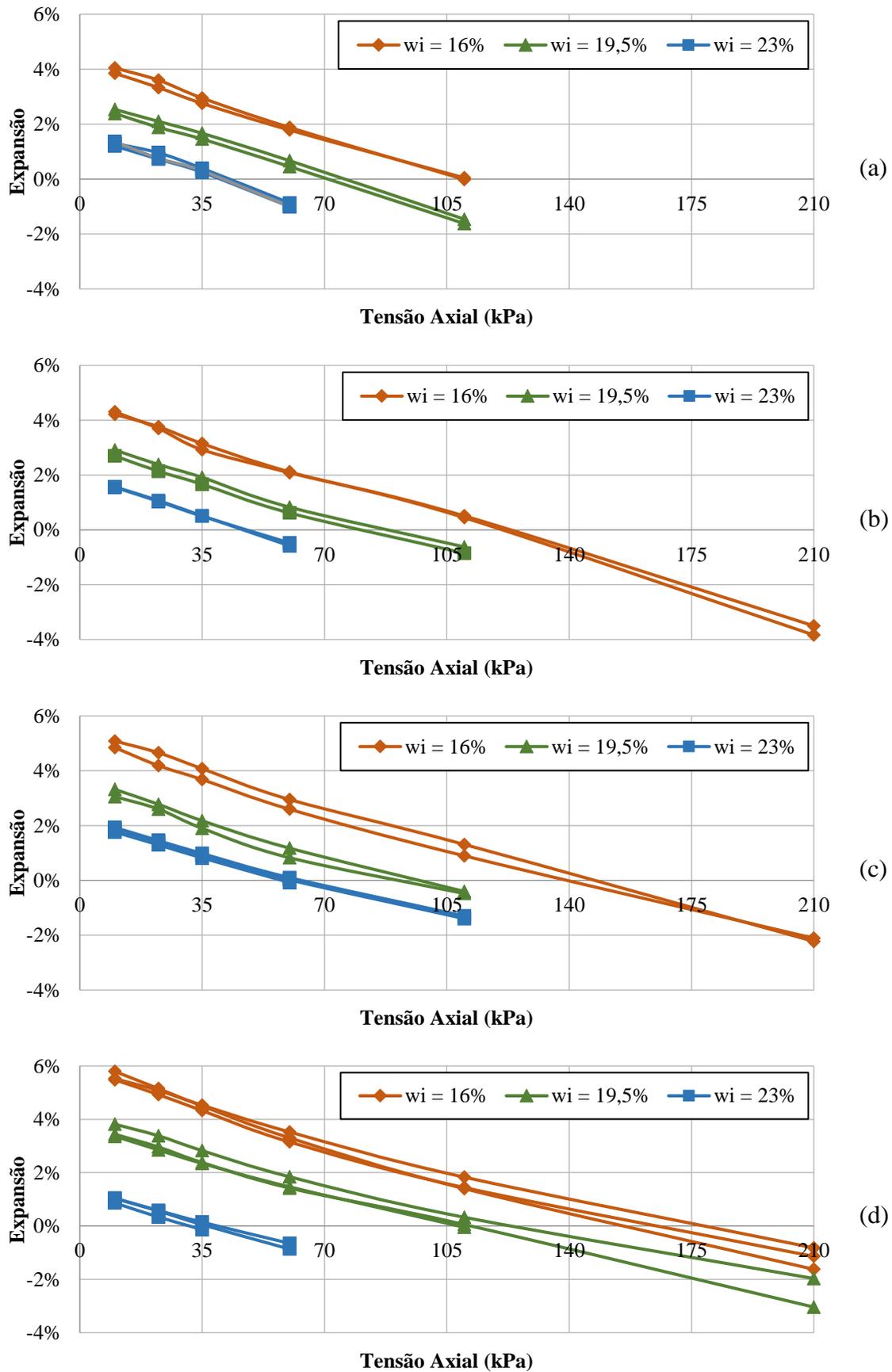


Figura 51: Carregamento após expansão livre do solo com 3% de cal, para os diferentes pesos específicos secos (a) 13,5 kN/m³ (b) 14,5 kN/m³ (c) 15,5 kN/m³ (d) 16,5 kN/m³

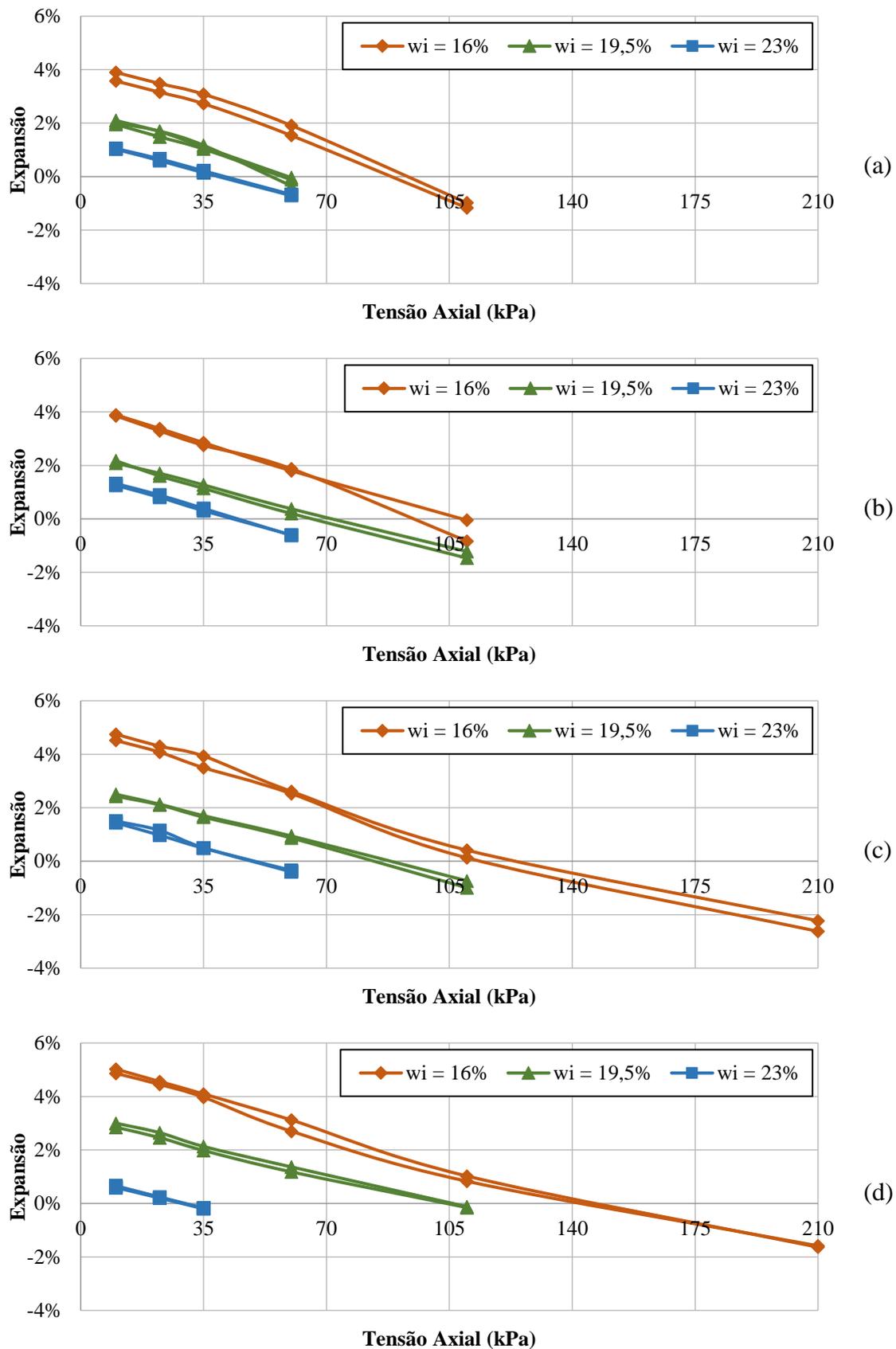
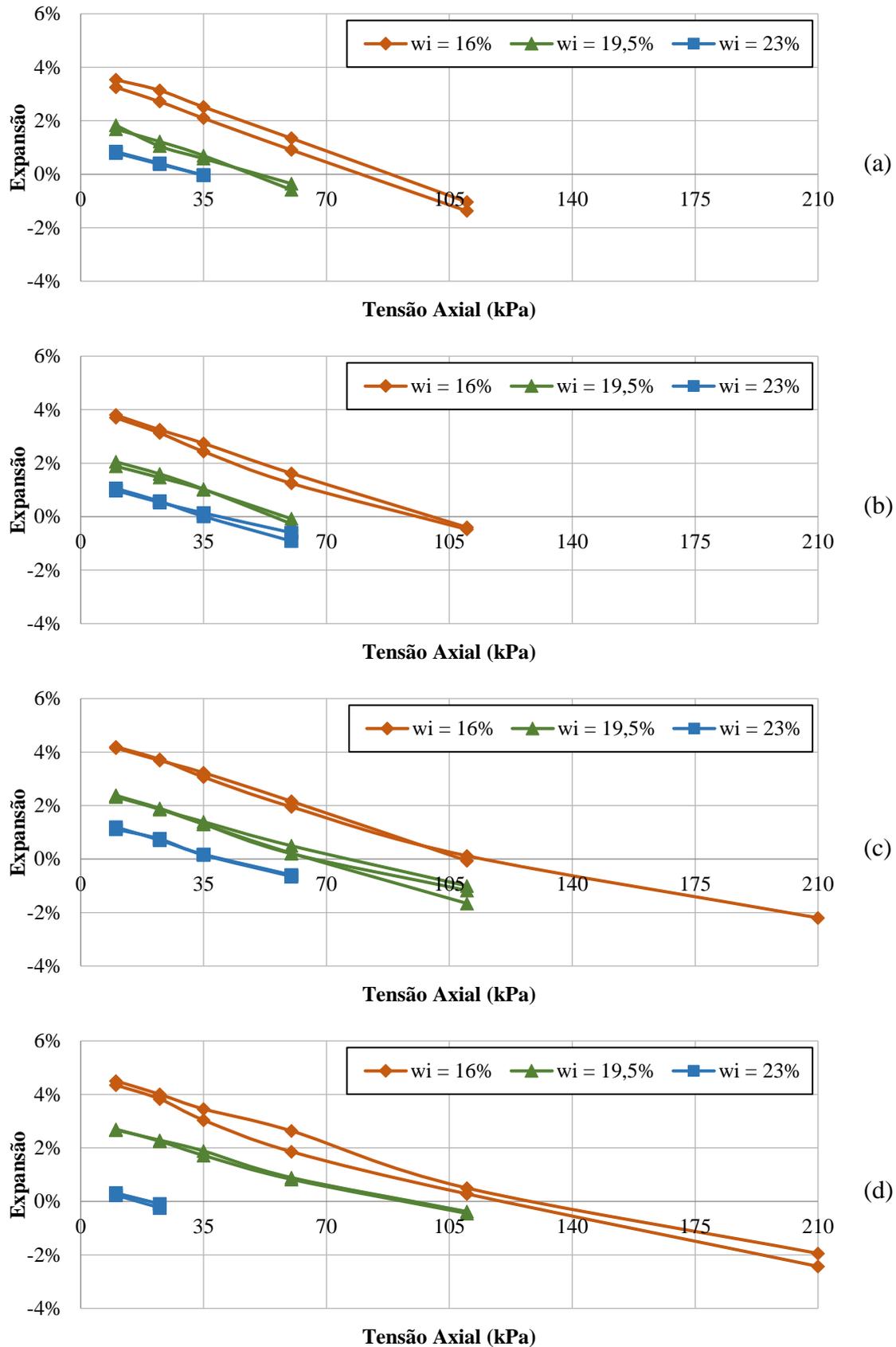


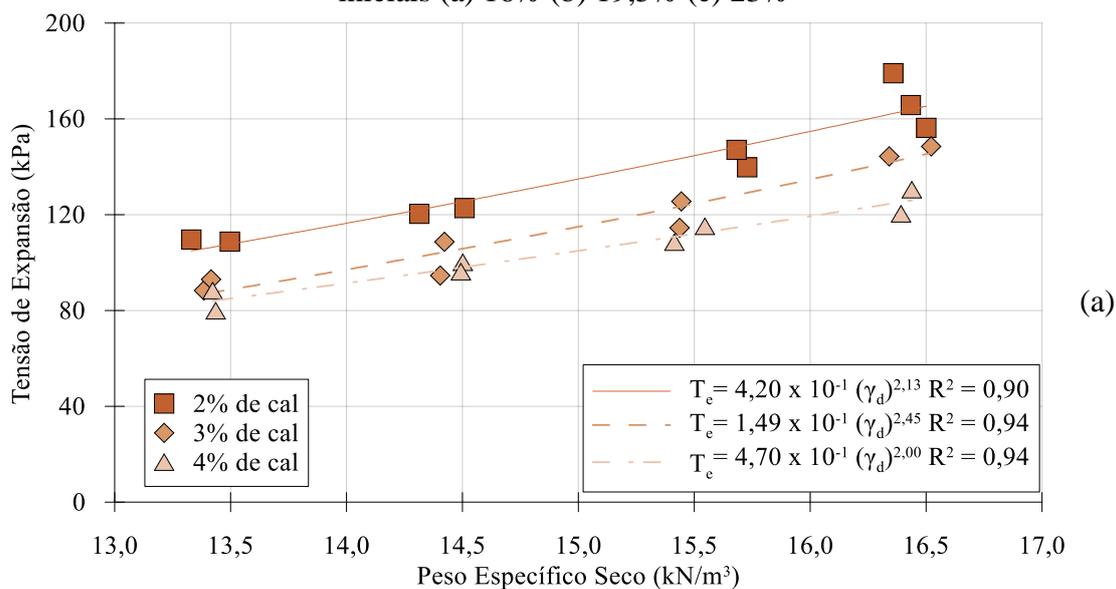
Figura 52: Carregamento após expansão livre do solo com 4% de cal, para os diferentes pesos específicos secos (a) 13,5 kN/m³ (b) 14,5 kN/m³ (c) 15,5 kN/m³ (d) 16,5 kN/m³

