



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

AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE POLIETILENO TEREFALATO (PET) NO
CONTROLE DA EXPANSÃO DOS SOLOS

Campina Grande (PB), 31 de agosto de 2021

ALEXANDRE DE SOUZA JÚNIOR

AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE POLIETILENO TEREFALATO (PET) NO
CONTROLE DA EXPANSÃO DOS SOLOS

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

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Prof^a. Dsc. Carina Silvani

S729a Souza Júnior, Alexandre de.
Avaliação da adição de polietileno tereftalato (PET) no controle da expansão dos solos / Alexandre de Souza Júnior. – Campina Grande, 2021.
130 f. : il. : color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2021.
"Orientação: Prof.^a Dr.^a Carina Silvani".
Referências.

1. Melhoramento de Solo. 2. Expansão Vertical. 3. Porosidade/Teor de Volumétrico de Aditivo. 4. PET Micronizado. 5. Cal. I. Silvani, Carina. II. Título.

CDU 631.4(043)

AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE POLIETILENO TEREFTALATO (PET) NA
EXPANSIBILIDADE DOS SOLOS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA:

Prof^a. Dsc^a. Carina Silvani

Orientadora – Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Dsc^o. Lucas Festugato

Examinador externo – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Dsc^o. Olavo Francisco dos Santos Júnior

Examinador interno – Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)



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: ALEXANDRE DE SOUZA JÚNIOR/ COMISSÃO EXAMINADORA: DR.^a CARINA SILVANI - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR. OLAVO FRANCISCO DOS SANTOS JÚNIOR – PPGECA/UFCG – EXAMINADOR INTERNO, DR. LUCAS FESTUGATO – PPGEC/UFRGS - EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 38/2021). / TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE POLIETILENO TEREFALATO (PET) NO CONTROLE DA EXPANSÃO DOS SOLOS” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INÍCIO: 09:00 HORAS / FORMA DA SESSÃO: POR VÍDEO CONFERÊNCIA.**

3. **EM SESSÃO REALIZADA POR VÍDEO CONFERÊNCIA, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O CANDIDATO FOI ARGUIDO ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA” PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**

4. **CAMPINA GRANDE, 31 DE AGOSTO DE 2021**

5.

6.

7. **LUCAS FESTUGATO – PPGEC/UFRGS - EXAMINADOR EXTERNO**



Documento assinado eletronicamente por **CARINA SILVANI, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/08/2021, às 11:41, 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 **Alexandre de Souza Júnior, Usuário Externo**, em 03/09/2021, às 11:44, 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 **OLAVO FRANCISCO DOS SANTOS JÚNIOR, PROFESSOR**, em 03/09/2021, às 14:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO (A)**, em 09/09/2021, às 14:02, 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 **1700430** e o código CRC **6E94CAB6**.

AGRADECIMENTOS

O segredo das realizações está no tamanho dos nossos sonhos e crenças. Neste momento, mais um sonho é concretizado e a palavra de ordem é gratidão:

À Deus, o mestre da vida, por conduzir e abençoar os meus passos;

Aos meus pais, Alexandre e Marleide, por todo amor e zelo;

À minha eterna bisa Julieta, fonte de vida e baluarte de amor;

À minha amada avó Francisca, inspiração e exemplo de coragem e fé;

Às minhas irmãs, Amanda e Aline, pelo companheirismo e incentivo;

À minha família, modelo de amor e determinação, por acreditar e tornar meus sonhos realidade;

Aos irmãos que a vida me presenteou, João Paulo, Lucas Silva, Mateus Brito, Henrique Júnior, Alyson Vale, Larice Brito, Paulo Granges, impulsionadores da concretização deste sonho;

Ao meu irmão de vida, colega de profissão e de mestrado, Henrique Antônio, que foi peça fundamental em diversos momentos, pela imensa e incansável ajuda;

Aos meus amigos, verdadeiros tesouros, pelo apoio durante toda a minha vida;

À Universidade Federal de Campina Grande, produtora de conhecimento e formadora de cidadãos;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo à pesquisa no Brasil;

À minha orientadora, DSc. Carina Silvani pelos conhecimentos transmitidos, paciência e empenho na realização da pesquisa;

Aos professores, DSc. Olavo Francisco dos Santos Júnior e DSc. Lucas Festugato, pela contribuição no conhecimento e pela participação na banca examinadora deste trabalho;

Aos laboratoristas do Laboratório de Engenharia de Pavimentos, Jadilson, Artur e Netinho, pelo auxílio na realização dos ensaios experimentais.

Ao olhar para trás, vejo o quanto a caminhada foi árdua, mas procurei, a cada dificuldade, extrair o sofrimento e descobrir o ensinamento. A vitória recompensa todo o sacrifício. Confie no Senhor e nunca cansei de sonhar. Agora, os frutos desta caminhada de fé e coragem estão sendo colhidos. Chegar até aqui, não é o fim. Esta conquista abre caminhos para novos conhecimentos e descobertas e a certeza de que a vontade de ir além nunca cessará.

RESUMO

A crescente industrialização e os avanços tecnológicos acarretaram aumento na poluição ambiental pela produção de resíduos e descarte inadequado. Uma parcela importante desses resíduos são produtos plásticos, principalmente Tereftalato de Polietileno (PET). Como a capacidade atual dos programas de reciclagem para absorver resíduos de materiais PET de maneira ambientalmente correta é limitada, uma opção sustentável é incorporá-los na construção civil para estabilização de solos expansivos. Do ponto de vista geotécnico, os solos expansivos apresentam variações volumétricas decorrentes dos efeitos sazonais da umidade, acarretando problemas, sobretudo, pelo acréscimo de tensões as estruturas, podendo reduzir a vida útil das edificações e até por em risco a vida humana. O Tereftalato de Polietileno (PET) foi selecionado neste estudo para verificar a sua possível utilização como aditivo na redução da expansão de solo, isoladamente e em conjunto com cal. Para adição ao solo, utilizou-se PET micronizado com percentagens de 5% e 10% em massa seca e cal hidratada com percentagens de 0%, 2%, 4% e 6% em massa seca. Foram preparadas misturas compactadas com solo-cal-PET em três diferentes pesos unitários secos (14 kN/m³, 15 kN/m³ e 16 kN/m³) e comparadas com as misturas controle de solo puro e solo-cal obtidas por Tenório (2019) e Silvani *et al.* (2020). As misturas solo-cal-PET foram submetidas ao ensaio de expansão unidirecional seguindo a metodologia A da ASTM D4546 (1996). Os resultados mostraram que o teor de PET, teor de cal, a porosidade e o peso específico seco são significativos na alteração do comportamento das misturas compactadas quando comparados com Tenório (2019) e Silvani *et al.* (2020), colaborando para o controle da expansibilidade dos solos. Observou-se ainda que a metodologia porosidade/teor volumétrico de aglomerante ajustado por um expoente $(\eta/L_{iv})^a$ é válida para o estudo, visto que foi possível estabelecer uma relação única entre a expansão e o parâmetro $(\eta/L_{iv})^{-0,26}$ com um coeficiente de correlação (R^2) de 80% e 69% para 5% e 10% de PET respectivamente.

Palavras-chave: Melhoramento de solo, Estabilização química, PET micronizado, Expansão unidirecional, Porosidade/teor de volumétrico de aglomerante.

ABSTRACT

Growing industrialization and technological advances have resulted in an increase in environmental pollution due to the production of waste and inadequate disposal. Most of these residues are plastic products, mainly Polyethylene Terephthalate (PET). As the current capacity of recycling programs to absorb waste PET materials in an environmentally sound manner is limited, a sustainable option is to incorporate them into civil construction to stabilize expansive soils. From a geotechnical point of view, these are unsaturated soils that present volumetric variations resulting from the seasonal effects of humidity, causing problems, above all, due to the increase in tensions in the structures, which can reduce the useful life of buildings and even endanger human life. Polyethylene terephthalate (PET) was selected in this study to verify its possible use as an additive to reduce soil expansion, alone and in conjunction with lime. For addition to the soil, micronized PET was used with percentages of 5% and 10% in dry mass and hydrated lime with percentages of 0%, 2%, 4% and 6% in dry mass. Mixtures compacted with soil-lime-PET were prepared at three different dry unit weights (14 kN/m³, 15 kN/m³ and 16 kN/m³) and compared with the control mixtures of pure soil and soil-lime obtained by Tenório (2019) and Silvani et al. (2020). The soil-lime-PET mixtures were submitted to the unidirectional expansion test following the methodology A of ASTM D4546 (1996). The results showed that the PET content, lime content, porosity and dry specific weight are significant in changing the behavior of compacted mixtures when compared to Tenório (2019) and Silvani et al. (2020), helping to control the expansion of soils. It was also observed that the methodology porosity/volume content of binder adjusted by an exponent $(\eta/L_{iv})^a$ is valid for the study, since it was possible to establish a unique relationship between the expansion and the parameter $(\eta/L_{iv})^{-0,26}$ with a correlation coefficient (R^2) of 80% and 69% for 5% and 10% PET respectively.

Keywords: Ground improvement, Chemical stabilization, Micronized PET, Vertical expansion, Porosity/binder volumetric content.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura dos minerais tetraédricos.....	22
Figura 2 - Estrutura dos minerais octaédricos	22
Figura 3 - Estrutura das caulinitas	23
Figura 4 - Estrutura das esmectitas.....	24
Figura 5 - Estrutura esquemática das montmorilonitas	25
Figura 6 - Estrutura mineral das micas.....	26
Figura 7 - Ocorrência de solos expansivos no mundo.....	29
Figura 8 - Processo de troca catiônica no solo	38
Figura 9 - Formação de material cimentício.....	38
Figura 10 - Correlação entre a resistência à compressão simples e o fator porosidade/teor volumétrico de aditivo $(\eta/C_{iv})^{0,28}$	42
Figura 11 - Correlação entre a resistência à compressão simples e o fator porosidade/teor volumétrico de aditivo $(\eta/C_{iv})^{0,28}$ – cura de 28 dias e 90 dias	42
Figura 12 - Variação da resistência à compressão não confinada pela razão porosidade/teor volumétrico de aditivo – amostras de cal	44
Figura 13 - Variação da resistência à compressão não confinada pela razão.....	44
Figura 14 - Variação da resistência à compressão não confinada pela razão porosidade/teor volumétrico de aditivo ajustado – amostras de cal.....	45
Figura 15 - Variação da resistência à compressão não confinada pela razão porosidade/teor volumétrico de aditivo ajustado – amostras de cimento.....	45
Figura 16 - Efeito da umidade nas amostras de caulim-cal com 17%, 20% e 23% de umidade aos 28 dias.....	46
Figura 17 - Efeito da umidade nas amostras de caulim-cal com 17%, 20% e 23% de umidade aos 90 dias.....	47
Figura 18 - Efeito da umidade nas amostras de caulim-cal com 17%, 20% e 23% de umidade aos 360 dias.....	47
Figura 19 - Relação de porosidade/teor de cal - tempo de cura de 28, 90 e 360 dias	48
Figura 20 - Variação da resistência à compressão simples versus relação vazios/cal - 7 dias de cura	49