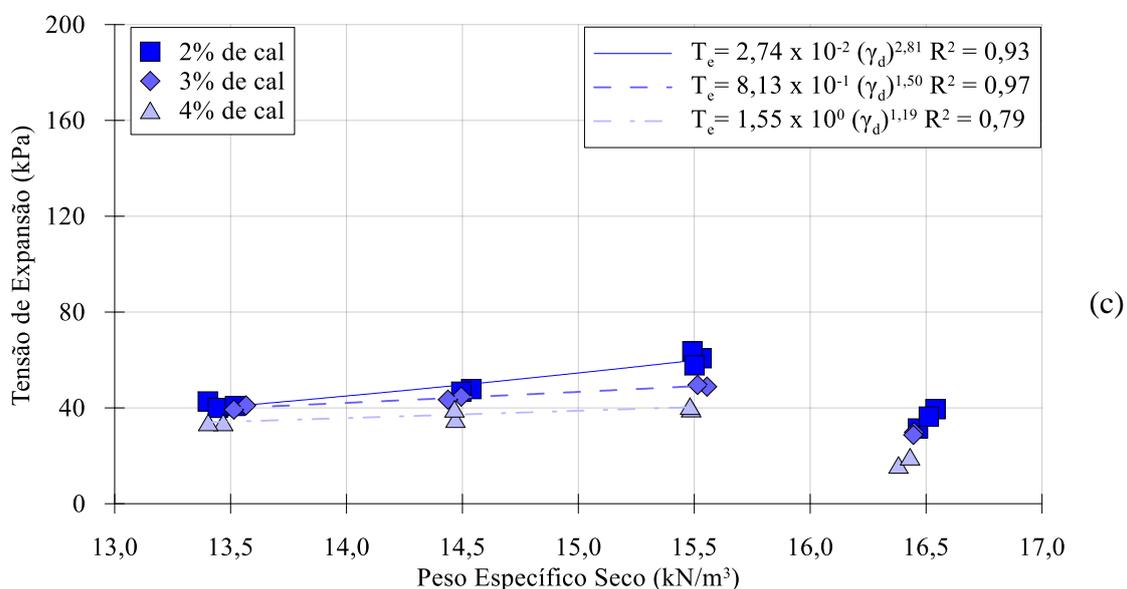
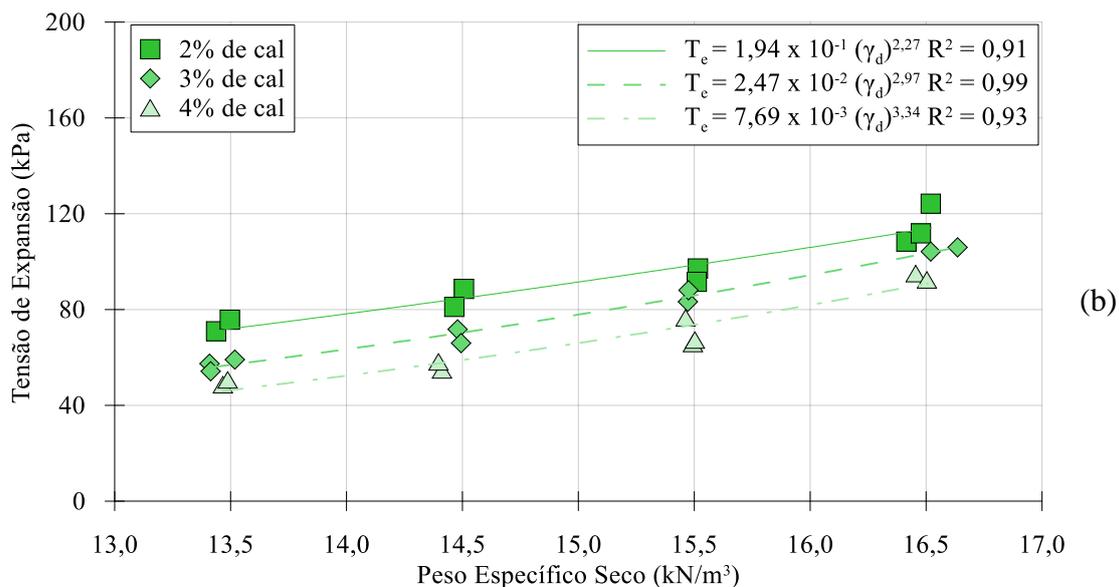


A Figura 53 ilustra os dados de tensão de expansão das misturas solo-cal em função do peso específico, separado para as diferentes umidades iniciais. Observa-se que foi possível obter curvas de tendência para cada teor de cal adotado, com altos valores de R^2 . Assim, para o solo expansivo estabilizado com cal, observa-se uma relação diretamente proporcional entre o peso específico seco e a tensão de expansão da amostra, independente da umidade inicial e do teor de cal adotado. O comportamento observado está corroborando com estudos anteriores de Guimarães, (2023) e Yan e Wu, (2009).

Como explicação, o aumento no peso específico seco implica em maior contato entre os argilominerais expansivos e um menor volume de macroporos para reorganização, logo, ao serem hidratados, a tensão de expansão gerada tende a ser maior (Ferber *et al.*, 2009; Guimarães, 2023). Assim como ocorreu ao analisar a expansão livre, as amostras com $\gamma_d = 16,5 \text{ kN/m}^3$ e $w_i = 23\%$ apresentaram tensão de expansão inferior ao esperado, com base nas demais amostras, devido a saturação teórica inicial de 100%.

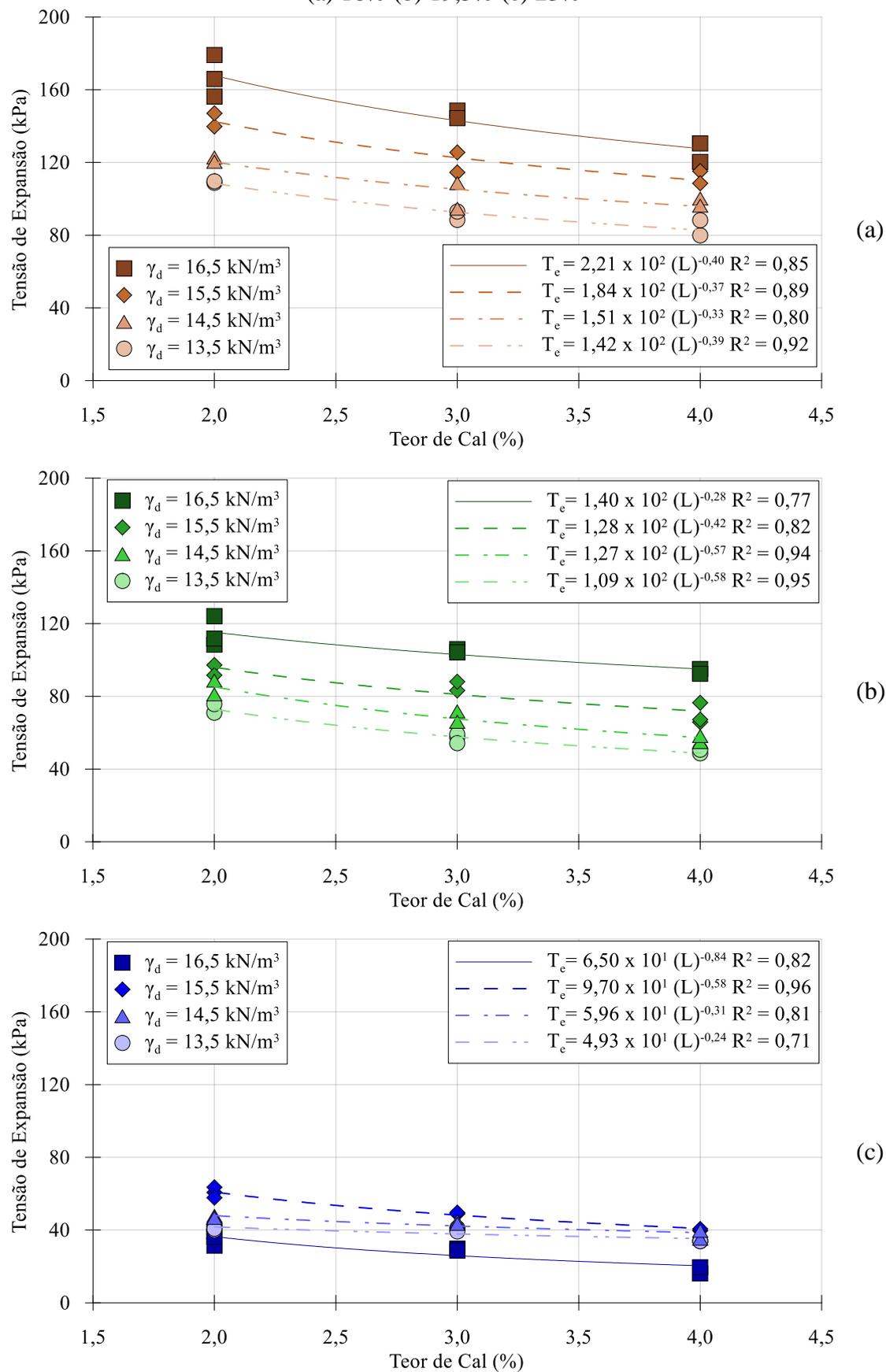
Figura 53: Tensão de expansão em função do peso específico seco, para as umidades iniciais (a) 16% (b) 19,5% (c) 23%





A Figura 54 ilustra o compilado das tensões de expansão das amostras, em função do teor de cal, separados para as diferentes umidades iniciais. Pode-se ver a formação de curvas de tendência para cada peso específico seco adotado, com altos valores de R^2 . Por essa razão, é possível estabelecer a relação inversamente proporcional entre teor de cal e tensão de expansão das amostras, independente do peso específico seco e umidade inicial adotados. Resultados semelhantes foram obtidos outros estudos da literatura (Al-Rawas, Hago e Al-Sarmi, 2005; Guimarães, 2023; Landlin e Bhuvaneshwari, 2023). Como justificativa, as trocas catiônicas induzidas pela adição de cal, reduz a instabilidade volumétrica dos argilominerais, reduzindo a magnitude da reorganização estrutural ao sofrer inundação e, conseqüentemente, a tensão gerada na estrutura (Herzog e Mitchell, 1963; Hilt e Davidson, 1960).

Figura 54: Tensão de Expansão em função do teor de cal, para as umidades iniciais de
(a) 16% (b) 19,5% (c) 23%



Observa-se uma mudança no comportamento do solo com a adição de cal, uma vez que, no solo puro, a umidade inicial não exerceu influência significativa na tensão de expansão, enquanto, nas amostras estabilizadas, esse parâmetro apresentou um efeito claro. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que a adição de cal promove um refinamento na geometria dos macroporos (redução de seu diâmetro), porém, gera um aumento no volume total de macroporos da amostra. Tais mudanças induzem uma distribuição mais homogênea do tamanho dos poros na amostra tratada, pois as partículas apresentam menor orientação devido à floculação em comparação com a amostra não tratada (Bin *et al.*, 2007; Khattab, Al-Mukhtar e Fleureau, 2007; Wang e Wang, 2024).

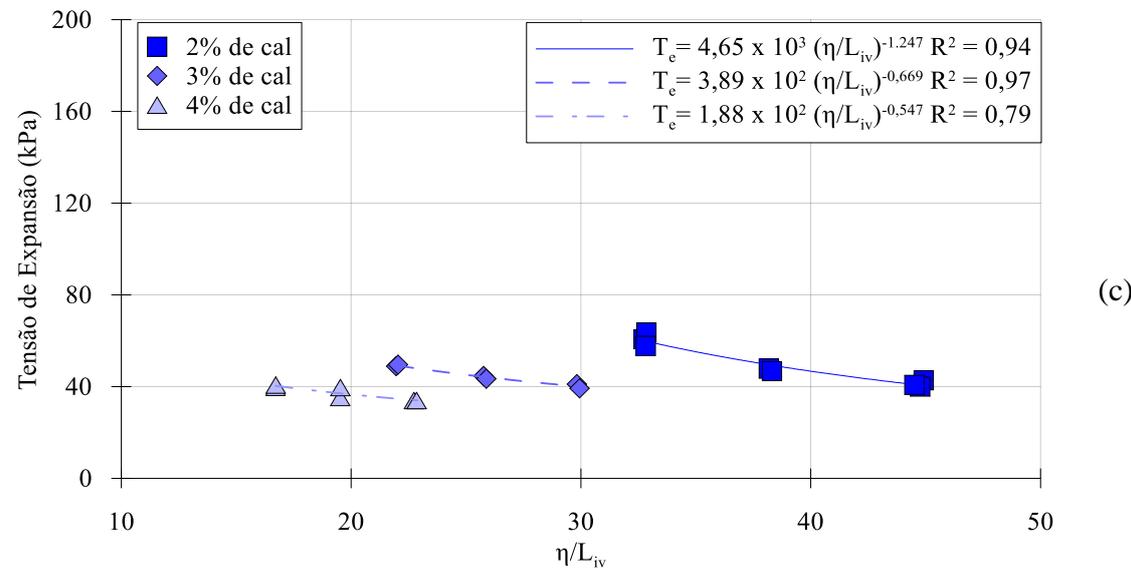
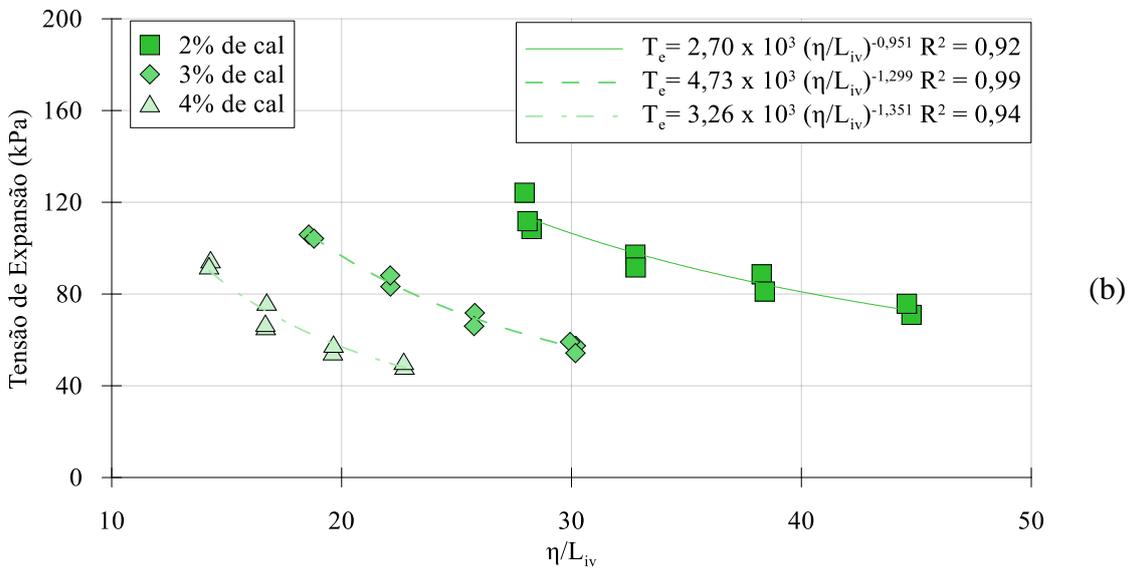
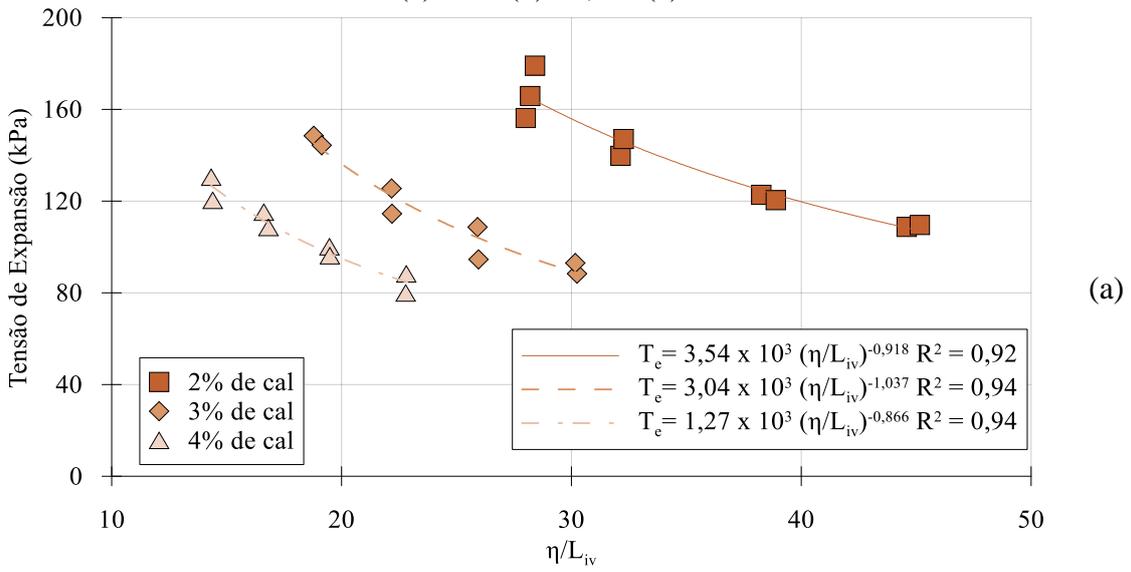
Como consequência, a reorganização da matriz durante a hidratação dos argilominerais ocorre de maneira distinta, alterando o desenvolvimento da tensão de expansão entre as amostras sem e com estabilização. Essas alterações estruturais impactam diretamente a capacidade do solo em acomodar variações volumétricas, justificando a influência da umidade inicial no comportamento expansivo das amostras estabilizadas com cal.

De forma análoga à expansão livre, as análises seguintes deste tópico seguiram sem os dados das amostras com $\gamma_d = 16,5 \text{ kN/m}^3$ e $w_i = 23\%$, em detrimento de seu comportamento adverso devido a elevada saturação inicial.

A Figura 55 ilustra a tensão de expansão obtidas para as amostras em função do parâmetro η/L_{iv} , separadas para as diferentes umidades iniciais. É possível observar boa capacidade do parâmetro η/L_{iv} em descrever a tensão de expansão do solo estabilizado com cal, a partir da formação de linhas de tendência, para os diferentes teores de cal, com altos valores de R^2 . Ademais, é possível estabelecer uma relação inversamente proporcional entre o parâmetro η/L_{iv} e a tensão de expansão das misturas solo-cal, independente da umidade inicial.

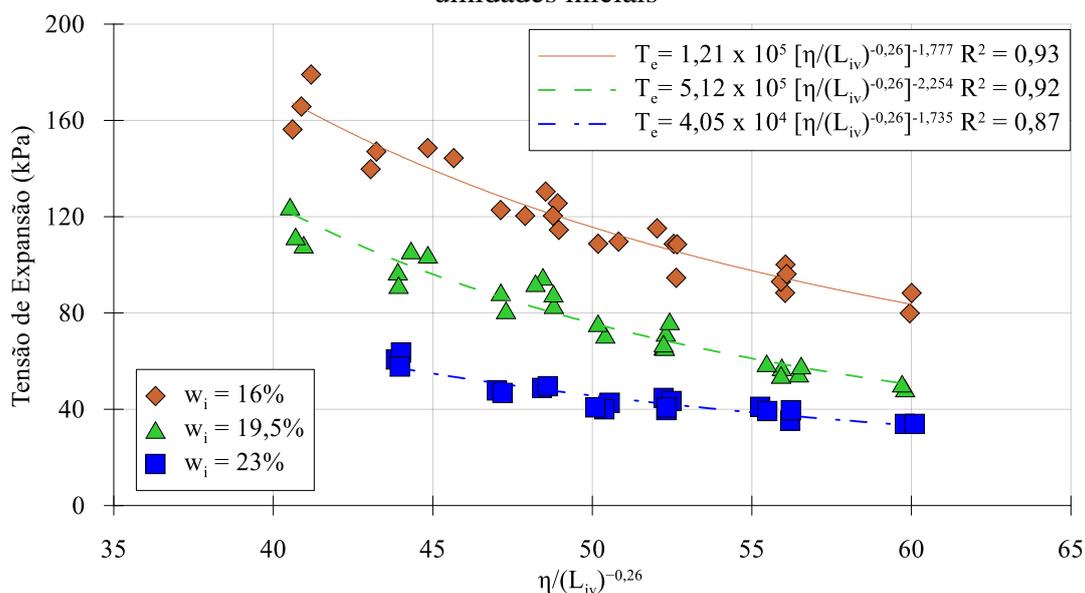
Assim como explicado na análise da expansão livre, foi aplicado um expoente de ajuste no denominador do parâmetro η/L_{iv} , para equilibrar os efeitos das variáveis. Foi adotado o expoente de -0,26, pois, Guimaraes (2023) obteve bom ajuste ao modelar a tensão de expansão desse mesmo solo estabilizado com cal e cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

Figura 55: Tensão de expansão em função do parâmetro η/L_{iv} , para as umidades iniciais (a) 16% (b) 19,5% (c) 23%



A Figura 56 ilustra a tensão de expansão das amostras de solo estabilizado com cal, em função do parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$. Observa-se que o comportamento de todos os dados de tensão de expansão foi condensado em três curvas de tendência, sendo uma para cada umidade inicial, com altos valores de R^2 . Assim, o expoente de ajuste de -0,26, foi considerado satisfatório para ajustar a tensão de expansão na presente pesquisa. As linhas de tendência são descritas pelas Equações 15, 16 e 17, respectivamente, para as umidades iniciais 16%, 19,5% e 23%.

Figura 56: Tensão de Expansão em função do parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$, para as diferentes umidades iniciais



$$\text{Para } w_i = 16\% \quad T_e = 1,21 \times 10^5 \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}} \right)^{-1,777} \quad \text{Eq. (15)}$$

$$\text{Para } w_i = 19,5\% \quad T_e = 5,12 \times 10^5 \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}} \right)^{-2,254} \quad \text{Eq. (16)}$$

$$\text{Para } w_i = 23\% \quad T_e = 4,05 \times 10^4 \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}} \right)^{-1,735} \quad \text{Eq. (17)}$$

Onde:

w_i : Umidade inicial

T_e : Tensão de expansão (kPa)

η : Porosidade

L_{iv} : Teor volumétrico de cal

Por fim, a aplicação da metodologia de dosagem pelo parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$ se mostrou satisfatória para modelar a tensão de expansão de misturas solo-cal com

diferentes umidades iniciais, resultando na formação de uma curva de dosagem para cada umidade inicial. Essa metodologia de previsão se mostrou eficaz para estimar a tensão de expansão do solo estabilizado com cal, com base no peso específico seco, teor de cal e umidade inicial. A partir disso, pode-se ter um uso mais racional e otimizado da cal, bem como, prever o comportamento do solo, para um dimensionamento mais assertivo de projetos geotécnicos.

4.4. Normalização das curvas de dosagem das propriedades expansivas

A partir das curvas de dosagem obtidas das propriedades expansivas em função do parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$, descritas pelas Equações 12, 13, 14, 15, 16 e 17, investigou-se a possibilidade de realizar um processo de normalização para se obter uma relação generalizada entre as propriedades expansivas e o parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$. Procedimentos similares foram realizados por Consoli, Ibrahim, et al., (2017), Consoli, Marques, et al., (2017) e Silvani et al., (2020). As amostras com $\gamma_d = 16,5 \text{ kN/m}^3$ e $w_i = 23\%$ foram retiradas dessas normalizações por não se enquadrarem junto com as demais amostras

O procedimento consistiu em dividir as expansões livre obtidas experimentalmente, pelo valor de expansão livre correspondente a $\eta/L_{iv}^{-0,26} = \Delta$ nas Equações 12, 13 e 14, respectivamente para as diferentes umidades iniciais. Diferentes valores de Δ foram investigados, no intervalo de 40 a 60, por ser uma amplitude que compreende todo os ensaios realizados, como pode ser visto na Figura 49. Porém foi definido $\Delta = 50$, por apresentar o melhor ajuste para todos os dados. A Equação 18 estabelece a relação normalizada obtida e a Figura 57 expõe o comportamento dos dados, com destaque para o $R^2 = 0,89$, indicando que a relação estabelecida conseguiu ajustar bem as diferentes amostras ensaiadas, independente dos valores de peso específico seco, teor de cal e umidade inicial.

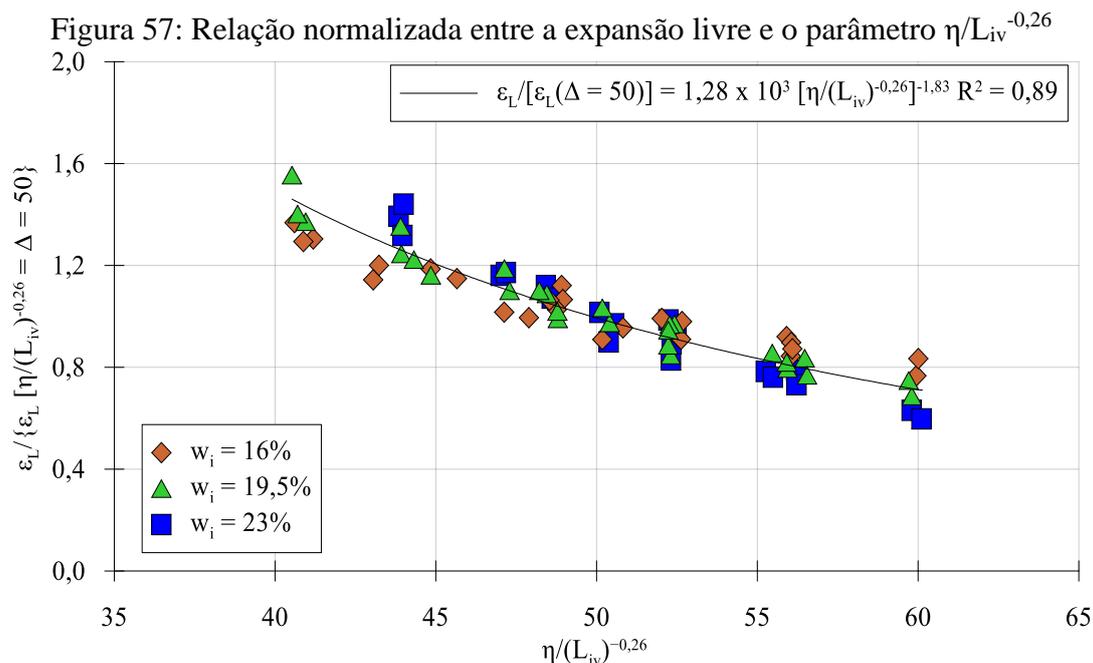
$$\frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_L \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}} = \Delta = 50 \right)} = 1,28 \times 10^3 \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}} \right)^{-1,83} \quad \text{Eq. (18)}$$

Onde:

ε_L : Expansão livre (%)

η : Porosidade

L_{iv} : Teor volumétrico de cal



Analogamente, o procedimento de normalização foi realizado para os dados de tensão de expansão. As tensões de expansão obtidas experimentalmente foram divididas pela resposta das Equações 15, 16 e 17, para um $\eta/L_{iv}^{-0,26} = \Delta$. Assim como ocorreu para a expansão livre, foi definido $\Delta = 50$, por apresentar o melhor ajuste para todos os dados. A Equação 19 estabelece a relação normalizada obtida e a Figura 58 expõe o comportamento dos dados, com destaque para o $R^2 = 0,91$, indicando que a relação estabelecida conseguiu ajustar bem as diferentes amostras ensaiadas, independente dos valores de peso específico seco, teor de cal e umidade inicial.

$$\frac{T_e}{T_e \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}} = \Delta = 50 \right)} = 1,30 \times 10^3 \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}} \right)^{-1,83} \quad \text{Eq. (19)}$$

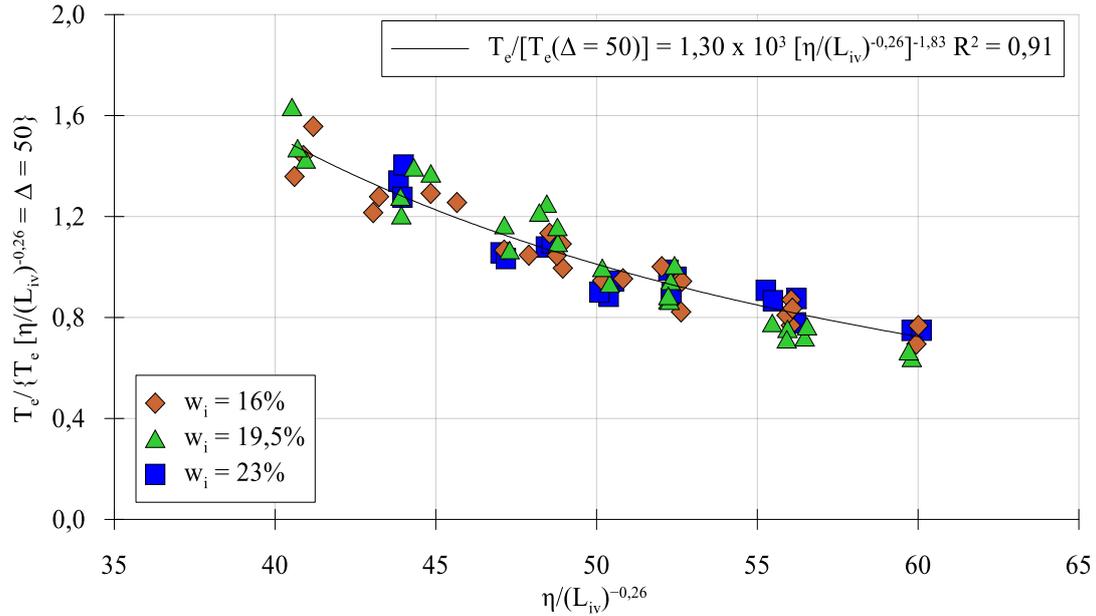
Onde:

T_e : Tensão de expansão (kPa)

η : Porosidade

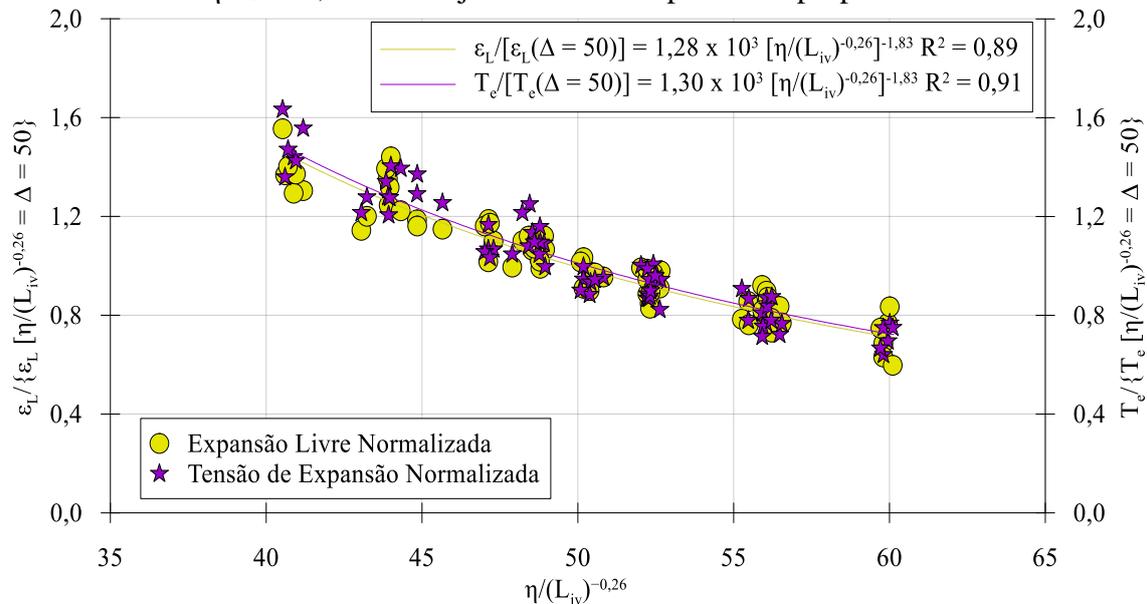
L_{iv} : Teor volumétrico de cal

Figura 58: Relação normalizada entre a tensão de expansão e o parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$



A Figura 59 expõe a junção dos dados normalizados da expansão livre e da tensão de expansão, previamente apresentados em separado, nas Figura 57 e Figura 58. A partir disso, pode-se fazer uma análise espacial dos dados, e observa-se a possibilidade de estabelecer uma única equação matemática capaz de descrever ambas as propriedades expansivas normalizadas, devido a seus comportamentos similares.