Figura 21 - Variação da resistência à compressão simples versus relação vazios/cal - 28 dias de cura	50
Figura 22 - Variação da resistência à compressão simples versus relação vazios/cal - 60 dias de cura	50
Figura 23 - Resistência à compressão simples pelo parâmetro η/L_{iv}^a do solo estabilizado com cal	51
Figura 24 - Estrutura molecular dos polímeros	52
Figura 25 - Consumo de polímeros no Brasil.....	53
Figura 26 - Unidade química repetitiva do PET.....	53
Figura 27 - Processo de reciclagem de materiais plásticos	55
Figura 28 - Sequência metodológica de ensaios e atividades.....	59
Figura 29 - Amostra bruta do solo expansivo	61
Figura 30 - Amostra do solo expansivo (peneira N° 200)	61
Figura 31 - Distribuição do tamanho das partículas do solo expansivo	62
Figura 32 - Curva de compactação do solo	63
Figura 33 - análise termo gravimétrica derivada (DTG) e a análise térmica diferencial (DTA) do solo	65
Figura 34 - Difração de raios X do solo	65
Figura 35 - PET micronizado	67
Figura 36 - Curva granulométrica do PET	68
Figura 37 - Massa específica do PET (frasco volumétrico de Le Chatelier).....	69
Figura 38 - Difratoograma de Raios X do PET pós consumo	69
Figura 39 - Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) do PET.....	70
Figura 40 - Análises de Termogravimetria (TG)/ Análise Térmica Diferencial (ATD)	71
Figura 41 - Cal hidratada	71
Figura 42 - ICL do solo expansivo com a cal.....	72
Figura 43 - Programa fatorial dos ensaios de expansão	75
Figura 44 - Moldagem do corpo de prova na prensa	76
Figura 45 - Vista frontal da mostra (50mm x 20mm).....	77
Figura 46 - Vista superior da mostra (50mm x 20mm)	77
Figura 47 – Ensaio edométrico de solos.....	78

Figura 48 - Variação da expansão unidimensional pelo teor de PET ($\gamma_d=14 \text{ kN/m}^3$)	83
Figura 49 - Variação da expansão unidimensional pelo teor de PET ($\gamma_d=15 \text{ kN/m}^3$)	84
Figura 50 - Variação da expansão unidimensional pelo teor de PET ($\gamma_d=16 \text{ kN/m}^3$)	85
Figura 51 - Variação da expansão vertical pelo teor de cal (teor de PET=5%)	90
Figura 52 - Variação da expansão vertical pelo teor de cal (teor de PET=10%)	91
Figura 53 - Variação da expansão unidimensional pelo tempo das misturas com teor de 5% PET	92
Figura 54 - Variação da expansão unidimensional pelo tempo das misturas com teor de 10% PET	93
Figura 55 - Variação da expansão unidimensional pelo tempo das misturas solo-cal-PET.....	94
Figura 56 - Variação da expansão vertical (ϵ) pela porosidade (η) para 5% de PET.....	98
Figura 57 - Variação da expansão vertical (ϵ) pela porosidade (η) (10% de PET).....	99
Figura 58 - Variação da expansão vertical pelo parâmetro η/L_{iv} (5% PET)	102
Figura 59 - Variação da expansão vertical pelo parâmetro $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ para 5% de PET	103
Figura 60 - Variação da expansão vertical pelo parâmetro η/L_{iv} (10% PET)	103
Figura 61 - Variação da expansão vertical pelo parâmetro $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ para 10% de PET	104
Figura 62 – Comparação da variação da expansão vertical pelo parâmetro $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ para os teores de 5% e 10% de PET	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de identificação de solos expansivos.....	31
Tabela 2 - Ensaio de caracterização.....	60
Tabela 3 - Características físicas do solo expansivo	63
Tabela 4 - Fluorescência de raios X do solo.....	64
Tabela 5 - Capacidade de troca catiônica e superfície específica do solo	66
Tabela 6 - Caracterização física do PET	68
Tabela 7 - Definição das variáveis controláveis.....	72
Tabela 8 - Definição das variáveis fixadas.....	73
Tabela 9 - Definição das variáveis de ruído	74
Tabela 10 - Definição de variável resposta	74
Tabela 11 - Características dos corpos de prova de solo puro, solo-cal e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical ($\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$).....	79
Tabela 12 - Características dos corpos de prova de solo puro, solo-cal e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical ($\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3$).....	80
Tabela 13 - Características dos corpos de prova de solo puro, solo-cal e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical ($\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$).....	82
Tabela 14 - Características dos corpos de prova de solo-PET e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical para 14 kN/m^3 (5% PET).....	86
Tabela 15 - Características dos corpos de prova de solo-PET e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical para 15 kN/m^3 (5% PET).....	87
Tabela 16 - Características dos corpos de prova de solo-PET e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical para 16 kN/m^3 (5% PET).....	87
Tabela 17 - Características dos corpos de prova de solo-PET e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical para 14 kN/m^3 (10% PET).....	88
Tabela 18 - Características dos corpos de prova de solo-PET e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical para 15 kN/m^3 (10% PET).....	88
Tabela 19 - Características dos corpos de prova de solo-PET e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical para 16 kN/m^3 (10% PET).....	89
Tabela 20 - Características dos corpos de prova de solo-PET e solo-cal-PET e resultado da	

expansão vertical para diferentes teores de cal e 5% PET	95
Tabela 21 - Características dos corpos de prova de solo-PET e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical para diferentes teores de cal e 10% PET	96
Tabela 22 - Características dos corpos de prova de solo-cal-PET e resultado da expansão vertical para diferentes teores de cal e 5% PET	99
Tabela 23 - Características dos corpos de prova de solo-cal-PET e resultado da expansão vertical para diferentes teores de cal e 10% PET	100

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. Objetivo geral.....	18
1.2. Objetivos específicos	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1. Solos não saturados	20
2.2. Solos expansivos	21
2.2.1. Argilominerais	22
2.2.2. Principais tipos de argilominerais.....	23
2.2.3. Mecanismos de expansão dos argilominerais.....	27
2.2.4. Ocorrência de solos expansivos.....	28
2.2.5. Métodos de previsão do potencial expansivo de solos	29
2.2.6. Fatores que influenciam a expansão.....	31
2.3. Técnicas de estabilização	34
2.3.1. Estabilização física	35
2.3.2. Estabilização mecânica.....	35
2.3.3. Estabilização química	35
2.4. Dosagem porosidade/teor de aditivo	41
2.5. Polímeros.....	51
2.5.1. Polietileno tereftalato (PET).....	53
2.5.2. Utilização de PET em obras geotécnicas.....	56
3. METODOLOGIA.....	59
3.1. Solo.....	60
3.2. PET	66
3.3. Cal.....	71

3.4. Água	72
3.5. Planejamento experimental	72
3.5.1. Expansão livre	76
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
4.1. Ensaio de expansão da mistura solo-cal-PET.....	79
4.1.1. Efeito da adição de pet.....	79
4.1.2. Efeito da adição da cal.....	86
4.1.3. Efeito da Adição de PET e Cal na Expansão Unidirecional.....	92
4.1.4. Efeito da porosidade	95
4.1.5. Efeito do coeficiente η/L_{iv}	99
5. CONCLUSÕES	107
5.1. Sugestões para trabalhos futuros	108
REFERÊNCIAS.....	107

1. INTRODUÇÃO

Reconhecida como uma das atividades mais relevantes para o desenvolvimento socioeconômico, a construção civil é encarada como uma indústria geradora de impactos ao meio ambiente, tanto do ponto de vista do consumo dos recursos naturais disponíveis, quanto pela transformação do meio e pela geração de resíduos. Nesse sentido, a sustentabilidade está se tornando uma grande preocupação para esse importante setor da economia.

No âmbito da construção civil, a engenharia geotécnica, responsável por mudanças extensas nas características do terreno natural e, conseqüentemente, por uma parcela considerável do consumo de energia e matéria-prima para a execução de projetos, é um elo importante na cadeia construtiva desse setor e pode contribuir para o desenvolvimento sustentável (social, econômico e ambiental). Apesar dessa importância e sabendo que esse subsetor envolve significativas mudanças na superfície terrestre e demanda uma grande quantidade de materiais, os estudos são limitados e faltam informações para auxiliar a tomada de decisão em estudos geotécnicos (ABREU *et al.*, 2008; JEFFERIS, 2008; HOLT *et al.*, 2010).

Os solos consistem na matéria-prima de suporte indispensável à construção civil, especialmente em obras geotécnicas, porém apresentam comportamentos distintos, uma vez que diferenciam em suas propriedades quanto a origem e a evolução. Essas diferenças decorrem da influência de fatores como clima, mineralogia, relevo e tempo. Sob a ótica da engenharia, uma característica peculiar de alguns solos é a presença de argilominerais expansivos. A presença de argilas expansivas na composição mineralógica condiciona a existência dos solos expansivos, causando constante preocupação, pois geram grandes prejuízos às obras (FRAZÃO; GOULART, 1976; LATIFI *et al.*, 2017).

Solos expansivos são notoriamente problemáticos visto que incham e encolhem quando sujeitos a variações sazonais de umidade. O resultando dessas mudanças é uma possível movimentação do solo, que pode ocorrer independentemente da carga aplicada, acarretando provavelmente, danos as edificações (ESTABRAGH; PARSAEI; JAVADI, 2015).

Uma alternativa viável em muitos projetos geotécnicos, uma vez que os solos naturais normalmente não apresentam propriedades ideais, são as técnicas de estabilização de solos, que incluem abordagens mecânicas, químicas, físicas e biológicas, no intuito de aumentar a massa específica através da compactação, reduzir o adensamento através de sistemas de drenagem ou adicionar aditivos químicos ou biológicos para aprimorar o comportamento mecânico (CONSOLI

et al., 2016).

Dentre as diversas técnicas convencionais, destaca-se o melhoramento de solo por meio de aditivos químicos. A estabilização química refere-se às mudanças químicas do solo pela inserção de uma quantidade suficiente de aditivo, os mais utilizados são o cimento Portland e a cal, buscando melhorar a estabilização volumétrica, resistência mecânica e as propriedades tensão-deformação. No entanto, o uso de aditivos convencionais está sendo reavaliados, não somente pelos efeitos negativos ao meio ambiente decorrentes do processo produtivo, mas também pelo elevado custo (FRANÇA, 2003; CHAO-LUNG *et al.*, 2011; DIAS, 2012; HUAT *et al.*, 2017). Na tentativa de soluções alternativas a substituição dos estabilizantes convencionais, tem-se estudado a possibilidade do uso de polímeros, especificamente, o Politereftalato de Etileno (PET).

Polímeros sintéticos ou plásticos são produtos feitos pelo homem principalmente derivados de petróleo. Suas excelentes características, como alta relação resistência/peso, flexibilidade, durabilidade e boa resistência química e térmica, tornaram-lhes uma opção desejável para o design de milhares de produtos finais. As garrafas PET são amplamente utilizadas pelas indústrias para armazenamento de produtos líquidos e, como muitos outros tipos de plástico, quase não são biodegradáveis: uma vez descartadas, permanecem por muito tempo no meio ambiente (ILYAS *et al.*, 2018).

Existem várias opções para lidar com resíduos de garrafas PET, incluindo descarte em aterro, incineração, reutilização e reciclagem. No entanto, aterro ou incineração não são soluções sustentáveis devido aos grandes áreas necessárias ou problemas associados à incineração, como poluição do ar, riscos à saúde gerados por gases tóxicos e aquecimento global (PARK; KIM, 2014).

Assim, tornou-se essencial encontrar maneiras de reutilizar de forma benéfica as garrafas PET - seja diretamente ou seu polímero. Uma forma potencial, simples e eficiente de reutilizar o PET é na prática da engenharia geotécnica. Nesse sentido, o estudo dedica-se a avaliação da adição de PET isoladamente e em conjunto com cal.

1.1. Objetivo Geral

Avaliar a utilização de PET na redução da expansão de solo, isoladamente e em conjunto com cal.

1.2. Objetivo Específico

Para satisfazer o objetivo geral deste trabalho foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o efeito da adição de cal na mistura solo expansivo-PET;
- Avaliar a redução da expansão de solos melhorados com cal e PET;
- Verificar a aplicabilidade da razão porosidade/teor volumétrico de aditivo para previsão da expansão de solo expansivo estabilizado com PET e cal.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção explana acerca dos solos não saturados, ocorrência, comportamento e consequências para a construção civil, além das técnicas de estabilização.

2.1. Solos não saturados

Inicialmente, a Mecânica Clássica baseava-se no comportamento do solo na condição saturada, porém nem sempre esta situação era satisfeita, uma vez que, em regiões de clima árido e semiárido onde a evaporação excede as precipitações, é comprovado que existe um comportamento diferenciado (CARVALHO *et al.*, 2015).

Do ponto de vista da geotecnia, o solo pode ser considerado como uma estrutura compressível de partículas sólidas circundados por vazios que, no caso de solos saturados, são preenchidos por água e, no caso de solos não saturados, por ar e água ou outros fluidos (BISHOP, 1959; PEREIRA, 2013).

Anteriormente, o solo era entendido como um sistema trifásico com constituintes sólidos, líquido e gasosos. Com os avanços dos estudos em solos não saturados, a interface ar-água passou a ser considerada como uma quarta fase independente (membrana contrátil). A membrana contrátil apresenta uma propriedade chamada de tensão superficial com capacidade de exercer tensão de tração a partir da ação das forças intermoleculares. Quando a fase de ar é contínua, há uma interação entre a membrana contrátil com as partículas sólidas, influenciando o comportamento mecânico (FREDLUND; MORGENSTERN, 1977; LAMBE; WHITMAN, 1979; FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Entende-se por solos não saturados um sistema quadrifásico, onde a mistura de duas fases (partículas sólidas e membrana contrátil) atinge o equilíbrio pela aplicação de gradientes de tensão, e a mistura de outras duas fases (ar e água) sofrem processos de fluxo a partir da aplicação de gradientes de pressão (FREDLUND; MORGENSTERN, 1977).

Uma característica intrínseca dos solos não saturados é a predisposição a variações significativas de volume pela alteração no teor de umidade. Quando há um incremento no teor de umidade, pode ocorrer redução de volume, situação típica de solos colapsíveis ou de baixa densidade, ou aumento de volume, comportamento típico de solos expansivos. Nos solos colapsíveis, o aumento da umidade acarreta redução da resistência entre as partículas sólidas devido a redução da sucção, rearranjo estrutural e busca do equilíbrio sob carga atuante e o novo teor de umidade ou sucção. Para os solos expansivos, o efeito é normalmente associado as reações físico-

químicas dos argilominerais constituintes do solo, induzindo o surgimento da tensão de expansão (VILAR; FERREIRA, 2015).

A ocorrência de solos problemáticos tem relação com as variações na poropressão negativa e condiciona o surgimento de problemas que causam danos às estruturas e edificações. Muitas situações na construção civil envolvem pressões negativas da água, algumas destas são: construção e operação de barragens, presença de taludes naturais submetidos às variações climáticas, estabilidade de escavações, empuxos laterais e capacidade de carga de fundações superficiais e movimentos de solo (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Os materiais expansivos constituem também um problema de solos não saturados. Assim, é de grande interesse o estudo das possíveis variáveis que afetam de forma significativa seu comportamento, sendo uma delas a sucção, a qual se admite ser um dos principais fatores condicionantes no comportamento hidráulico (movimento de água nos poros) e mecânico (expansão-contração, deformação, resistência) desses solos (NUNES, 1978; CHENG-GANG *et al.*, 1988).

2.2. Solos expansivos

A expansão dos solos compreende a capacidade desse material sofrer mudanças de volume sem variação de carregamento, podendo originar expansão por absorção de água ou retração pela perda de água. Esse fenômeno está relacionado à modificação estrutural de alguns solos argilosos, principalmente àqueles que dispõem em sua constituição minerais com estrutura laminar 2:1 potencialmente instáveis. A formação de solos sedimentares e metamórficos também são capazes, pela ação do intemperismo, de promover o surgimento de solos expansivos. Em geral, os materiais que apresentam essa característica geotécnica, que depende do tipo e teor de minerais argiloso presentes no solo, apresentam elevada liquidez e alta plasticidade. Na ausência de umidade, são duros e, sob ação da água, perdem rapidamente a resistência (PRESA, 1984; MAHLER, 1994; VALLEJO; FERRER, 2011; CARVALHO *et al.*, 2015).

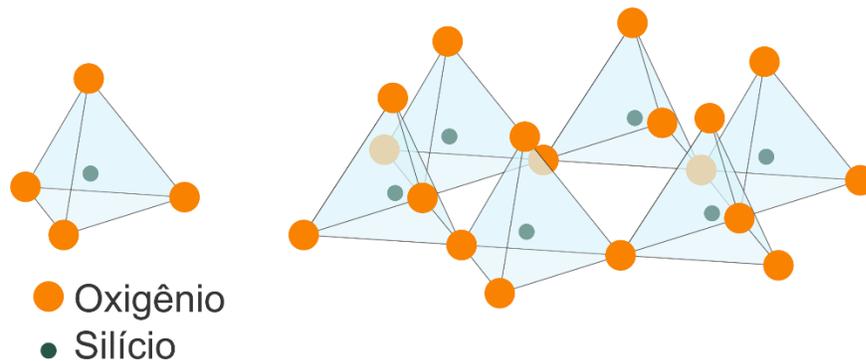
Em maior ou menor escala, todos os solos são expansivos quando sua tensão efetiva entre as partículas sólidas é reduzida a uma razão qualquer. Costuma-se admitir como solos expansivos os que apresentam expansão superior a 1%, sendo essa variação volumétrica resultado apenas da alteração do teor de umidade. Solos que apresentam incremento de volume na ordem de 3% já são considerados problemáticos, podendo essa variação volumétrica atingir valores superiores a 30% (NUNES, 1978; NUHFER *et al.*, 1993; QI; VANAPALLI, 2015).

O efeito expansivo deve-se, principalmente, a composição mineralógica do solo, pois argilominerais expansivos, como montmorilonita e vermiculita, costumam estar presentes nesse tipo de solo. As mudanças volumétricas na microestrutura dos argilominerais provoca mudanças volumétricas e reorganização do esqueleto sólido na macroestrutura do solo, provocando a expansão (MONROY; ZDRAVKOVIC; RIDLEY, 2015; LIU *et al.*, 2015; FERREIRA *et al.*, 2017).

2.2.1. Argilominerais

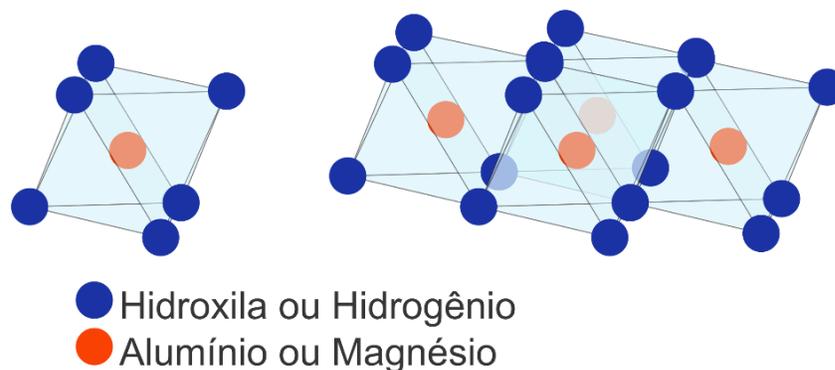
Os argilominerais são constituintes importantes dos solos, sedimentos e rochas sedimentares que apresentam estrutura cristalina definida com átomos dispostos em lâminas. A combinação desses átomos em camadas estruturais básicas e dos espaços entre camadas é chamada de unidade estrutural. Dessa forma, a estrutura dos minerais resulta da sobreposição das folhas tetraédricas de silício (Figura 1) e dos octaedros de alumínio ou magnésio (Figura 2) (GOMES, 1986; PEREIRA, 2004).

Figura 1 - Estrutura dos minerais tetraédricos



Fonte: Autor (2021)

Figura 2 - Estrutura dos minerais octaédricos



Fonte: Autor (2021)

A disposição dos silicatos em camadas possibilita os arranjos estruturais 1:1 (grupo das caulinitas), 2:1 (grupo das esmectitas, micas e vermiculitas), 2:1:1 (grupo da clorita) e interestratificados, referindo-se à quantidade de tetraedros de SiO_2 e de octaedros de hidróxidos que formam a célula unitária. Os minerais do grupo esmectita, vermiculita e interestratificados podem tornar o solo potencialmente expansivo (PEREIRA, 2004).