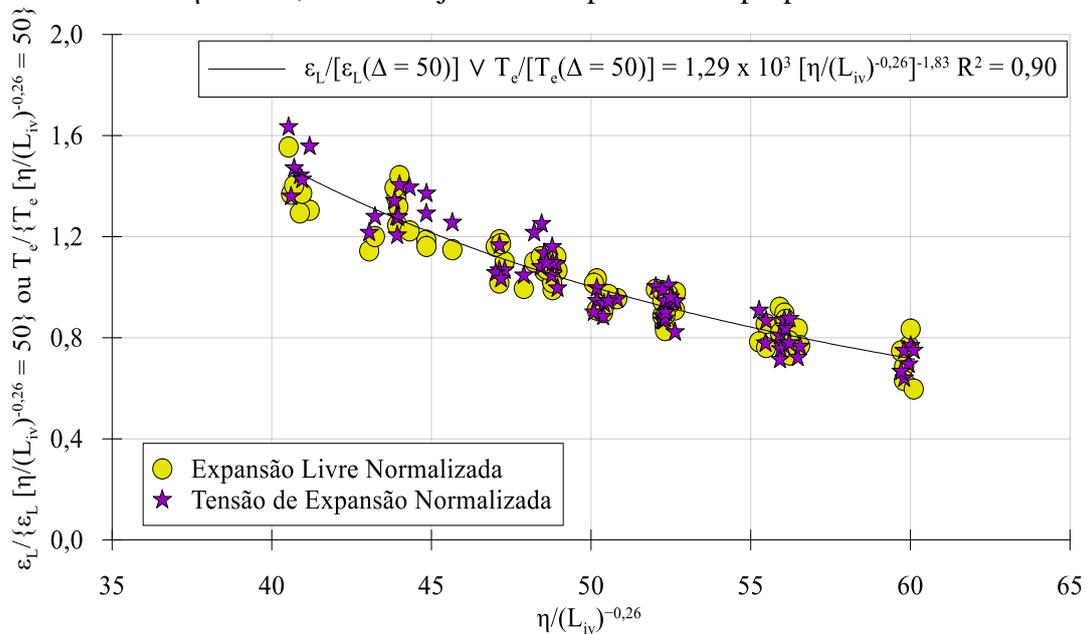
Figura 59: Relação entre as propriedades expansivas normalizadas e o parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$, com um ajuste individual para cada propriedade



Esse procedimento é análogo ao adotado por Consoli, Marques, et al., (2017), que unificaram os dados normalizados de resistência à compressão simples e resistência à tração em uma única expressão matemática. Assim, a aplicação desse método ao

comportamento expansivo dos solos estabilizados pode contribuir para uma modelagem mais simplificada. Sob essa perspectiva, obteve-se o ajuste ilustrada na Figura 60 e descrita na Equação 20, com uma alta correção estatística ($R^2 = 0,90$).

Figura 60: Relação entre as propriedades expansivas normalizadas e o parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$, com um ajuste único para ambas propriedades



$$\frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_L \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}} = 50 \right)} \vee \frac{T_e}{T_e \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}} = 50 \right)} = 1,29 \times 10^3 \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}} \right)^{-1,83} \quad \text{Eq. (20)}$$

Onde:

T_e : Tensão de expansão (kPa)

ε_L : Expansão Livre (%)

η : Porosidade

L_{iv} : Teor volumétrico de cal

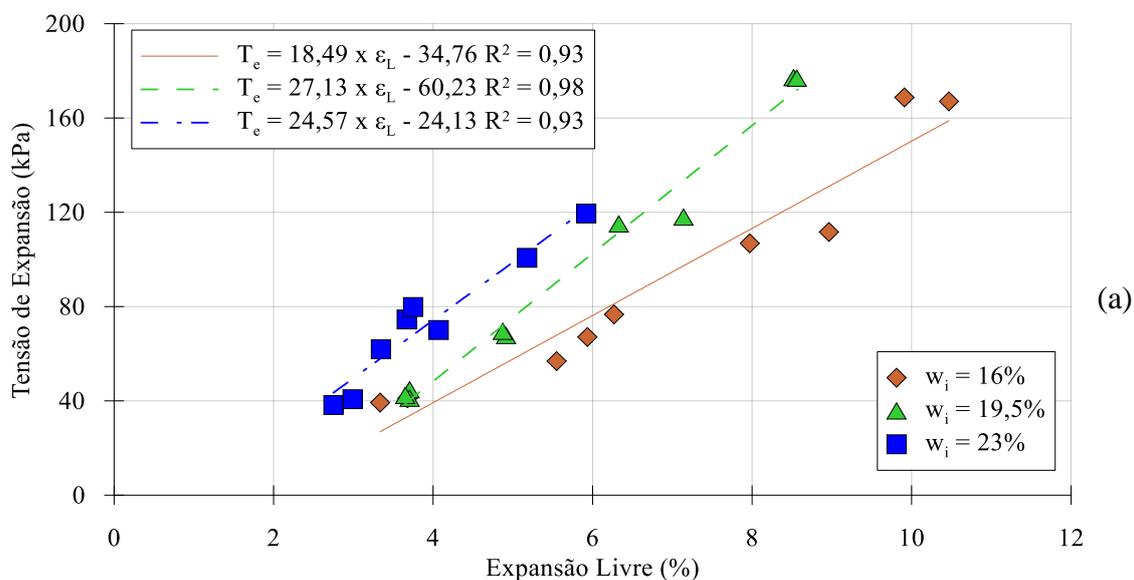
Dessa forma, os dados indicam que a expansão livre e a tensão de expansão normalizadas apresentam um comportamento semelhante quando avaliadas em função do parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$. Essa similaridade permitiu que ambas fossem ajustadas por meio de uma única equação, garantindo um desempenho satisfatório na correlação dos parâmetros e reforçando a aplicabilidade do modelo proposto dentro dos intervalos estudados, sendo: $\eta/L_{iv}^{-0,26}$ de 40 a 60 e umidades iniciais entre 16% e 23%. Além disso, a dosagem proposta não tem a capacidade de descrever bem o comportamento de amostras com saturação inicial próxima a 100%.

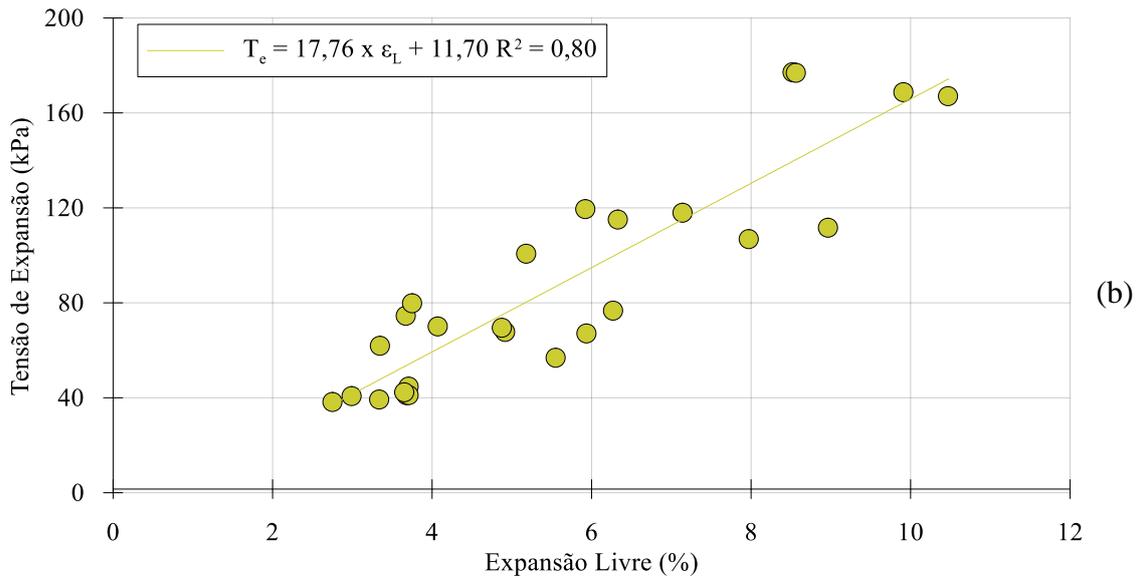
4.5. Correlação entre expansão livre e tensão de expansão

Os pares de dados obtidos nos ensaios de expansão foram utilizados para estabelecer uma relação capaz de determinar a tensão de expansão a partir da expansão livre. As análises dessa seção foram feitas com base nas amostras do solo estabilizado com 0%, 2%, 3% e 4% de cal, peso específico seco de 13,5; 14,5; 15,5; 16,5 kN/m³ e umidade inicial de 16%, 19,5% e 23%.

A Figura 61 (a) ilustra o ajuste obtido entre tensão de expansão e expansão livre, para o solo puro, segmentada para as diferentes umidades iniciais. Foram obtidos bons ajustes, com altos valores de R^2 , mostrando uma relação diretamente proporcional entre as variáveis. Porém, observa-se um deslocamento das retas para cima, conforme a umidade inicial aumenta, indicando uma mudança na razão entre as propriedades expansivas em função da umidade inicial. A Figura 61 (b) expõe a tentativa de ajuste de todos os dados com uma única reta, obtendo um R^2 de 0,80.

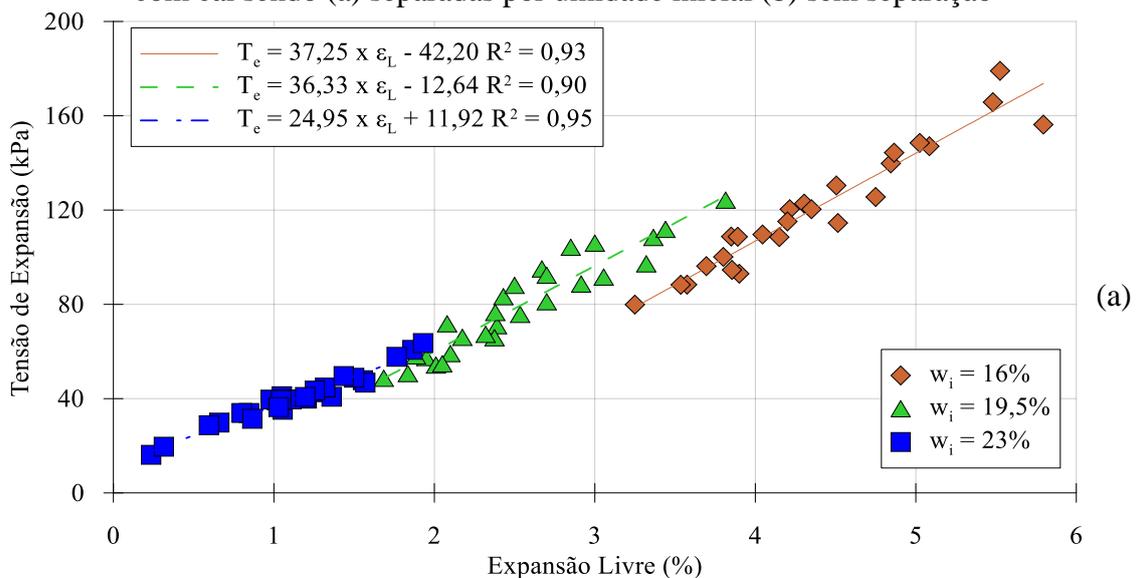
Figura 61: Tensão de expansão em função da expansão livre, para as o solo puro sendo (a) separadas por umidade inicial (b) sem separação

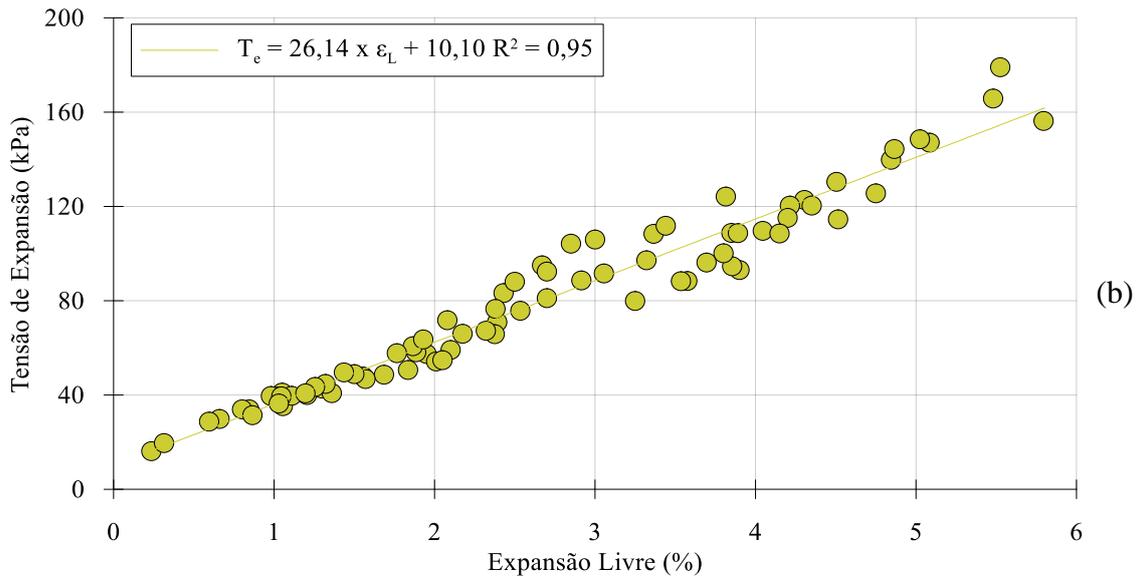




A Figura 62 (a) expõe a tensão de expansão em função expansão livre de todas as amostras do solo estabilizado com cal, separadas por umidade inicial. A partir disso, se estabelece uma relação diretamente proporcional entre as propriedades expansivas e observa-se que as diferentes linhas de tendência são praticamente complementares entre si. Por essa razão, na Figura 62 (b) foi feito um novo ajuste sem a separação das diferentes umidades iniciais, com destaque para o R^2 obtido de 0,95. Observa-se uma certa dispersão dos dados próximos ao meio do gráfico, porém, do ponto de vista prático, a regressão estabelecida pode ser uma ferramenta útil, visando a otimização de ensaios laboratoriais.

Figura 62: Tensão de expansão em função da expansão livre, para as o solo estabilizado com cal sendo (a) separadas por umidade inicial (b) sem separação





As amostras com $\gamma_d = 16,5 \text{ kN/m}^3$ e $w_i = 23\%$, apesar de apresentarem comportamento adverso nas análises das seções anteriores, exibiram a mesma relação entre expansão livre e tensão de expansão que o restante das amostras, mostrando que a alta saturação inicial não afetou a relação das propriedades expansivas entre si. Ademais, constata-se uma forte correlação entre as variáveis expansivas do solo estabilizado com cal, independente dos valores adotados do peso específico seco, teor de cal e umidade inicial. A Equação 21 estabelece a relação linear obtida entre os parâmetros. A relação obtida por Guimarães (2023) por meio da regressão linear de seus dados experimentais apresentou coeficientes similares, mesmo considerando que, em sua pesquisa, o solo foi estabilizado com CBCA e cal. Esse resultado sugere a consistência da abordagem apesar da adoção de CBCA.

$$T_e = 26,14 \times \varepsilon_L + 10,10 \quad \text{Eq. (21)}$$

Onde:

T_e : Tensão de expansão (kPa)

ε_L : Expansão Livre (%)

Com base nesses resultados, investigou-se a possibilidade de estabelecer uma correlação direta entre a tensão de expansão e a expansão livre, a partir do parâmetro $\eta/L_{iv}^{-0,26}$. Então, seguindo o procedimento adotado anteriormente por Guimarães (2023), realizou-se a divisão das equações de tendência apresentadas anteriormente na Figura 59, conforme expresso na Equação 22, resultando na razão explicitada na Equação 23. A partir dessa relação, tornou-se possível obter a tensão de expansão normalizada em função da expansão livre normalizada e vice-versa.

$$\frac{\frac{\varepsilon_L}{\left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}} = 50\right)}}{T_e} = \frac{1,28 \times 10^3 \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}}\right)^{-1,83}}{1,30 \times 10^3 \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}}\right)^{-1,83}} \quad \text{Eq. (22)}$$

$$\frac{\varepsilon_L}{\left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}} = 50\right)} = 0,9846 \times \frac{T_e}{T_e \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{-0,26}} = 50\right)} \quad \text{Eq. (23)}$$

Onde:

ε_L : Expansão Livre (%)

T_e : Tensão de expansão (kPa)

η : Porosidade

L_{iv} : Teor volumétrico de cal

Nesse contexto, observa-se que, numericamente, a expansão livre normalizada é aproximadamente igual à tensão de expansão normalizada ($0,9846 \approx 1$). Essa proximidade sugere uma forte correlação entre os parâmetros analisados e corrobora com a adoção de uma única expressão para descrever ambas as variáveis, na seção anterior.