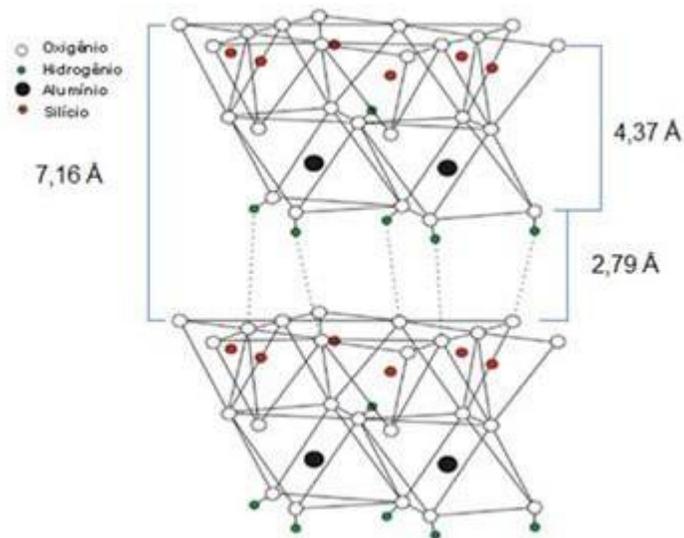
2.2.2. Principais tipos de argilominerais

Dentre os principais tipos de argilominerais, pode-se destacar os grupos das caulinitas, esmectitas, micas, vermiculitas, cloritas e interestratificados.

2.2.2.1. Grupo das caulinitas

O grupo caulinita (1:1), de fórmula estrutural $(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}$, resulta da combinação de uma folha tetraédrica com uma folha octaédrica, superpostas indefinidamente e unidas por ligações do tipo pontes de hidrogênio entre os átomos O^{2-} e por grupos OH^- entre planos próximos (Figura 3). Os minerais deste grupo apresentam baixa expansividade, pois não ocorre hidratação das camadas pela baixa distância interbasal e pouca adsorção superficial (estrutura eletricamente neutra). A consequência disso é a estabilidade desses minerais na presença da água, contribuindo para a não expansibilidade e ausência de trocas catiônicas entre as camadas desse material (GRIM, 1953; GRIM, 1962; GOMES, 1986; GILLOT, 1987; SOUZA, 2015).

Figura 3 - Estrutura das caulinitas



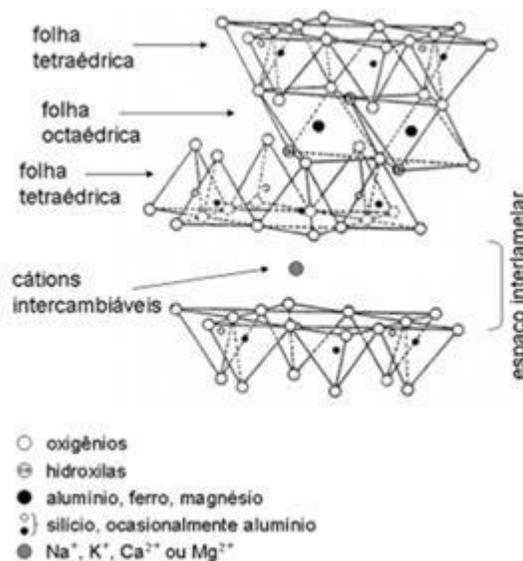
Fonte: CHENG *et al.* (2012)

2.2.2.2. Grupo das esmectitas (2:1)

O grupo das esmectitas (2:1) resulta da combinação de uma folha octaédrica intercalada

entre duas folhas tetraédricas empilhadas e unidas por ligações iônicas entre os íons de silício dos tetraedros com os íons de alumínio dos octaedros. Esses minerais apresentam cargas elétricas negativas nas superfícies, resultantes das substituições isomórficas, logo visando a estabilidade elétrica, absorvem cátions presentes na água (Figura 4). Assim, esse grupo apresenta expansibilidade intracristalina pela passagem de água e líquidos orgânicos entre as camadas. A expansibilidade intracristalina é explicada pela hidratação dos cátions pela ação das moléculas polares da água e pela adsorção superficial de moléculas da água nas camadas contendo oxigênio (OLPHEN, 1963; DEER; HOWIE; ZUSSMAN, 1966; PEREIRA, 2004; SOUZA, 2015).

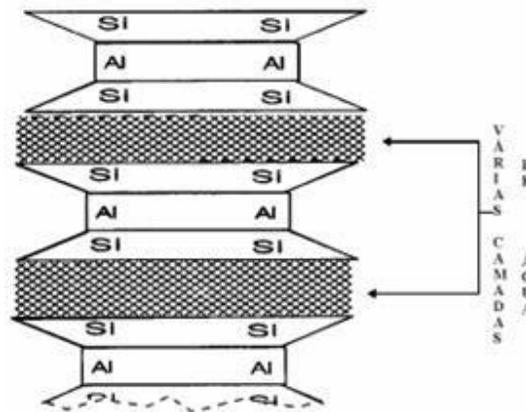
Figura 4 - Estrutura das esmectitas



Fonte: DIAZ; SANTOS (2001)

O principal exemplo das esmectitas é a montmorilonita. Essa espécie tem cargas elétricas desenvolvidas a partir de substituições isomórficas na lâmina octaédrica (Figura 5). A substituição dos íons de magnésio por íons de alumínio causa desequilíbrio no balanço de carga, possibilitando a atração de cátions para neutralizar a carga desenvolvida na superfície (PEREIRA, 2004; MUGGLER *et al.*, 2005).

Figura 5 - Estrutura esquemática das montmorilonitas



Fonte: Yong *et al.* (1992)

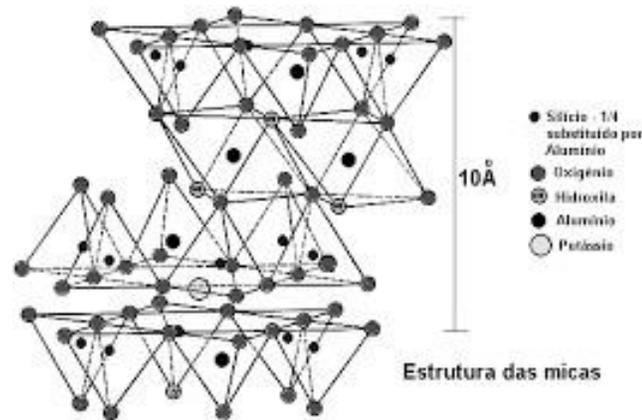
A montmorilonita é uma argila que apresenta atividade e plasticidade altas, além de uma elevada capacidade de expansão e contração, pois as ligações que mantem suas camadas unidas são fracas, permitindo a passagem da água e instabilidade das camadas estruturais. A variação volumétrica do material, devido as mudanças na umidade, ocasiona fissuras no solo (NORRISH; QUIRK, 1954; MUGGLER *et al.*, 2005).

Em virtude das substituições isomórficas, as montmorilonitas apresentam elevada capacidade de troca catiônica, da ordem de 80 a 100 meq/100 g, além de uma vasta área específica, podendo atingir até 800 m²/g, justificando seu comportamento coloidal (MITCHELL, 1976; MITCHELL; SOGA, 2005; SOUZA, 2015).

2.2.2.3. Grupo das micas (2:1)

As micas são minerais que formam grandes cristais podendo ocorrer na fração argila de rochas sedimentares (Figura 6). Dispõe de uma estrutura mais compacta quando comparada a esmectita que dificulta a entrada de água (SOUZA, 2015).

Figura 6 - Estrutura mineral das micas



Fonte: CHENG *et al.* (2012)

2.2.2.4. Ilita

As ilitas são minerais pertencentes ao grupo das micas e são constituídas por uma lâmina octaédrica e duas tetraédricas unidas por cátions monovalentes, normalmente potássio. Não apresentam expansão intracristalina, devido ao íon potássio entre camadas, logo não permite a presença de água interlamelar. A sensibilidade acontece em condições de degradação, pela perda de potássio, tornando-se muito plástica. A capacidade de troca catiônica é da ordem de 10 a 40 meq/100 g (OLPHEN, 1963; MITCHELL, 1976; SOUZA, 2015).

2.2.2.5. Grupo das vermiculitas (2:1)

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

2.2.2.6. Grupo das cloritas (2:1:1)

Os minerais cloritas são filossilicatos do grupo 2:1 com uma folha octaédrica (tipo brucita) entre as camadas ao invés de íons passíveis de troca. Apresentam distância interbasal variável de acordo com a composição química, principalmente com relação ao teor de Fe, Mg e Al (WHITTLE, 1986).

2.2.2.7. Interestratificados

Os folissilicatos com empilhamento de dois ou mais tipos de argilominerais no eixo cristalográfico para formação de um cristal ou predominância difratométrica são chamados de minerais interestratificados. A caracterização desses minerais se dá pelo tipo de camada, quantidade e ordem de empilhamento. Em condições naturais, as amostras desses argilominerais, constituídos por camadas estruturais 1:1, são raras. Com isso, têm-se que os tipos mais comuns de camadas são constituídas de mica, esmectita, vermiculita e clorita (ESLINGER; PEVEAR, 1988; WEAVER, 1989).

2.2.3. Mecanismos de expansão dos argilominerais

O comportamento expansivo dos solos está relacionado a instabilidade volumétrica, a partir do deslocamento das moléculas de água pela ação das forças de atração, ocasionando desequilíbrio na umidade natural. Os mecanismos de expansão sofrem influências de fatores tais como tipo de mineral, disponibilidade de água, tipo e quantidade de cátions, além da interação desses cátions com a água do solo (PEREIRA, 2004; SOUZA, 2015).

A combinação de mecanismos pode ser agrupada como mecânica e/ou físico-química. A expansão mecânica refere-se às forças de descompressão elásticas ao longo do tempo, decorrentes das ações antrópicas (escavações) e naturais (movimentos tectônicos, erosão), que ocasiona relaxamento na pressão e acarreta o surgimento de uma pressão negativa (sucção) na água dos poros de mesma magnitude da pressão inicial (TAYLOR; SMITH, 1986; GOMES, 1986; PEREIRA, 2004).

Fatores como atração superficial, hidratação de cátions e repulsão osmótica das partículas caracterizam os mecanismos físico-químicos (SNETHEN; JOHNSON; PATRICK, 1977; PEREIRA, 2004).

A atração superficial das partículas de argila é um mecanismo ocasionado pelas forças eletrostáticas, originadas das cargas negativas das superfícies dos argilominerais, que buscam ser compensadas pela atração de cátions da água livre dos poros e por moléculas polares como as moléculas de água. A necessidade de neutralizar o desequilíbrio de cargas, pelo aumento de água na camada dupla, influencia mudanças de volume na massa de solo (PRESA, 1984; PEREIRA, 2004).

O fenômeno da hidratação ocorre pela atração de cátions para superfície negativa das partículas de argila, anulando sua carga. Entretanto, alguns cátions ainda dispõem de uma

quantidade de carga não neutralizada, atraindo moléculas de água que, pelos seus polos positivos, atraem outras moléculas (PRESA, 1984; PEREIRA, 2004; SOUZA, 2015).

A repulsão osmótica provém dos gradientes de pressão originados nas camadas duplas pela variação da concentração iônica. No momento em que as moléculas de água, pela diferença de concentração iônica, entram em contato com o sistema argila-água-cátion, permitem o ingresso de água. Esse fluxo que ocorre na dupla camada (membrana semipermeável) busca igualar, por osmose, as diferenças de concentrações, resultando no aumento do volume de solo. Esse mecanismo é importante em meios com umidade e concentração iônica elevadas (PEREIRA, 2004; SOUZA, 2015).

Em tese, a expansão físico-química é promovida pela ocorrência de forças repulsivas entre os minerais argilosos, uma vez que as forças atrativas são pequenas quando comparadas às cargas externas. Na água livre dos poros, encontram-se partículas envoltas por duplas camadas elétricas, cujas características dependem da carga elétrica global das partículas e cátions livres. Nesse tipo de expansão, a concentração eletrolítica, a valência dos cátions e a temperatura são condições significativas (GOMES, 1986).

2.2.4. Ocorrência de solos expansivos

A ocorrência de solos expansivos é notória em diversas regiões do mundo, especialmente em regiões áridas e semiáridas, como pode ser observado na Figura 7, onde a evaporação excede a precipitação pluviométrica. Existem registros desse tipo de solo em todos os continentes, sendo as maiores ocorrências na África do Sul, Argentina, Arábia Saudita, Austrália, Brasil, Canadá, Chile, China, Cuba, Egito, Espanha, Estados Unidos, França, Gana, Israel, Índia, Marrocos, México, Nigéria, Turquia, Venezuela, Zimbábue (CHEN, 1975; COSTA; CRAIZER, 1978; MAHLER, 1994; FERREIRA, 1995; MURTHY, 2003; KLAMT *et al.*, 2013; ELKADY; AL-MAHBASHI; ALREFEAI, 2015).

Figura 7 - Ocorrência de solos expansivos no mundo



Fonte: Autor (2021)

Os prejuízos econômicos referentes às variações volumétricas são significativos, uma vez que os solos expansivos causam problemas as estruturas e fundações das edificações. Em 1973, nos Estados Unidos, as perdas totalizaram US\$ 2,3 bilhões/ano. Os dados atualizados apontam que os prejuízos às edificações, estradas, aeroportos e oleodutos e demais instalações são da ordem de 9 bilhões/ano. Em termos populacionais, cerca de 20% dos norte-americanos são afetados por problemas advindos dos solos expansivos, o dobro do valor se comparado aos norte-americanos afetados pelas enchentes (JONES; HOLTZ, 1973; JONES; JONES, 1987).

No Brasil, os solos expansivos podem ser encontrados em diversas regiões do país, sobretudo no Rio Grande do Norte, Sergipe, Pernambuco, Alagoas, Bahia, Distrito Federal, São Paulo, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina. Apesar dos diversos estudos, não se tem dados específicos referentes aos prejuízos econômicos no território brasileiro (SOBRAL, 1956; SIMÕES; COSTA FILHO, 1981; VARGAS, 1981; SIMÕES, 1987; JUCÁ *et al.*, 1992; BASTOS, 1994; PAIVA, 2009; FERREIRA *et al.*, 2012; PAIVA *et al.*, 2012; LIMA, 2014; PAIVA *et al.*, 2016).

2.2.5. Métodos de previsão do potencial expansivo de solos

A caracterização qualitativa do potencial expansivo é possível mediante identificação e classificação do solo. Essas informações podem auxiliar aos profissionais na construção civil sobre

problemas desses materiais, proporcionando suporte na tomada de decisão para realização de novos ensaios para determinação quantitativa desse potencial de expansão e tratamento por meio das técnicas de estabilização (PEREIRA, 2004; SOUZA, 2015).

Para uma análise criteriosa, existem diversos ensaios de laboratório que fornecem critérios para avaliação e determinação da expansibilidade, tomando como base, por exemplo, a mineralogia, o teor de argila, os limites de consistência, além de ensaios de expansão. Convencionalmente, dividem-se os métodos de previsão das variações volumétricas em indiretos e diretos (DE LAMBALLERIE, 1962; SILVA, 1975; SCHREINER, 1987; PAIVA, 2009).

Os métodos indiretos baseiam-se na realização dos ensaios de caracterização física (granulometria, índices físicos, limites de consistência), caracterização mineralógica (difração de raios X, análise térmica diferencial, análise química e microscopia eletrônica de varredura, capacidade de troca catiônica) ou parâmetros ligados à textura, composição e comportamento dos solos (FERREIRA, 1995; BARBOSA, 2013)

Os métodos diretos referem-se à avaliação da expansão induzida ou da tensão necessária para inibir a expansividade a partir da realização de ensaios de caracterização mecânica do tipo edométrico, replicando as condições de carregamento, inundação e percolação observadas em campo (BARBOSA, 2013; PAIVA, 2016). A Tabela 1 apresenta os métodos diretos e indiretos de identificação de solos expansivos.

Tabela 1 - Métodos de identificação de solos expansivos

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

Fonte: PAIVA (2016)

2.2.6. Fatores que influenciam a expansão

O processo de expansão sofre influência de diversos fatores, sendo estes agrupados em fatores intrínsecos, intimamente relacionados à natureza e arranjo estrutural, e extrínsecos, relacionados às condições ambientais (SNETHEN *et al.*, 1977; AYALA *et al.*, 1986; SIMÕES, 1987; ATAÍDE, 2017).

Entre os fatores influenciadores do processo expansivo, merecem destaque:

- a) Composição do solo – A mineralogia, especificamente o tipo, teor e arranjo dos argilominerais, além de sua superfície específica, determina a expansibilidade do material. Os argilominerais de maior potencial expansivo são as montmorilonitas, vermiculitas e interestratificados. Os argilominerais illita e caulinita, embora pouco expansivos, podem provocar mudanças de volume quando apresentam partículas extremamente pequenas em sua composição (GRIM, 1968; MITCHELL, 1973, 1976; SNETHEN *et al.*, 1977; SOUZA, 2015);
- b) Textura dos grãos – Designa a forma, dimensão e disposição do agrupamento de minerais constituintes da rocha. Logo, a cristalinidade, a forma e dimensão das partículas, a ligação intermineral, a presença e a orientação dos vazios, além da presença de trincas e fissuras são características que podem modificar o comportamento de material potencialmente expansivos, uma vez que relaciona-se a cristalização dos minerais. Assim, as argilas com estrutura floclada apresentam ação expansiva maior que as argilas com estrutura dispersa. A estrutura e textura dos grãos podem ser alterados mediante processo de compactação (SEED; WOODWARD; LUNDGREN, 1962; LE ROUX, 1976; JOHNSON E SNETHEN, 1978);
- c) Química da água dos poros – A variação volumétrica é diretamente proporcional a quantidade de água que ocupa os vazios do solo. A princípio, a variação de volume ocorre pela hidratação e adsorção de moléculas de água na superfície dos argilominerais, a fim de equilibrar as cargas elétricas. A intensidade dessa hidratação é influenciada pela quantidade, tipo e valência de íons, além do tipo e quantidade de íons nos fluidos que preenchem os poros. Esses fluidos apresentam elevadas concentrações de cátions, sais solúveis capazes de reduzir a magnitude da expansão. Em contrapartida, baixas concentrações iônicas podem conceder cargas que balanceiam cátions e agentes cimentantes, tornando o solo mais susceptível à expansão (MITCHELL, 1976; SOUZA, 2015);
- d) Sucção – Trata-se de uma variável independente da tensão efetiva, referindo-se como pressão negativa em solos não saturados. Uma maior sucção pode condicionar uma maior expansão, pela relação dessa variável com o grau de saturação, tamanho e forma dos poros,

tensão superficial e propriedades eletroquímicas das partículas e da água (AITCHISON, 1965 *apud* NELSON; MILLER, 1992; OLSON; LANGFELDER, 1965; FREDLUND, MORGENSTERN, 1977; SNETHEN, 1980);

- e) Plasticidade – O índice de plasticidade é um indicativo do potencial de expansão do solo. Comumente, solos com comportamento plástico apresentam elevados limites de liquidez e significativo potencial de expansão e contração (NELSON; MILER, 1992);
- f) Densidade seca – A expansão ou pressão de expansão do solo aumenta como consequência do aumento da densidade seca com umidade constante. Isso se explica pelo fato de elevadas densidades menores espaçamentos entre partículas, propiciando o aparecimento de forças repulsivas e elevado potencial de expansão (CHEN, 1975; SOUZA, 2015);
- g) Permeabilidade – É um fator dependente do teor de umidade inicial, densidade seca e arranjo estrutural dos grãos de solo. A ocorrência de fissuras, fendas ou trincas nos materiais, sobretudo em materiais de alta permeabilidade, proporciona um maior fluxo de água e, conseqüentemente, acelerado processo de expansão (WISE; HUDSON, 1971; SOUZA, 2015);
- h) Temperatura – Para temperaturas elevadas, a água da dupla camada tende a ser comprimida, enquanto que, para baixas temperaturas, água tende a expandir na dupla camada. A temperatura influencia o deslocamento da umidade (líquido e vapor) como consequência dos gradientes térmicos no interior do solo. Essa umidade difusa é capaz de deslocar-se para regiões mais frias, por exemplo áreas localizadas abaixo de edificações e pavimentos, na tentativa equilibrar a energia térmica do sistema (HAMILTON, 1969; SOUZA, 2015);
- i) Clima e vegetação – A variação da precipitação e evapotranspiração ao longo do ano é capaz de modificar o teor de umidade e, conseqüentemente, ocasionar a expansão ou contração do solo. No caso das precipitações, sua ocorrência favorece a recarga do lençol freático, influenciando na contribuição do teor de umidade nas camadas próximas. Com relação a vegetação, esta atua na absorção da umidade, provocando um diferencial no teor de umidade quando comparadas com áreas não cobertas (BUCKLEY, 1974 *apud* NELSON; MILLER, 1992; HOLLAND; LAWRENCE, 1980 *apud* NELSON; MILLER, 1992);
- j) Cimentação – Refere-se à agregação das partículas pela ação do cimento mineral. A existência desse agente cimentante natural tem dois feitos: a formação de conexões nos

pontos de contato, diminuindo os deslocamentos das partículas adjacentes; e o revestimento de partículas como forma de reduzir a capacidade de absorver água dos minerais. Quanto maior a resistência da cimentação entre as partículas, menor a ocorrência de expansão do solo (SIMÕES, 1987; SOUZA, 2015);

- k) Efeitos diagenéticos – Consistem nas alterações físicas e termo físicas de materiais como consequência de variações nas condições de carregamento. A consequência desses efeitos pode ser observada na ligação interpartículas, devido a recristalização dos contatos entre argilominerais sob altas solicitações de carregamento ou pela cimentação das partículas em consequência da atuação de agentes cimentantes. Em tese, a presença de ligações diagenéticas explica a diferença no comportamento de solos expansivos deformados e indeformados (SOUZA, 2015);
- l) Carregamento e histórico de tensões – A ação do carregamento sob o solo provoca mudança de volume para determinados valores de umidade e densidade seca. Com relação ao carregamento ao longo do tempo, quando um solo é pré-adensado, apresenta comportamento mais expansivo que o solo de mesmo índice de vazios, porém normalmente adensado (JONES; HOLTZ, 1959; MITCHELL, 1976).