Ademais, a partir das Equações 21 ou 23, obtidas por abordagens distintas, torna-se viável determinar a tensão de expansão a partir da expansão livre, e vice-versa, do solo estabilizado com cal. Esse método preditivo demonstra desempenho satisfatório, proporcionando uma ferramenta prática para profissionais e possibilitando reduzir a quantidade de ensaios realizados. Sua aplicação permite a definição racional da dosagem da cal necessária para a estabilização de solos expansivos, melhorando a eficiência das intervenções geotécnicas.

4.6. Sucção total inicial e sua relação com as propriedades expansivas

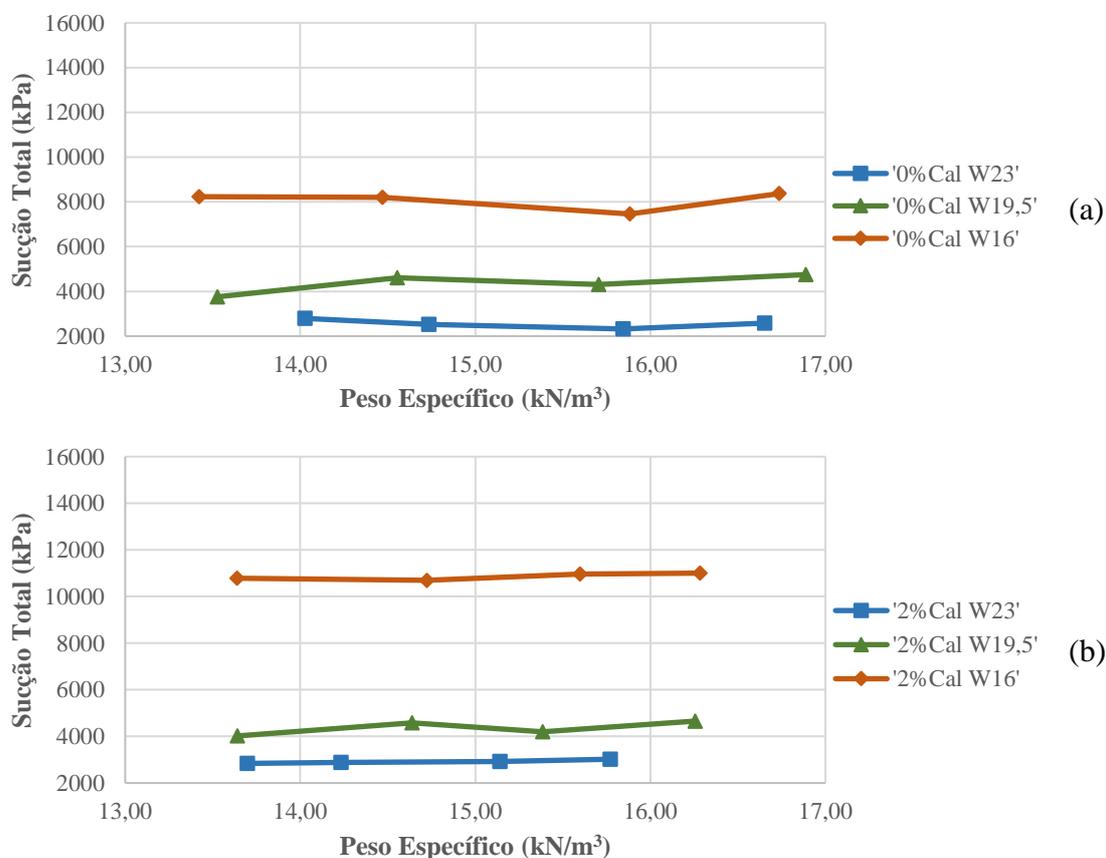
A partir da aplicação da metodologia do papel filtro, foram obtidos os valores de sucção total inicial do solo expansivo puro e estabilizado com três teores de cal (2%, 3% e 4%), considerando os diferentes níveis adotados para peso específico seco (13,5; 14,5; 15,5; 16,5 kN/m³) e umidade inicial (16%; 19,5%; 23%).

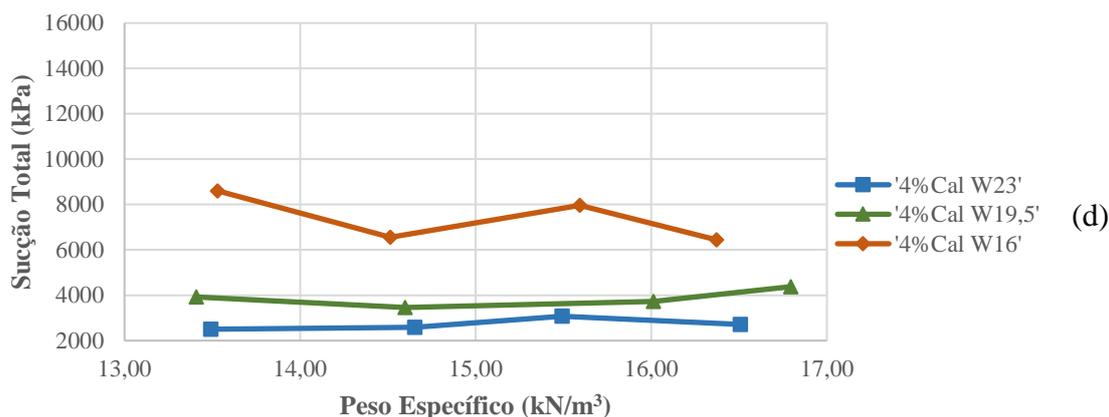
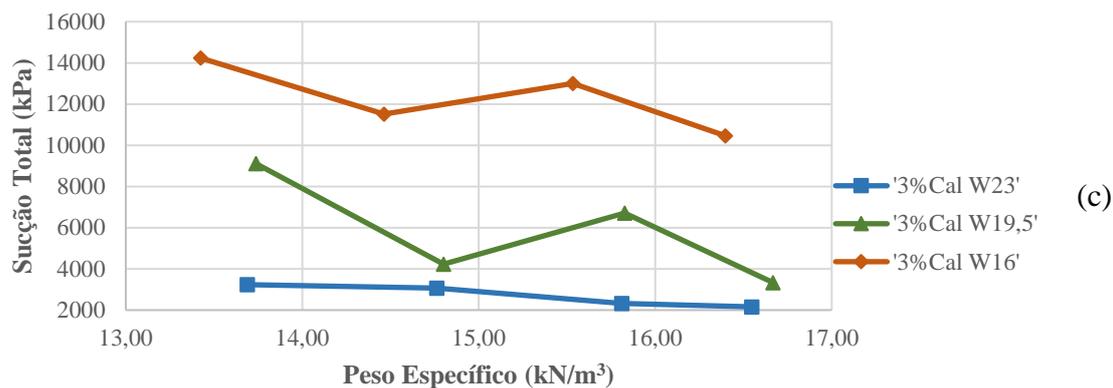
A Figura 63 ilustra a sucção total obtidas para as amostras, em função do peso específico seco, separadas pelos diferentes teores de cal. É possível observar que o peso específico seco não exerce influência clara sobre a sucção total das amostras, com destaque a um comportamento horizontalizado para a maioria das amostras. Esse comportamento corrobora com estudos anteriores na literatura, que identificaram a

influência do peso específico somente para amostras com baixos valores de sucção, a partir de um certo valor, o parâmetro deixa de exercer influência (Chen *et al.*, 2024a; b; Gao *et al.*, 2019; Liang *et al.*, 2021; Qian, Lin e Shi, 2022). Na presente pesquisa, por se tratar de um solo expansivo, naturalmente irá apresentar maiores valores de sucção, explicando assim, a ausência de relação entre peso específico e sucção total, em todas as amostras (Liang *et al.*, 2021).

Na Figura 63 identifica-se, na maioria das amostras, uma redução mais significativa da sucção total ao alterar a umidade inicial de 16% para 19,5% e uma redução menos significativa ao alterar de 19,5% para 23%. Comportamento já esperado, pois, a sucção total é composta essencialmente por duas parcelas, a sucção mátrica e a osmótica, nesse contexto, a sucção mátrica cresce expressivamente em solos, proporcionalmente, ao quanto menor for sua umidade (Marinho, 2005; Marinho e Stuermer, 2000). Ademais, outras pesquisas obtiveram resultados similares (Wang *et al.*, 2016).

Figura 63: Sucção total inicial das amostras em função do peso específico seco, separados nos teores de cal (a) 0% (b) 2% (c) 3% (d) 4%





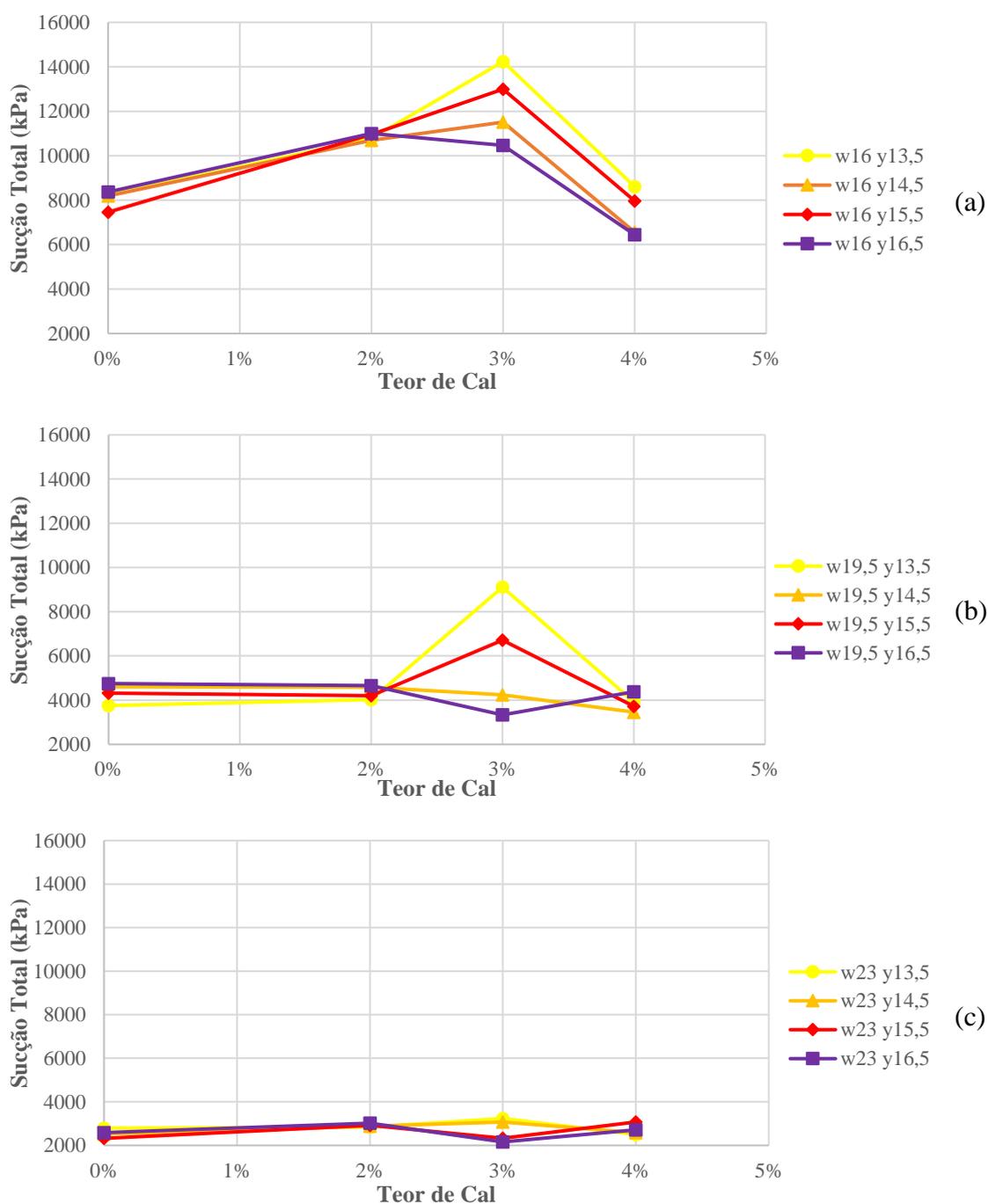
A Figura 64 ilustra a sucção total das misturas solo-cal em função do teor de cal, separadas pelas diferentes umidades iniciais. As amostras com umidade inicial de 16% mostraram uma tendência de aumento da sucção total com a adição de cal até o teor de 3%. Esse comportamento foi previamente observado por Petry e Jiang (2007) em solos expansivos e por Rahman e Tarefder (2015) em argilas de alta e baixa plasticidade. No entanto, a adição de 4% de cal interrompeu essa tendência, resultando em uma redução expressiva da sucção total.

As amostras com umidade inicial de 19,5% e 23% apresentaram um comportamento relativamente constante, sugerindo que a adição de cal não resultou em alterações significativas na sucção total. No entanto, uma exceção foi identificada nas amostras com $w_i = 19,5\%$ e teor de cal de 3%, nas quais alguns CPs apresentaram um aumento expressivo da sucção total, destoando das demais amostras. Resultados semelhantes foram reportados por Ying et al. (2022), que também observaram a ausência de efeito significativo da adição de cal na sucção total em um silte plástico rico em sais.

Esse comportamento pode ser atribuído às contribuições distintas das parcelas mátrica e osmótica da sucção, que são influenciadas de maneira diferenciada pela adição de cal. A parcela osmótica tende a aumentar com a adição de cal, uma vez que a

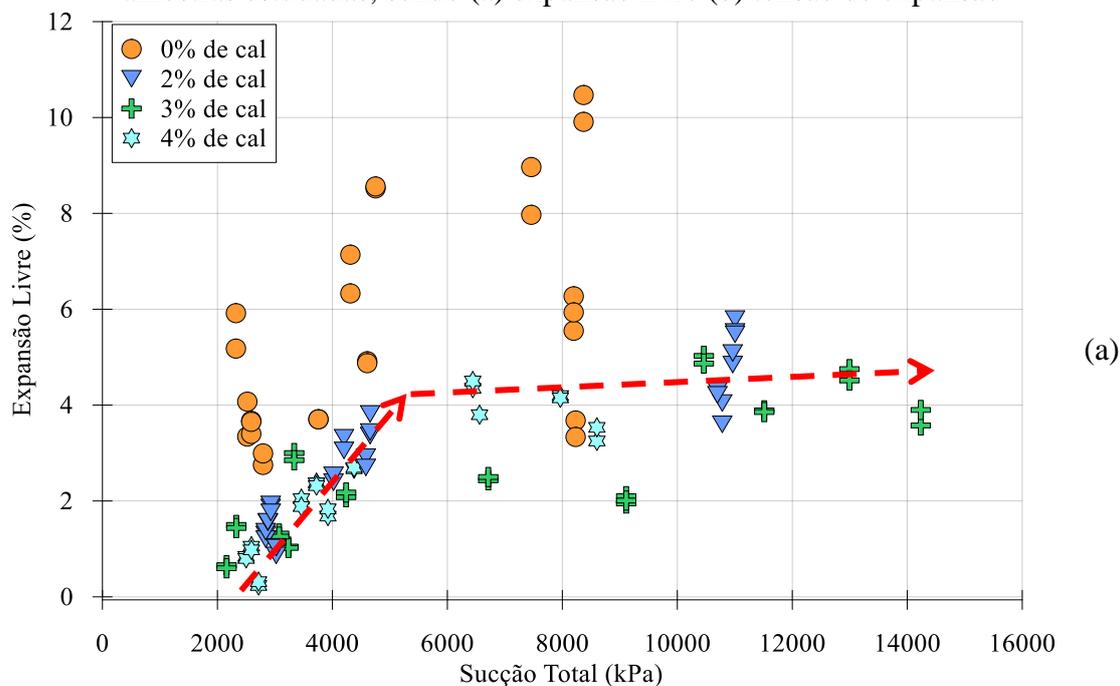
concentração de cátions na água intersticial do solo se eleva, seja pelo aporte de Ca^{2+} proveniente da cal, seja pela liberação de cátions monovalentes durante o processo de estabilização (Petry e Jiang, 2007; Rahman e Tarefder, 2015; Ying et al., 2022). No entanto, Zhang, Mavroulidou e Gunn (2015) relataram uma redução da sucção mátrica em solos expansivos estabilizados com cal, possivelmente associada ao engrossamento das partículas e à equalização das forças adsorptivas de água.

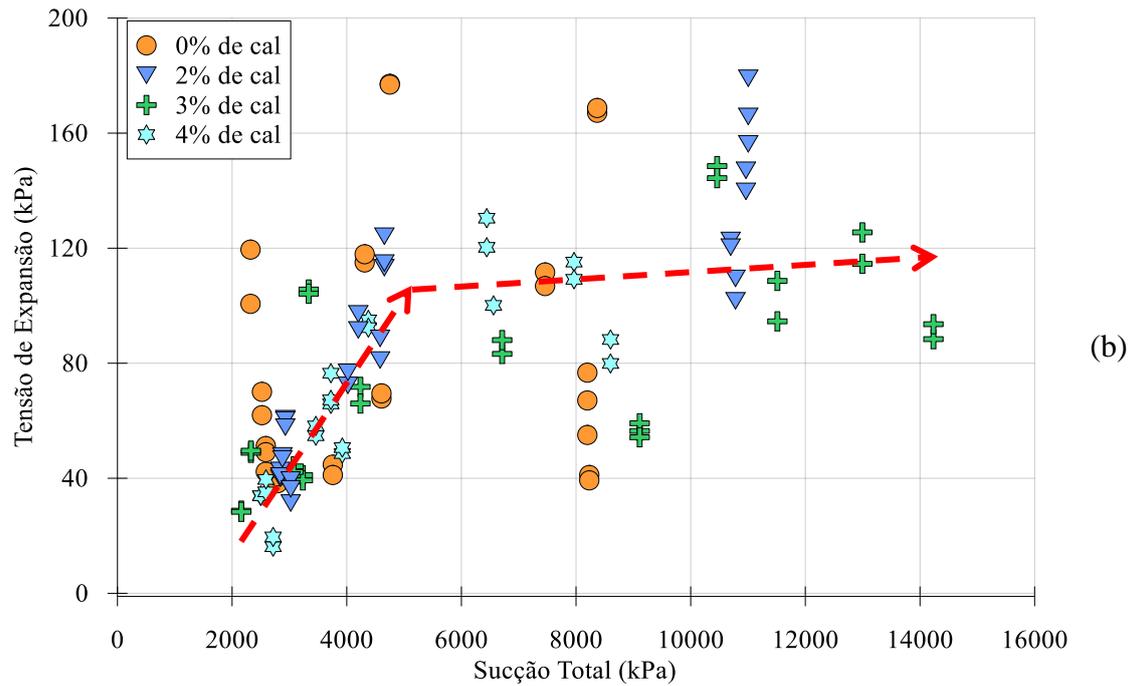
Figura 64: Sucção total inicial das amostras em função do teor de cal, separados pelas umidades iniciais (a) 16% (b) 19,5% (c) 23%



A Figura 65 expõe a análise das propriedades expansivas das misturas solo-cal em função da respectiva sucção total inicial da amostra, sendo (a) expansão livre (b) tensão de expansão. Como pode ser visto, os dados referentes ao solo puro não apresentaram nem um tipo de tendência e destoam das demais. As amostras constituídas do solo estabilizado com cal, mostraram um comportamento em conjunto, em que, até cerca de 5000 kPa a sucção total inicial exerce um efeito significativo sobre propriedades expansivas, diretamente proporcional. Porém, após os 5000 kPa, o efeito se torna menos expressivo, passando a influenciar menos a expansão livre e a tensão de expansão. Al-Mahbashi, Al-Shamrani e Moghal, (2020) obtiveram resultados parecidos ao analisar as mesmas propriedades de um solo estabilizado com fibras de polipropileno, sendo 10000 kPa o valor de sucção que ouve a mudança no comportamento.

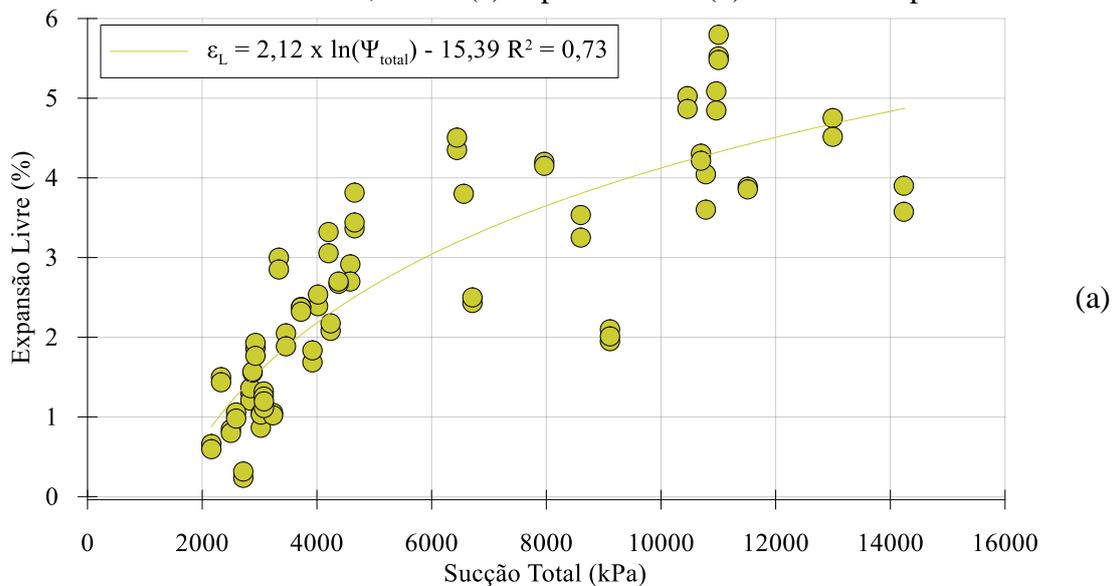
Figura 65: Propriedades expansivas em função da sucção total inicial para todas as amostras estudadas, sendo (a) expansão livre (b) tensão de expansão

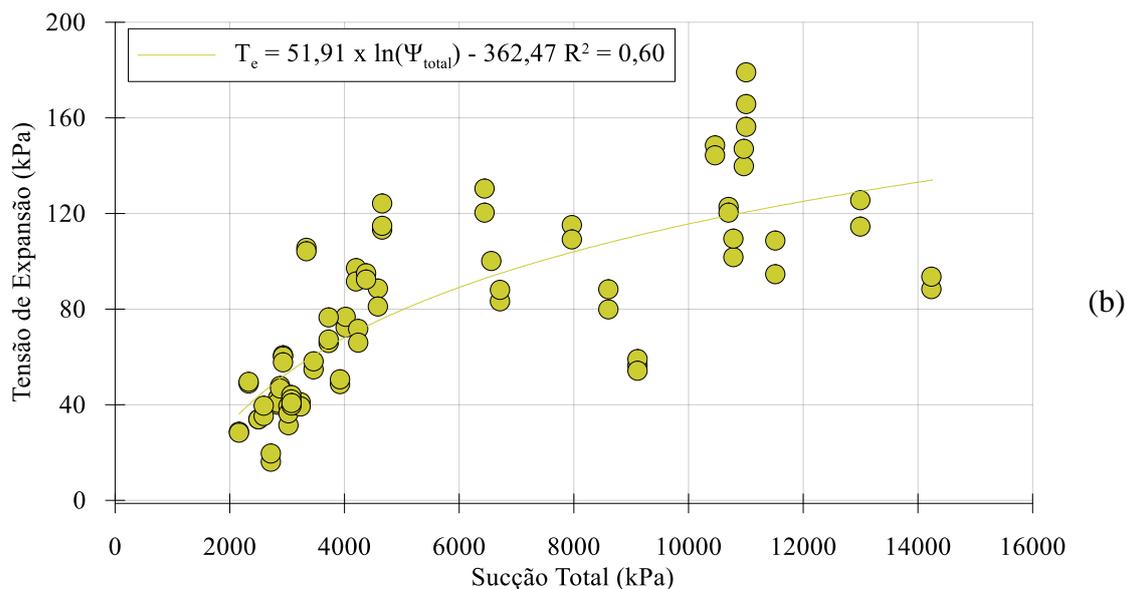




A Figura 66 exibe uma curva de tendência, com ajuste logarítmico, para as amostras de solo estabilizado com cal, sendo (a) expansão livre (b) tensão de expansão. Em ambas as propriedades expansivas observa-se uma grande dispersão dos dados, principalmente após os 5000 kPa de sucção, o que resultou em valores de R^2 menos expressivos.

Figura 66: Ajuste entre sucção total inicial e as propriedades expansivas do solo estabilizado com cal, sendo (a) expansão livre (b) tensão de expansão

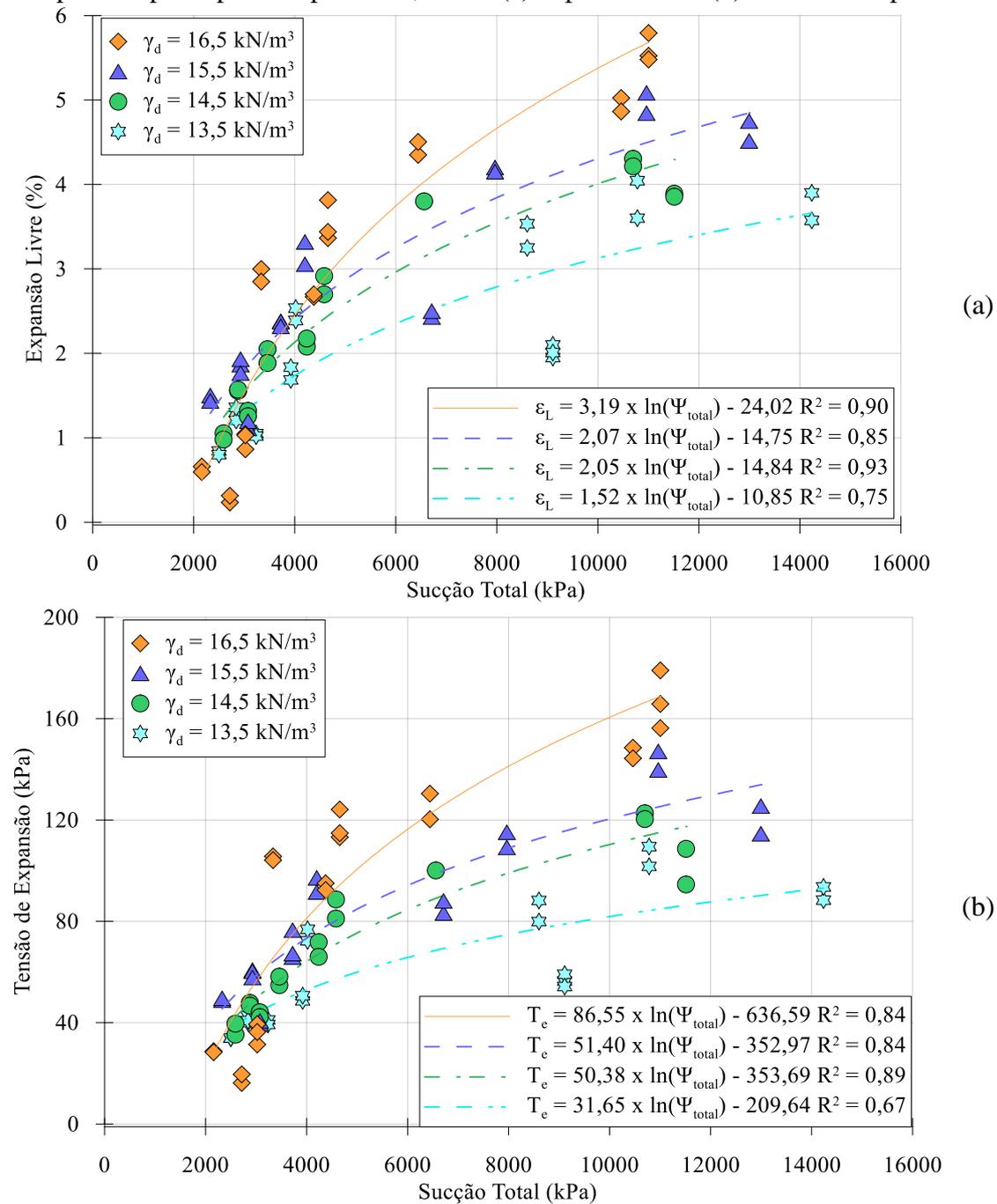




A Figura 67 expõe a relação entre propriedades expansivas e sucção total inicial das misturas solo-cal, separadas pelos diferentes pesos específicos secos adotados, com destaque para os altos valores de R^2 . Independentemente do peso específico seco, observa-se que o aumento da sucção total inicial faz as amostras expandirem mais, devido ao aumento da afinidade à adsorção de água (Al-Mahbashi, Al-Shamrani e Moghal, 2020).

Nesse sentido, para menores valores de sucção total inicial, até 5000 kPa, as curvas de tendência convergem para a mesma região, logo, não é possível estabelecer qualquer relação em função do peso específico. Porém, para maiores valores de sucção total inicial, a partir de 5000 kPa, é possível observar um deslocamento das curvas de tendência para cima, proporcional à quanto maior for o peso específico seco. Ou seja, a partir dos 5000 kPa, amostras com mesma sucção total inicial tendem a apresentar expansão diferente, a depender do peso específico seco em que se encontram.

Figura 67: Propriedades expansivas das misturas solo-cal, em função da sucção inicial, separadas pelos pesos específicos, sendo (a) expansão livre (b) tensão de expansão



Assim, contata-se o efeito conjunto da sucção total inicial e do peso específico seco nas propriedades expansivas dos solos, em que, o aumento de sucção gera maior afinidade com a adsorção de água e o aumento do peso específico seco diminui os macroporos, ambos realçando o processo expansivo do solo estabilizado com cal.