2.3. Técnicas de estabilização

Nas estruturas de engenharia civil, são utilizados todos os tipos de solos. No entanto, alguns depósitos de solo em sua forma natural são adequados para fins de construção, enquanto outros são inadequados sem tratamento, como os solos expansivos. Esses solos precisam ser escavados e substituídos, ou suas propriedades devem ser modificadas antes que possam suportar as cargas aplicadas pelas estruturas superiores.

Uma alternativa viável em muitos projetos geotécnicos, para solos que não apresentam propriedades ideais, são as técnicas de estabilização de solos, no intuito de aumentar a massa específica através da compactação, reduzir o adensamento através de sistemas de drenagem ou adicionar aditivos químicos ou biológicos para aprimorar o comportamento mecânico (CONSOLI *et al.*, 2016).

A estabilização do solo é uma das técnicas mais utilizadas para controlar o comportamento de solos expansivos em estruturas. As técnicas de estabilização podem ser agrupadas em métodos estabilizadores físicos, mecânicos e químicos (PETRY; LITTLE, 2002; IKIZLER *et al.*, 2009).

2.3.1. Estabilização física

A estabilização física consiste num processo de melhoria das propriedades a partir da alteração da densidade do solo, modificando sua textura, ou correção granulométrica, tornando o contato entre partículas mais efetivo. Dentre as técnicas de estabilização física do solo, têm-se, por exemplo, a mistura em quantidades compatíveis de frações pré-estabelecidas e adição de fibras (PINTO, 2008; SILVA, 2016).

2.3.2. Estabilização mecânica

A estabilização mecânica consiste na aplicação de um carregamento ao solo para compactá-lo. O intuito da compactação é aumentar a densidade do solo, propiciando um ganho de resistência. Para favorecer essa melhoria, solos com granulometria variada e pequena quantidade de material fino são preferíveis (SPENCE; COOKE, 1983 *apud* CARVALHO, 2011).

2.3.3. Estabilização química

A estabilização química refere-se às mudanças estruturais do solo pela inserção de uma quantidade suficiente de aditivo, os mais utilizados são o cimento Portland e a cal, buscando melhorar a estabilização volumétrica, resistência mecânica e as propriedades tensão-deformação. Essa adição ocasiona uma reação química do aditivo com os minerais do solo e com a água (SANTOS *et al.*, 1995; FRANÇA, 2003; SOLIZ, 2007; CHAO-LUNG *et al.*, 2011; DIAS, 2012; HUAT *et al.*, 2017).

A mistura solo-estabilizador pode formar ou não uma matriz contínua. Para a matriz contínua, o agente estabilizador ocupa os vazios e as partículas sólidas ficam envoltas como um material de enchimento inerte, logo as propriedades do sistema correspondem as da matriz e as propriedades mecânicas do estabilizador. Para a matriz descontínua, o estabilizador não preenche a totalidade dos vazios, o que desencadeia algumas ações a saber: alteração das características superficiais das partículas, vedação inerte dos poros e interconexão entre partículas (MEDINA, 1987).

Muitas técnicas inovadoras têm sido estudadas e desenvolvidas para combater os problemas desencadeados pelos solos expansivos como o uso de aditivos alternativos – magnésio, soda cáustica, cinza volante e resíduo de mármore (AKINWUMI; BOOTH, 2015; POURAKBAR *et al.*, 2015; HUAT *et al.*, 2017; SECO *et al.*, 2017; TENÓRIO, 2019).

2.3.3.1. Solo-Cal

O solo-cal trata-se de uma mistura a base de solo, cal e água, em proporções especificadas

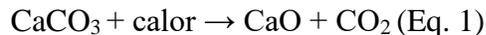
a partir de ensaios laboratoriais, originando um produto para aplicações em obras de terra. Considerado um dos aglomerantes mais antigos utilizados pelo homem, além de amplamente empregada na construção civil, a cal é capaz de melhorar as propriedades geotécnicas dos solos (ASGARI; DEZFULI; BAYAT, 2015).

2.3.3.2. Mecanismos Solo-cal

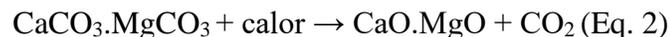
Denomina-se solo estabilizado com cal o processo químico que busca melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos solos, pela inserção de uma quantidade suficiente do aditivo cal, possibilitando seu uso para fins de projeto (FRANÇA, 2003).

A cal consiste em um produto químico resultante da calcinação de diversos tipos de rochas carbonáticas (aragonitas, cálcicas, dolomitas, etc) em temperaturas entre 900 °C e 1200 °C. Na produção industrial, são utilizadas, principalmente, rochas constituídas predominantemente por carbonático de cálcio (teor mínimo de 97%) e rochas dolomíticas com quantidade considerável de carbonato de magnésio (teor mínimo de 20%). Da calcinação dessas rochas, origina-se, respectivamente, a cal cálcica virgem (CaO) e a cal dolomítica virgem (CaO.MgO). As reações de calcinação ocorrem conforme as Equações 1 e 2 (SANTANA, 2002; JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014).

a) Cal cálcica virgem:



b) Cal dolomítica virgem:

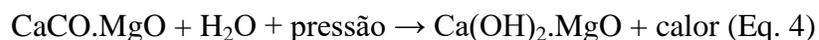


Após a fabricação das cal virgens, estas podem ser submetidas ao processo de hidratação, formando como produtos a cal cálcica hidratada e a cal dolomítica hidratada. As reações de hidratação são exotérmicas e produzem compostos de aparência branca, quando originados das rochas calcárias puras, e colorações creme, amarelada e cinza quando provém de rochas que contém impurezas. A hidratação origina compostos mais estáveis que os compostos da calcinação. As reações de hidratação ocorrem conforme Equações 3 e 4 (SHIRLEY, 2005).

a) Cal cálcica hidratada:



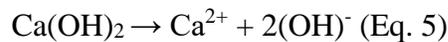
b) Cal dolomítica hidratada:



Os mecanismos de estabilização de solo com cal constituem um conjunto de reações físico-químicas desencadeadas entre cal virgem e cal hidratada com a fração argila, possibilitando a redução da sensibilidade à expansão e retração do solo no contato com a água, melhoria da trabalhabilidade e das características da compactação, bem como o aumento da resistência e da sua capacidade de suporte (NÓBREGA, 1995; CRISTELO, 2001; OLIVEIRA, 2010).

De modo geral, a adição da cal a todo tipo de solo que contenha argilominerais, em qualquer proporção e na presença adequada de umidade, acarretarão as reações de troca catiônica, floculação, reações cimentantes pozolânicas e carbonatação. Essas reações que promovem melhorias das propriedades dos solos argilosos ocorrem de forma imediata (troca catiônica e floculação), após a inserção da cal, e a longo prazo (reações pozolânicas e carbonatação).

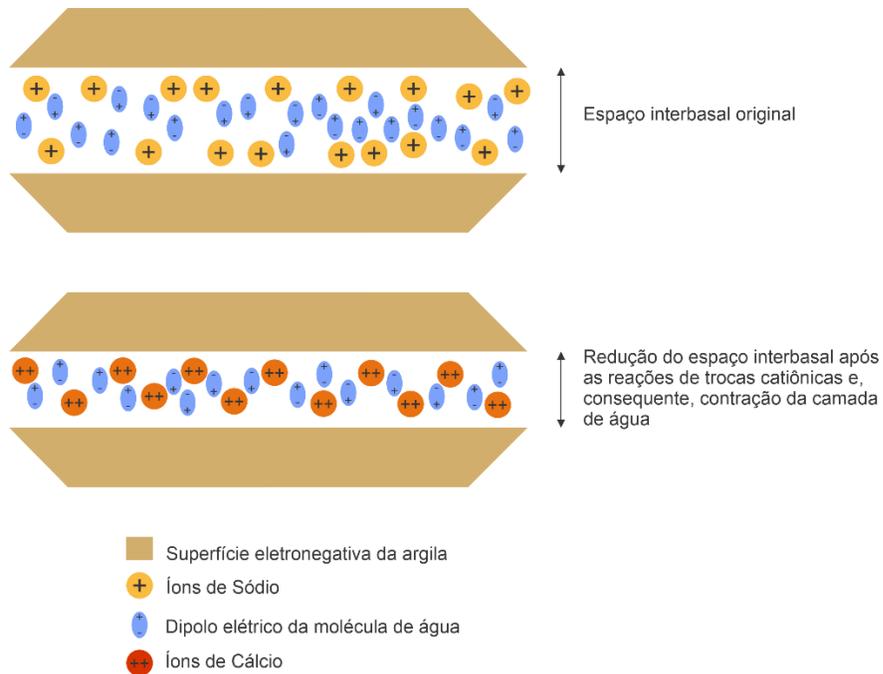
- a) Troca catiônica e floculação: São reações interdependentes que acontecem imediatamente após a mistura da cal com o solo, dissociando-os em cátions e ânions (Equação 5).



Quimicamente, o processo ocorre pela substituição de bases, uma vez que os cátions da cal, de carga elétrica mais elevada, substituem os íons metálicos de carga mais fraca (sódio e potássio) presentes na superfície dos argilominerais. Devido a possibilidade de já existir cátions alcalino-terrosos de cálcio (Ca^{2+}) na superfície das argilas, em virtude da formação geológica, ocorrerá preponderância destes (MITCHELL; HOOPER, 1961).

De modo geral, as reações de troca catiônica podem ser entendidas pela análise da superfície de clivagem dos argilominerais (Figura 8). A parte superior da Figura 8 ilustra o argilomineral e os íons de cálcio entre as superfícies de clivagem, que são eletricamente instáveis, mas tem sua estabilidade alcançada a partir das trocas catiônicas. A parte inferior da Figura 8 ilustra a substituição dos íons de sódio por íons de cálcio, em virtude da maior valência. Essas substituições desencadeiam os processos de floculação, aglomeração e redução da expansão, pois os íons de cálcio têm maior densidade de carga positiva (PRUSINSKI; BHATTACHARJA, 1999; SILVANI, 2017).

Figura 8 - Processo de troca catiônica no solo

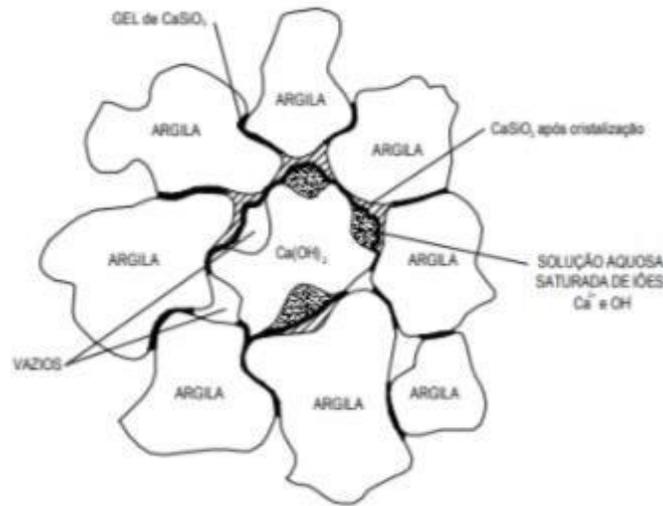


Fonte: Autor (2021)

b) Cimentação pozolânica

A cimentação é um processo progressivo e lento resultado da interação entre cal, água e elementos pozolânicos, originando silicatos e aluminatos hidratados de cálcio. Esse efeito cimentante, conforme a Figura 9, acarreta em um aumento da capacidade de suporte, pela tendência de formação de compostos de partículas de solo, mas também aumento da resistência contra a água, pois uma maior coesão implica numa menor erosão (AZEVEDO, 2010).

Figura 9 - Formação de material cimentício



Fonte: Van Impe, (1989)

c) Carbonatação

A carbonatação consiste em uma alteração química dos argilominerais em razão da reação entre os subprodutos do calcário e gás carbônico da atmosfera, formando um agente cimentante de carbonato de cálcio e magnésio (AZEVEDO, 2010).

Esse agente cimentante é relativamente frágil e prejudicial ao desenvolvimento das reações pozolânicas, interferindo no ganho de resistência mecânica. Além do mais, o carbonato de cálcio é uma substância com alta plasticidade, aumentando, consideravelmente, a plasticidade do solo. Isso ocasiona a floculação das partículas da cal, formando nódulos de carbonatos, que dificulta a reação com as partículas argilosas (NEVES, 1993).

Todavia, a adição da cal conduz a outras alterações nas propriedades físico-química e mecânicas além da resistência e plasticidade a saber:

- Diminuição sucessiva do valor do azul de metileno traduzida pela diminuição da superfície específica do solo (AFÈS; DIDIER, 2000);
- Redução do peso específico aparente máximo e aumento significativo da umidade ótima das misturas solo-cal para uma mesma energia de compactação (AFÈS; DIDIER, 2000; ANGELIM, 2005);
- Mudanças estruturais da mistura solo-cal, traduzida pela formação de novos cristais e desaparecimento de outros, a partir de análise difratométrica de raios-X (AFÈS; DIDIER, 2000);
- Incremento significativo na coesão da mistura solo-cal (LIMA *et al.*, 2000).

Os resultados expressivos da adição da cal ao solo dependem de diversos fatores: tipo de solo, tipo de argilominerais, tipo e teor de cal, tempo e temperatura de cura, retardamento da compactação e teor de matéria orgânica.

2.3.3.3. Dosagem solo-cal

As metodologias de dosagem consistem na determinação do teor mínimo de cal necessário para adicionar ao solo de modo a obter melhorias no comportamento dos solos. Há diversos métodos para a previsão do teor de cal, sendo necessário validação a partir de ensaios de laboratório (SAMANIEGO, 2015).

Entre as principais metodologias de dosagem da mistura solo-cal, destaca-se o método do pH, o método do consumo inicial de cal, o método de Thopson e o método do ponto fixo de cal.

O método do pH consiste na determinação do teor mínimo de cal necessário para obtenção de um pH 12,4 para o solo. Em solos tropicais e subtropicais, essa técnica pode apresentar limitações, uma vez que não há garantia que o teor de cal determinado promova incremento na resistência devido à natureza e origem desses solos (OLIVEIRA, 2010).

O método do consumo inicial de cal (ICL) refere-se ao procedimento necessário para variar o pH. Nesse caso, o teor mínimo de cal será o necessário para tornar o pH do solo constante (EADES; GRIM, 1966).

O método de Thompson considera que o solo é reativo quando este apresenta aumento da resistência à compressão simples pela adição de cal. Essa melhoria no solo se dá pela ação das reações pozolânicas, conferindo resistência e durabilidade a mistura. No método de Thompson, o teor de cal determinado através da compressão simples deve ser acrescido de 0,5% a 1% como compensação das dificuldades técnicas da estabilização *in situ* (OLIVEIRA, 2010).

O método do ponto fixo de cal (LFP) consiste na determinação da porcentagem de cal necessária para tornar o solo trabalhável. A técnica baseia-se na realização do ensaio de plasticidade com aumento gradativo do teor de cal da mistura. Quando a mistura alcança o limite de plasticidade máximo, adiciona-se mais 4% de cal para se obter o teor ideal para estabilização. O método do ponto fixo de cal não tem por objetivo aumentar a resistência mecânica da mistura (OLIVEIRA, 2010).

Destaca-se que nenhuma das técnicas apresentadas neste item e consideradas clássicas permitem a obtenção de uma curva dosagem, onde com base na quantidade de cal adicionada possa ser obtido o valor da propriedade desejada.

2.4. Dosagem porosidade/teor de aditivo

Os resultados dos ensaios de resistência mecânica, principalmente compressão e tração, são influenciados pelas propriedades intrínsecas das mistura solo-cal, a saber: porosidade, teor de umidade, grau de saturação, teor de cal, teor volumétrica de cal (razão entre volume de cal e volume do corpo de prova), volume de vazios e sucção (CONSOLI *et al.*, 2012).

A metodologia de dosagem porosidade/teor volumétrico de aditivo originou-se a partir das dosagens de argamassas e concretos. Inicialmente, Larnach (1960) sugeriu que solos cimentados artificialmente não apresenta correlações com o fator água/cimento. A dificuldade no emprego desse fator amplamente utilizado na resistência de concretos é devido a compactação, pois esse processo não consegue expulsar, em sua totalidade, o ar nos vazios da mistura solo-cimento ou solo-cal. A existência de ar nos vazios impossibilita a ocorrência de reações químicas (troca catiônica ou reação pozolânica), uma vez que necessita de água, e a resistência de solos cimentados artificialmente depende exclusivamente disso. Assim, o fator água/agente cimentante só se aplica aos materiais onde não existe ar no sistema e seus vazios encontram-se preenchidos por água, como no caso de argamassas e concretos (FOPPA, 2005; CONSOLI *et al.*, 2009).

Foppa (2005) propôs uma metodologia para a dosagem de solo-cimento levando em consideração a influência do teor de cimento, da porosidade e do teor de umidade da moldagem na resistência mecânica de um solo arenoso cimentado. Além disso, avaliou o uso dos fatores água/cimento e vazios/cimento para estimativa da resistência à compressão simples. Esse estudo permitiu, comprovando as afirmações de Lanach (1960), que o fator água/cimento não é bom parâmetro para a previsão do comportamento de solo-cimento. Entretanto, a razão porosidade/teor volumétrico de cimento ajustada por um expoente, conforme Equação 6, demonstrou ser um bom parâmetro para estimativa da resistência à compressão simples para misturas de solo-cimento.

$$\text{fator } \frac{\text{vazios}}{\text{cimento}} = \frac{\text{porosidade}}{\text{aditivo}} = \left(\frac{\eta}{C_{iv}} \right)^{0,28} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

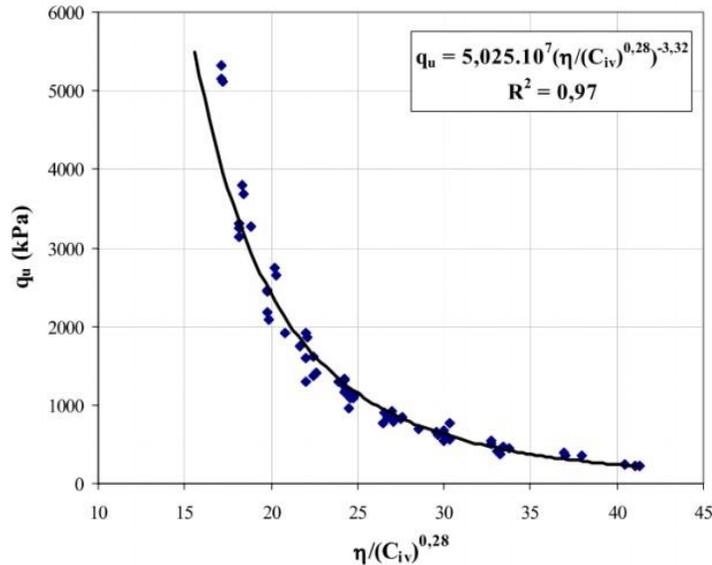
Porosidade (η) é um coeficiente adimensional resultante da relação entre volume de vazios e volume total;

Teor volumétrico de cimento (C_{iv}) é um coeficiente adimensional resultante do percentual de volume total correspondente ao volume de cimento.

Nesse estudo, as grandezas resistência à compressão simples e a razão porosidade por teor volumétrico apresentaram correlação com $R^2=0,97$. O valor do coeficiente de determinação (R^2)

sugere uma estreita correlação entre as grandezas, possibilitando dosagens baseadas nesse parâmetro. A Figura 10 demonstra a correlação obtida no estudo de Foppa (2005).