5. CONCLUSÕES

A realização de ensaios de expansão em célula edométrica e ensaios de sucção total em um solo expansivo estabilizado com cal, considerando diferentes umidades iniciais, permitiu a obtenção de importantes conclusões sobre o comportamento da expansão livre e da tensão de expansão.

- A umidade inicial exerce uma influência significativa nas propriedades expansivas tanto do solo puro quanto do solo estabilizado com cal. Observou-se que, à medida que a umidade inicial aumenta, ocorre uma redução na expansão livre e na tensão de expansão desenvolvida pelo solo. Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento da saturação inicial dos microporos dos argilominerais. Quando o solo apresenta maior umidade inicial, parte dos microporos já está preenchida com água, reduzindo a disponibilidade de espaços vazios para absorção adicional de água durante a inundação. Conseqüentemente, o processo de hidratação dos argilominerais é menos intenso, resultando em uma menor expansão volumétrica da amostra. Esse efeito se manifesta tanto no solo puro quanto no solo estabilizado com cal;
- A aplicação do parâmetro η/L_{iv} para a modelagem das propriedades expansivas de amostras com diferentes umidades iniciais mostrou-se eficaz. Para garantir um ajuste adequado, foi necessário adotar um expoente de correção no denominador com valor de -0,26. Com esse ajuste, observou-se a formação de uma curva de dosagem representativa para cada umidade inicial, tanto para a expansão livre quanto para a tensão de expansão. Cada uma dessas curvas apresentou uma forte correlação entre as variáveis, evidenciando a viabilidade do método na previsão do comportamento expansivo de solos estabilizados. No entanto, identificou-se uma limitação do método: amostras com saturação inicial próxima de 100% não puderam ser enquadradas nas curvas de dosagem. Esse comportamento pode estar associado à ausência de variação significativa de umidade durante a inundação dessas amostras, limitando o desenvolvimento da expansão e, conseqüentemente, desviando-se da tendência geral observada. Ademais, as diferentes curvas de dosagem foram satisfatoriamente normalizadas, permitindo a obtenção de uma única curva para cada propriedade expansiva;
- Foram propostas duas relações matemáticas para a determinação da tensão de expansão a partir da expansão livre e vice-versa. A primeira relação está expressa

na Equação 21 e foi obtida por meio de uma regressão linear simples dos dados experimentais, apresentando uma forte correlação entre as variáveis. A segunda relação foi derivada a partir da razão entre as equações de dosagem do parâmetro η/L_{iv} , permitindo uma abordagem mais generalizada e fundamentada na modelagem teórica das propriedades expansivas. Essa relação matemática está evidenciada na Equação 23, oferecendo uma alternativa baseada em normalização de dados para correlacionar as propriedades expansivas do solo;

- A análise das propriedades expansivas em função da sucção total inicial revelou um comportamento duplo. Para valores de sucção total inicial até 5000 kPa, tanto a expansão livre quanto a tensão de expansão aumentam acentuadamente à medida que a sucção total inicial cresce. Esse comportamento independe do teor de cal e do peso específico seco da amostra, sugerindo que, nessa faixa, a sucção inicial tem um papel notável no controle do comportamento expansivo. Acima de 5000 kPa, a influência da sucção total inicial sobre as propriedades expansivas se torna menos expressiva. No entanto, observou-se uma segregação das curvas de tendência, indicando que, para uma mesma sucção total inicial, quanto maior o peso específico seco, maior a expansão observada.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

A partir da experiência adquirida e dos resultados e conclusões discutidos neste estudo, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Investigar o efeito da umidade inicial na dosagem de solos expansivos com diferentes agentes estabilizantes, como cimento, cinzas ou aditivos químicos;
- Aplicar a metodologia proposta nesta pesquisa em outros solos expansivos, de diferentes regiões geológico-geográficas, para validar e generalizar a influência da umidade inicial sobre as propriedades expansivas;
- Analisar o impacto do *mellowing* e do tempo de cura na aplicabilidade do parâmetro de dosagem η/L_{iv} voltado às propriedades expansivas.

Essas direções de pesquisa podem contribuir para um melhor entendimento do comportamento de solos expansivos e para o aprimoramento das técnicas de estabilização, promovendo maior segurança e eficiência em projetos de engenharia geotécnica.

REFERÊNCIAS

- AKSOLAN, O.; BINICI, H.; ORTLEK, E. Durability of concrete made by partial replacement of fine aggregate by colemanite and barite and cement by ashes of corn stalk, wheat straw and sunflower stalk ashes. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 253–263, 1 mar. 2016.
- AL-MAHBASHI, A. M.; AL-SHAMRANI, M. A.; MOGHAL, A. A. B. Soil–Water Characteristic Curve and One-Dimensional Deformation Characteristics of Fiber-Reinforced Lime-Blended Expansive Soil. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 6, p. 04020125, 23 jun. 2020.
- AL-MAHBASHI, A. M.; DAFALLA, · MUAWIA. The distribution and mineralogy of expansive clay in a semi-arid region. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 16, n. 4, p. 1–13, 30 mar. 2023.
- AL-MUKHTAR, M.; LASLEDJ, A.; ALCOVER, J. F. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C. **Applied Clay Science**, v. 50, n. 2, p. 191–198, 1 out. 2010.
- 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, 1 maio 2005.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C837**, Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2024b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2487**, Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2025.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3282**, Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2024a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4546**, Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5298**, Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D6276**, Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- AMETA, N. K.; PUROHIT, D. G. M.; WAYAL, A. S. Characteristics, Problems and Remedies of Expansive Soils of Rajasthan, India. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 13, p. 1–7, 2007.

AMORIM, L. V.; VIANA, J. D.; FARIAS, K. V.; BARBOSA, M. I. R.; FERREIRA, H. C. Estudo comparativo entre variedades de argilas bentoníticas de Boa Vista, Paraíba. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 11, n. 1, p. 30–40, 2006.

ARAÚJO, M. T. **Comportamento de solo expansivo estabilizado por ligante alcali-ativado oriundo de resíduos sustentabilidade, propriedades mecânicas e microestruturais**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2024b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Solos — Determinação da massa específica dos sólidos, da massa específica aparente e da absorção de água da fração retida na peneira com abertura de 2,0 mm. Rio de Janeiro, 2025a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2025b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604**: Solo - Abertura de Poço e Trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2024a.

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

BARBOSA, V. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

BARMAN, D.; DASH, S. K. Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 14, n. 4, p. 1319–1342, 1 ago. 2022.

BELL, F. G. Lime stabilization of clay minerals and soils. **Engineering Geology**, v. 42, n. 4, p. 223–237, 1 jul. 1996.

BIN, S.; ZHIBIN, L.; YI, C.; XIAOPING, Z. Micropore Structure of Aggregates in Treated Soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 19, n. 1, p. 99–104, 1 jan. 2007.

CARVALHO, J. C. DE; GITIRANA, G. DE F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. DOS A.; SILVA, F. C. DA; RODRIGUES, R. A. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 2. ed. São Paulo, SP, Brazil: ABMS, 2023.

CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, v. 92, n. 2, p. 82–89, maio 1992.

CHANDLER, R. J.; GUTIERREZ, C. I. The filter-paper method of suction measurement. **Geotechnique**, v. 36, n. 2, p. 265–268, jun. 1986.

CHEN, K.; HE, X.; LIANG, F.; SHENG, D. Influences of ink-bottle effect evolution on water retention hysteresis of unsaturated soils: An experimental investigation. **Engineering Geology**, v. 330, p. 107409, 1 fev. 2024a.

CHEN, K.; HE, X.; LIANG, F.; SHENG, D. Strength and dilatancy of an unsaturated expansive soil at high suction levels. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 10 nov. 2024b.

CHEN, R.; CONGRESS, S. S. C.; CAI, G.; DUAN, W.; LIU, S. Sustainable utilization of biomass waste-rice husk ash as a new solidified material of soil in geotechnical engineering: A review. **Construction and Building Materials**, v. 292, p. 123219, 19 jul. 2021.

CONSOLI, N. C.; ARAÚJO, M. T. DE; FERRAZZO, 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, jun. 2020.

CONSOLI, N. C.; DAASSI-GLI, C. A. P.; RUVER, C. A.; LOTERO, A.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MONCALEANO, C. J.; LOURENÇO, D. E. Lime–Ground Glass–Sodium Hydroxide as an Enhanced Sustainable Binder Stabilizing Silica Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 147, n. 10, p. 06021011, 30 out. 2021.

CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L.; CONSOLI, B. S.; LOPESJR., L. DA S. Assessing Failure Envelopes of Soil–Fly Ash–Lime Blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 5, p. 04014174, 11 ago. 2014.

CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L.; FILHO, H. C. S.; MIGUEL, G. D.; NETO, A. T.; ANDREGHETTO, D. Durability Assessment of Soil-Pozzolan-Lime Blends through Ultrasonic-Pulse Velocity Test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 8, p. 04020223, 29 ago. 2020.

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, 1 fev. 2007.

CONSOLI, N. C.; IBRAIM, E.; DIAMBRA, A.; FESTUGATO, L.; MARQUES, S. F. V. A sole empirical correlation expressing strength of fine-grained soils - Lime mixtures. **Soils and Rocks**, v. 40, n. 2, p. 147–153, 1 ago. 2017.

CONSOLI, N. C.; LOPES JUNIOR., L. DA 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, 1 maio 2009.

CONSOLI, N. C.; LOPESJR., L. DA S.; PRIETTO, P. D. M.; FESTUGATO, L.; CRUZ, R. C. Variables Controlling Stiffness and Strength of Lime-Stabilized Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 137, n. 6, p. 628–632, 28 out. 2010.

CONSOLI, N. C.; MARIN, E. J. B.; QUIÑÓNEZ SAMANIEGO, R. A.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; CRISTELO, N. M. C. Field and laboratory behaviour of fine-grained soil stabilized with lime. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 57, n. 6, p. 933–938, 2019.

CONSOLI, N. C.; MARQUES, S. F. V.; SAMPA, N. C.; BORTOLOTTI, M. S.; SIACARA, A. T.; NIERWINSKI, H. P.; PEREIRA, F.; FESTUGATO, L. A general relationship to estimate strength of fibre-reinforced cemented fine-grained soils. **Geosynthetics International**, v. 24, n. 4, p. 435–441, 21 abr. 2017.

CONSOLI, N. C.; MORALES, D. P.; SALDANHA, R. B. A new approach for stabilization of lateritic soil with Portland cement and sand: strength and durability. **Acta Geotechnica**, v. 16, n. 5, p. 1473–1486, 1 maio 2021.

CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; LOPES, L. DA S.; WINTER, D. Control factors for the long term compressive strength of lime treated sandy clay soil. **Transportation Geotechnics**, v. 1, n. 3, p. 129–136, 1 set. 2014.

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, 31 mar. 2014.

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, p. 06014015, 28 ago. 2014.

CONSOLI, N. C.; ROSA, A. D.; SALDANHA, R. B. Variables Governing Strength of Compacted Soil–Fly Ash–Lime Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 4, p. 432–440, 30 set. 2010.

CONSOLI, N. C.; ROSSI, J. G.; FESTUGATO, L.; RUVIER, C. A.; FILHO, H. C. S.; FOPPA, D.; CARRETTA, M. DA S.; LEON, H. B. Circular-Plate Load Tests on Bounded Cemented Layers above Weak Cohesive-Frictional Soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 145, n. 10, p. 06019011, 27 jul. 2019.

CONSOLI, N. C.; VENDRUSCOLO, M. A.; PRIETTO, P. D. M. Behavior of Plate Load Tests on Soil Layers Improved with Cement and Fiber. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 1, p. 96–101, 1 jan. 2003.

CORDEIRO, G. C.; KURTIS, K. E. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement and Concrete Research**, v. 97, p. 41–49, 1 jul. 2017.

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, p. 100637, 1 nov. 2021.

DIAMOND, S.; KINTER, E. B. Mechanisms of soil-lime stabilization. **Highway Research Record**, n. 92, 1965.

DU, J.; ZHOU, A.; LIN, X.; BU, Y.; KODIKARA, J. Prediction of swelling pressure of expansive soil using an improved molecular dynamics approach combining diffuse double layer theory. **Applied Clay Science**, v. 203, p. 105998, 15 mar. 2021.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. **Highway Research Record**, n. 139, 1966.

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, 1 fev. 2013.

FATTAH, M. Y.; AL-LAMI, A.; AHMED, M. D. Effect of Initial Water Content on the Properties of Compacted Expansive Unsaturated Soil. **Journal of Engineering**, v. 21, n. 03, p. 93–108, 1 mar. 2015.

FATTAH, M. Y.; SALIM, N. M.; IRSHAYYID, E. J. Influence of soil suction on swelling pressure of bentonite-sand mixtures. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 26, n. 7, p. 2554–2568, 2017.

FATTAH, M. Y.; SALIM, N. M.; IRSHAYYID, E. J. Swelling Behavior of Unsaturated Expansive Soil. **Transportation Infrastructure Geotechnology**, v. 8, n. 1, p. 37–58, 1 mar. 2021.

FERBER, V.; AURIOL, J. C.; CUI, Y. J.; MAGNAN, J. P. On the swelling potential of compacted high plasticity clays. **Engineering Geology**, v. 104, n. 3–4, p. 200–210, 23 mar. 2009.

FERREIRA, S. R. DE M. **Colapso e expansão de solos naturais não saturados devidos à inundação**. 1995. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharias), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

FERREIRA, S. R. DE M.; FERREIRA, M. DA G. DE V. X. Mudanças de volume devido à variação do teor de água em um vertissolo no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 779–791, 2009.

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, 8 jan. 2017.

FERREIRA, S. R. DE M.; SERGIO CARVALHO DE PAIVA; MARTA LÚCIA DE ALMEIDA ALMENDRA FREITAS; VALQUÍRIA BARBOSA; WELLINGTON AMORIM REGO. **Estabilidade de Solos Expansivos de Cabrobó, Paulista e Suape / PE. com Cal.**XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia Geotécnica. **Anais...**Porto de Galinhas: 2012

FREDLUND, D. G. The 1999 R.M. Hardy Lecture: The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 37, n. 5, p. 963–986, 2000.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: Wiley, 1993.

GAO, Y.; SUN, D.; ZHU, Z.; XU, Y. Hydromechanical behavior of unsaturated soil with different initial densities over a wide suction range. **Acta Geotechnica**, v. 14, n. 2, p. 417–428, 1 abr. 2019.

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, 19 jun. 2018.

GOWTHAMAN, S.; NAKASHIMA, K.; KAWASAKI, S. Effect of wetting and drying cycles on the durability of bio-cemented soil of expressway slope. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, n. 4, p. 2309–2322, 1 abr. 2022.

GUEDES, J. P. C.; SILVANI, C.; CARVALHO, J. V. DE A.; WAGNER, A. C.; SILVA, J. P. DE S.; CONSOLI, N. C. Mechanical Behaviour of Fibre-Reinforced Cemented Iron Ore Tailings Across the Compaction Curve. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 42, n. 5, p. 3421–3432, 1 jul. 2024.

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. 547–561–547–561, 30 jun. 2022.

GUIMARÃES, S. G. **Relação entre expansão unidimensional e tensão de expansão em solos expansivos tratados com cal e cinza do bagaço da cana-de-açúcar**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

HANG, P. T.; BRINDLEY, G. W. Methylene Blue Absorption by Clay Minerals. Determination of Surface Areas and Cation Exchange Capacities (Clay-Organic Studies XVIII). **Clays and Clay Minerals**, v. 18, n. 4, p. 203–212, 1970.

HERZOG, A.; MITCHELL, J. K. Reactions accompanying stabilization of clay with cement. **Highway Research Record**, n. 36, 1963.

HILT, G. H.; DAVIDSON, D. T. Lime Fixation in Clayey Soils. **Highway Research Board Bulletin**, n. 262, 1960.

HOWER, J.; MOWATT, T. C. The mineralogy of illites and mixed-layer illite/montmorillonites. **The American Mineralogist**, v. 51, n. 5–6, p. 825–854, jun. 1966.

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, 1 abr. 2019.

INDIRAMMA, P.; SUDHARANI, C.; NEEDHIDASAN, S. Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment – An experimental study. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, p. 694–700, 1 jan. 2020.

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.

KESKIN, İ.; SALIMI, M.; ATEYŞEN, E. Ö.; KAHRAMAN, S.; VAKILI, A. H. Comparative Study of Swelling Pressure in Expansive Soils considering Different Initial Water Contents and BOFS Stabilization. **Advances in Civil Engineering**, v. 2023, 2023.

KHATTAB, S. A.; AL-MUKHTAR, M.; FLEUREAU, J.-M. Long-Term Stability Characteristics of a Lime-Treated Plastic Soil. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 19, n. 4, p. 358–366, 1 abr. 2007.

KODIKARA, J.; ISLAM, T.; SOUNTHARARAJAH, A. Review of soil compaction: History and recent developments. **Transportation Geotechnics**, v. 17, p. 24–34, 15 dez. 2018.

LAMBE, T. W. The Structure of Compacted Clays. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 84, n. 2, p. 1654–1, 1 maio 1958.

LANDLIN, G.; BHUVANESHWARI, S. Evaluation of swelling pressure of an expansive soil stabilized with lime and lignosulphonate as overlay cushion: an experimental and numerical quantification. **Environmental science and pollution research international**, v. 30, n. 58, p. 122087–122106, 1 dez. 2023.

LIANG, W. YUN; YAN, R. TAO; XU, Y. FU; ZHANG, Q.; TIAN, H. HUI; WEI, C. FU. Swelling pressure of compacted expansive soil over a wide suction range. **Applied Clay Science**, v. 203, p. 106018, 15 mar. 2021.

LIU, Y.; ZHAO, Y.; VANAPALLI, S. K.; MEHMOOD, M. Soil-water characteristic curve of expansive soils considering cumulative damage effects of wetting and drying cycles. **Engineering Geology**, v. 339, p. 107642, 1 set. 2024.

MAČEK, M.; MAUKO, A.; MLADENOVIC, A.; MAJES B.; PETKOVŠEK, A. A comparison of methods used to characterize the soil specific surface area of clays. **Applied Clay Science**, v. 83–84, p. 144–152, 1 out. 2013.

MARINHO, F. A. M. **Shrinkage behaviour of some plastic soils**. 1994. Tese (Doutorado em Engenharia), University of London, Londres, 1994.

MARINHO, F. A. M. **A técnica do Papel Filtro para Medição da Sucção** Encontro sobre solos não saturados. **Anais...**Porto Alegre: 1995

MARINHO, F. A. M. Nature of Soil–Water Characteristic Curve for Plastic Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 131, n. 5, p. 654–661, 1 maio 2005.

MARINHO, F. A. M.; STUERMER, M. M. The Influence of the Compaction Energy on the SWCC of a Residual Soil. **Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000 - Advances in Unsaturated Geotechnics, GSP 99**, v. 287, p. 125–141, 2000.

MEIER, L. P.; NÜESCH, R. The Lower Cation Exchange Capacity Limit of Montmorillonite. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 217, n. 1, p. 77–85, 1 set. 1999.

MÉLO, V. DA SILVA. **Classificação e Estabilização de Solos Lateríticos do Estado da Paraíba e Rio Grande do Norte**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

MENGER, E. DA S.; BENETTI, M.; FESTUGATO, L.; IBEIRO, L. DA S.; LUZA, R. D. Hydraulic Conductivity and Compressive Strength of Cemented Soils. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 38, n. 6, p. 6031–6039, 1 dez. 2020.

MITCHELL, J. K. The fabric of natural clays and its relation to engineering properties. **Highway Research Board Proceedings**, v. 35, 1956.

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

MONROY, R.; ZDRAVKOVIC, L.; RIDLEY, A. M. Mechanical behaviour of unsaturated expansive clay under K0 conditions. **Engineering Geology**, v. 197, p. 112–131, 30 out. 2015.

MONTES, H. G.; DUPLAY, J.; MARTINEZ, L.; MENDOZA, C. Swelling–shrinkage kinetics of MX80 bentonite. **Applied Clay Science**, v. 22, n. 6, p. 279–293, 1 jun. 2003.

NALBANTOĞLU, Z. Effectiveness of Class C fly ash as an expansive soil stabilizer. **Construction and Building Materials**, v. 18, n. 6, p. 377–381, 1 jul. 2004.

NOWAMOOZ, H.; MASROURI, F. Density-dependent hydromechanical behaviour of a compacted expansive soil. **Engineering Geology**, v. 106, n. 3–4, p. 105–115, 12 jun. 2009.

OLIVEIRA JÚNIOR, R. F. DE; SILVA, J. A.; ARAÚJO JUNIOR, E. DE L.; BELLO, M. I. M. DA C. V.; FERREIRA, S. R. DE M. **Avaliação da Expansibilidade do Solo de Agrestina-PE e sua Substituição na Base de uma Fundação Superficial** 9º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia. **Anais...**São Paulo: ABEF, 2019

OSINUBI, K. J. Permeability of Lime-Treated Lateritic Soil. **Journal of Transportation Engineering**, v. 124, n. 5, p. 465–469, 1 set. 1998.

PAIVA, S. C.; LIMA, M. A. DE A.; FERREIRA, M. DA G. DE V. X.; FERREIRA, S. R. M. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, n. 2, p. 437–449, 1 abr. 2016.

PETRY, T. M.; JIANG, C. P. Soil Suction and Behavior of Chemically Treated Clays. **Transportation Research Record**, n. 2026, p. 30–38, 1 jan. 2007.

PULAT, H. F.; YUKSELEN-AKSOY, Y.; EGELI, İ. The effect of soil mineralogy and pore fluid chemistry on the suction and swelling behavior of soils. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 73, n. 1, p. 37–42, 1 fev. 2014.

- PUNTHUTAECHA, K.; PUPPALA, A. J.; VANAPALLI, S. K.; INYANG, H. Volume Change Behaviors of Expansive Soils Stabilized with Recycled Ashes and Fibers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 18, n. 2, p. 295–306, 1 abr. 2006.
- 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, 17 set. 2013.
- PUSCH, R.; YONG, R. N. **Microstructure of Smectite Clays and Engineering Performance**. [s.l.] CRC Press, 2006.
- QIAN, J.; LIN, Z.; SHI, Z. Experimental and modeling study of water-retention behavior of fine-grained soils with dual-porosity structures. **Acta Geotechnica**, v. 17, n. 8, p. 3245–3258, 1 ago. 2022.
- QUIÑÓNEZ SAMANIEGO, R. A. **Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- QUIÑÓNEZ SAMANIEGO, R. A.; 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, 2 jan. 2021.
- RAHMAN, M. T.; TAREFDER, R. A. Assessment of Molding Moisture and Suction on Resilient Modulus of Lime Stabilized Clayey Subgrade Soils. **Geotechnical Testing Journal**, v. 38, n. 6, p. 840–850, 1 nov. 2015.
- RAWI, N. M. E.; AWAD, A. A. A. Permeability of Lime Stabilized Soils. **Transportation Engineering Journal of ASCE**, v. 107, n. 1, p. 25–35, 1 jan. 1981.
- RIBEIRO, D.; NÉRI, R.; CARDOSO, R. Influence of Water Content in the UCS of Soil-Cement Mixtures for Different Cement Dosages. **Procedia Engineering**, v. 143, p. 59–66, 1 jan. 2016.
- RIBEIRO, V. H. **Estudo de caso de estudo de caso de solução para fundação em solo expansível em Sousa-PB**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal Da Paraíba, João Pessoa, 2019.
- ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S.; ROFF, T. E. J. Lime modification of clay soils for construction expediency. **Geotechnical Engineering**, v. 125, n. 4, p. 242–249, 4 out. 1997.
- SADEGHIAN, R.; MALEKI, M.; KAZEMPOUR, A. Laboratory investigation of the swelling pressure of bentonite with quicklime and hydrated lime using ASTM-4546-96 and constant volume methods. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 1–14, 11 set. 2024.
- SALDANHA, R. B.; CONSOLI, N. C. Accelerated Mix Design of Lime Stabilized Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 3, p. 06015012, 21 set. 2015.

SALDANHA, R. B.; ROCHA, C. G. DA; CAICEDO, A. M. L.; CONSOLI, N. C. Technical and environmental performance of eggshell lime for soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 298, p. 123648, 6 set. 2021.

SÁNCHEZ, F. G.; LOON, L. R. VAN; GIMMI, T.; JAKOB, A.; GLAUS, M. A.; DIAMOND, L. W. Self-diffusion of water and its dependence on temperature and ionic strength in highly compacted montmorillonite, illite and kaolinite. **Applied Geochemistry**, v. 23, n. 12, p. 3840–3851, 1 dez. 2008.

SCHANZ, T.; ELSAWY, M. B. D. Swelling characteristics and shear strength of highly expansive clay–lime mixtures: A comparative study. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, n. 10, p. 7919–7927, 30 out. 2015.

SEED, H. B.; CHAN, C. K. Structure and Strength Characteristics of Compacted Clays. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 85, n. 5, p. 87–128, 1 out. 1959.

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, 30 jun. 2020.

SILVA, J. A. H. Solos expansivos: comportamento, identificação, quantificação da instabilidade volumétrica e projectos de fundações (1 parte). **Geotecnia**, n. 13, p. 29–63, 20 jun. 1975.

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

SILVANI, C. **Influência da temperatura de cura no comportamento mecânico de misturas areia-cinza volante-cal**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SILVANI, C.; BENETTI, M.; CONSOLI, N. C. Maximum Tensile Strength of Sand - Coal Fly Ash - Lime Blends for Varying Curing Period and Temperature. **Soils and Rocks**, v. 42, n. 1, p. 83–89, 30 abr. 2019.

SILVANI, C.; GUEDES, J. P. C.; SILVA, J. C. DA; TENÓRIO, E. A. G.; NASCIMENTO, R. C. DE M. Brackish water in swelling soil stabilization with lime and sugarcane bagasse ash (SCBA). **Soils and Rocks**, v. 46, n. 3, 1 jul. 2023.

SILVANI, C.; IBRAIM, E.; HUGO, ; SCHEUERMANN FILHO, C.; FESTUGATO, ; ; LUCAS; DIAMBRA, A.; CONSOLI, N. C. Sand-Fly Ash-Lime Blends: Mechanical Behavior under Multiaxial Stress Condition. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 34, n. 5, maio 2022.

SILVANI, C.; JÚNIOR, A. DE S.; LIMA, A. DO N.; AZEVEDO, V. B. DE; VARELA, G. G. T.; JÚNIOR, P. R. S.; SILVA, J. C. DA. Micronized PET as a green additive for lime stabilization of swelling soil. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 7, p. e5975–e5975, 22 jul. 2024.

- SILVANI, C.; LUCENA, L. C. DE F. L.; TENORIO, E. A. G.; FILHO, H. C. S.; 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, p. 06020012, 23 jun. 2020.
- SILVANI, C.; SILVA, J. C. DA; GUEDES, J. P. C. Sugarcane Bagasse Ash as a Green Stabilizer for Swelling Soil. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 42, n. 2, p. 1459–1470, 1 mar. 2023.
- SILVEIRA, M. V.; CALHEIROS, A. V.; CASAGRANDE, M. D. T. Applicability of the Expanded Polystyrene as a Soil Improvement Tool. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 6, jun. 2018.
- SIVAPULLAIAH, P. V.; PRASHANTH, J. P.; SRIDHARAN, A. Delay in compaction and importance of the lime fixation point on the strength and compaction characteristics of soil. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, v. 2, n. 1, p. 27–32, jan. 1998.
- SNETHEN, D. R. **Technical guidelines for expansive soils in highway subgrades**. Washington: U.S. Federal Highway Administration, 1979.
- SOLTANI, A.; TAHERI, A.; KHATIBI, M.; ESTABRAGH, A. R. Swelling Potential of a Stabilized Expansive Soil: A Comparative Experimental Study. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 35, n. 4, p. 1717–1744, 1 ago. 2017.
- SOUZA, J. M. DE. **Solo estabilizado com cinza do bagaço da cana de açúcar alcali-ativada na pavimentação**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.
- SOUZA JÚNIOR, A. DE. **Avaliação da adição de polietileno tereftalato (PET) no controle da expansão dos solos**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.
- SRIDHARAN, A.; GURTUG, Y. Swelling behaviour of compacted fine-grained soils. **Engineering Geology**, v. 72, n. 1–2, p. 9–18, 1 mar. 2004.
- SRIKANTH, V.; MISHRA, A. K. A Laboratory Study on the Geotechnical Characteristics of Sand–Bentonite Mixtures and the Role of Particle Size of Sand. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 2, n. 1, p. 1–10, 1 mar. 2016.
- STEINBERG, M. L. **Geomembranes and the Control of Expansive Soils in Construction**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1998.
- SUDJIANTO, A. T.; SURYOLELONO, K. B.; RIFA'I, A.; MOCHTAR, I. B. Behavior of Expansive Clay of Ngawi Region (East Java) Under Water Content Variation. **Civil Engineering Dimension**, v. 11, n. 2, p. 100–105, 25 jun. 2009.
- 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, p. 132435, 22 set. 2023.
- TENÓRIO, E. A. G. **Controle da expansão dos solos com resíduos de mármore e cal**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

THOMÉ, A.; DONATO, M.; CONSOLI, N. C.; GRAHAM, J. Circular footings on a cemented layer above weak foundation soil. **Canadian geotechnical journal**, v. 42, n. 6, p. 1569–1584, dez. 2005.

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, 1 jul. 2021.

WANG, T.; WANG, Y. Mechanical and Microstructural Changes in Expansive Soils Treated with Lime and Lignin Fiber from Paper Industry. **Applied Sciences**, v. 14, n. 8, p. 3393, 17 abr. 2024.

WANG, Y.; CUI, Y. J.; TANG, A. M.; TANG, C. S.; BENAHMED, N. Changes in thermal conductivity, suction and microstructure of a compacted lime-treated silty soil during curing. **Engineering Geology**, v. 202, p. 114–121, 4 mar. 2016.

YAN, K.; WU, L. Swelling Behavior of Compacted Expansive Soils. **Recent Advancement in Soil Behavior, in Situ Test Methods, Pile Foundations, and Tunneling: Selected Papers from the 2009 GeoHunan International Conference**, p. 1–6, 13 jul. 2009.

YING, Z. et al. Changes in microstructure and water retention property of a lime-treated saline soil during curing. **Acta Geotechnica**, v. 17, n. 1, p. 319–326, 1 jan. 2022.

YONG, R. N. Soil suction and soil-water potentials in swelling clays in engineered clay barriers. **Engineering Geology**, v. 54, n. 1–2, p. 3–13, 1 set. 1999.

YUKSELEN-AKSOY, Y.; KAYA, A. Method dependency of relationships between specific surface area and soil physicochemical properties. **Applied Clay Science**, v. 50, n. 2, p. 182–190, 1 out. 2010.

ZHANG, X.; MAVROULIDOU, M.; GUNN, M. J. Mechanical properties and behaviour of a partially saturated lime-treated, high plasticity clay. **Engineering Geology**, v. 193, p. 320–336, 2 jul. 2015.

ZUMRAWI, M. Swelling Potential of Compacted Expansive Soils. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 2, n. 3, 23 mar. 2013.