Figura 10 - Correlação entre a resistência à compressão simples e o fator porosidade/teor volumétrico de aditivo $(\eta/C_{iv})^{0,28}$

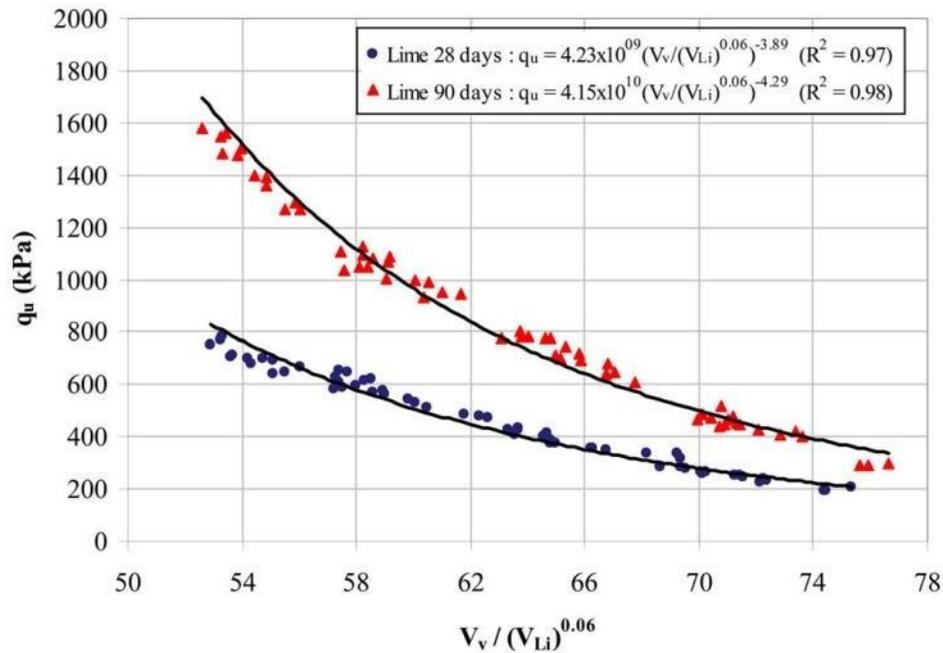


Fonte: Foppa (2005)

Lopes Júnior (2007) estudou a influência da quantidade de cal, porosidade e teor de umidade da moldagem na resistência de um solo arenoso tratado com cal e rocha basáltica pulverizada, avaliando a aplicação da relação água/cal e vazios/cal na estimativa da resistência à compressão simples da mistura solo-cal. Lopes Júnior (2007), a exemplo de Foppa (2005), conclui que a razão porosidade da mistura compactada e o teor volumétrico de cal ajustada por um expoente, demonstrou ser um bom parâmetro na estimativa da resistência à compressão simples da mistura solo-cal.

Consoli *et al.* (2009) buscaram quantificar a influência da quantidade de cal, porosidade e teor de umidade da moldagem na resistência de um solo argiloarenoso tratado com cal, avaliando o uso da relação água/cal e vazios/cal na estimativa da resistência à compressão não confinada. As adições de 3%, 5%, 7% e 11% de cal à mistura para moldagem de corpos de prova com pesos específicos de 16 kN/m³, 17 kN/m³ e 18 kN/m³ e, posterior, cura por 28 e 90 dias permitiram constatar que a relação vazios/volume para mistura solo-cal pode ser aplicada para correlação à compressão simples. A Figura 11 apresenta os resultados desse estudo.

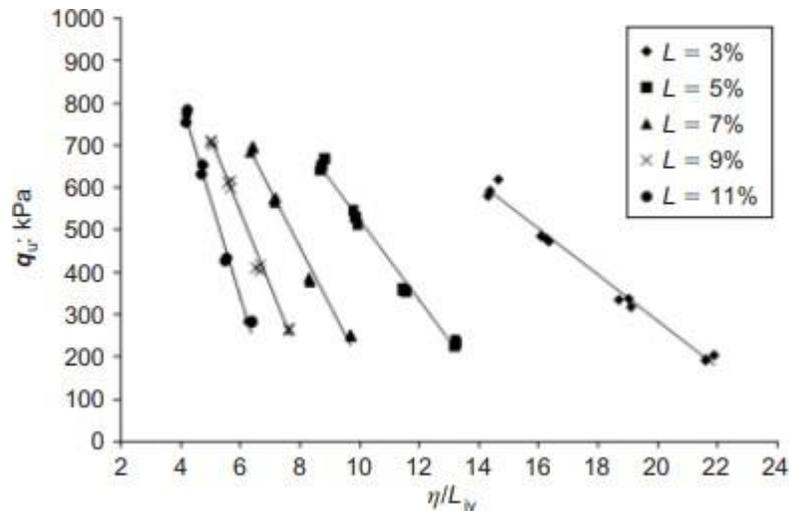
Figura 11 - Correlação entre a resistência à compressão simples e o fator porosidade/teor volumétrico de aditivo $(\eta/C_{iv})^{0,28}$ – cura de 28 dias e 90 dias



Fonte: Lopes Júnior (2007)

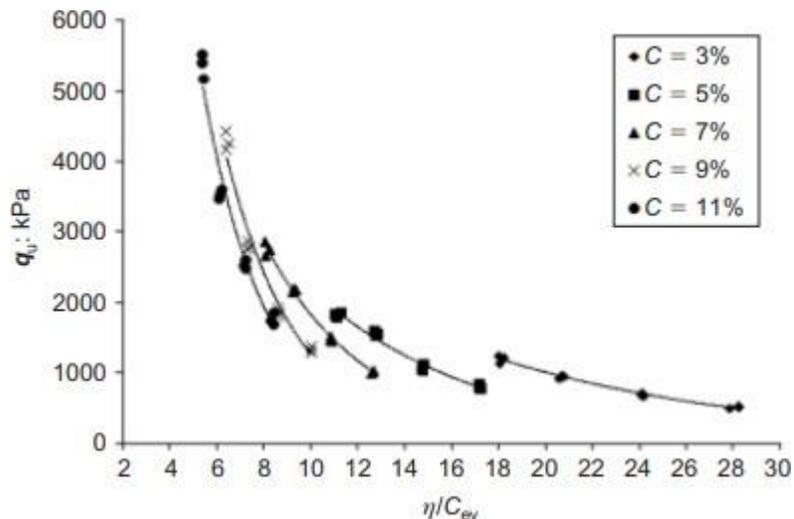
Consoli *et al.* (2009) investigou os parâmetros de resistência de uma argila arenosa tratada com cimento e cal, avaliando a relação vazios/conteúdo de material cimentício a partir dos parâmetros quantidade de material cimentício, porosidade, teor de umidade e relação espaço vazio/material cimentício. As amostras ensaiadas consistiram de corpos de prova de solo-cimento e solo-cal com teores de 3%, 5%, 7%, 9% e 11% e teor de umidade constante de 14%. O estudo concluiu que para a mistura solo-cal não existe relação única entre a resistência à compressão simples e a razão vazios/cal, porém para a mistura solo-cimento existe uma relação razoável. As Figuras 12 e 13 apresentam os resultados para solo-cal e solo-cimento respectivamente.

Figura 12 - Variação da resistência à compressão não confinada pela razão porosidade/teor volumétrico de aditivo – amostras de cal



Fonte: Consoli *et al.* (2009)

Figura 13 - Variação da resistência à compressão não confinada pela razão

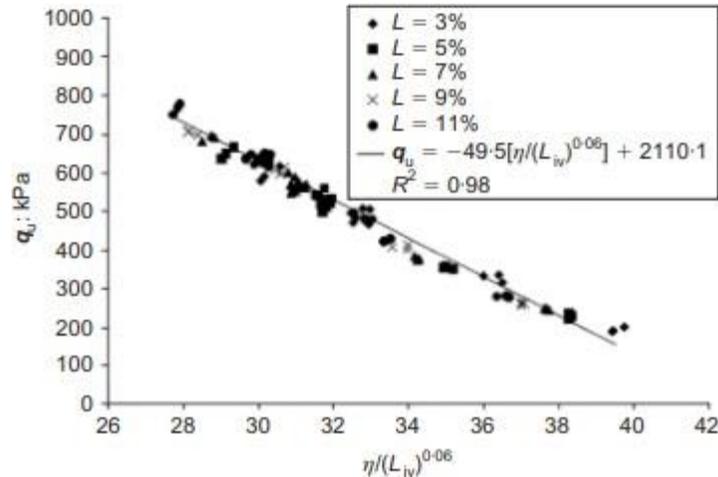


Fonte: Consoli *et al.* (2009)

Consoli *et al.* (2009) relataram que na relação porosidade/teor volumétrico foi considerado que um acréscimo na porosidade poderia ser contrabalanceado por um incremento no teor volumétrico de agente cimentante, mantendo constante a resistência à compressão não- confinada. Com efeito, para manter a resistência à compressão simples constante, deve-se aplicar um expoente a pelo menos uma das variáveis (η , C_{ev} , L_{iv}), tornando as variações compatíveis. Assim, as aplicações dos expoentes 0,06 à variável L_{iv} para as misturas solo-cal e 0,35 à variável C_{ev} para as misturas solo-cimento proporcionaram bons ajustes aos valores de resistência à compressão. Os

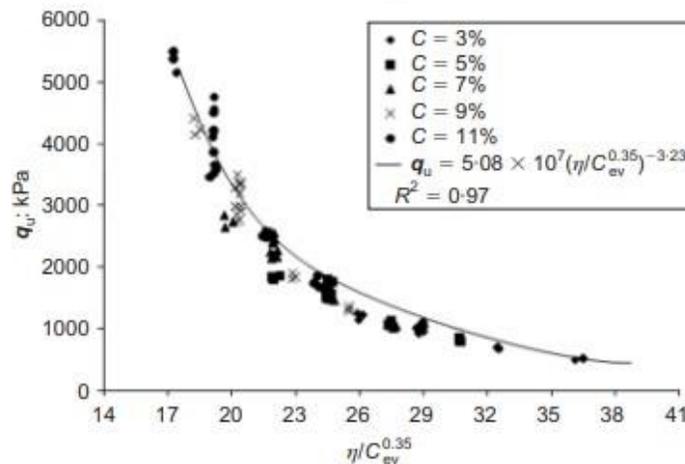
resultados ajustados estão dispostos nas Figuras 14 e 15.

Figura 14 - Variação da resistência à compressão não confinada pela razão porosidade/teor volumétrico de aditivo ajustado – amostras de cal



Fonte: Consoli *et al.* (2009)

Figura 15 - Variação da resistência à compressão não confinada pela razão porosidade/teor volumétrico de aditivo ajustado – amostras de cimento

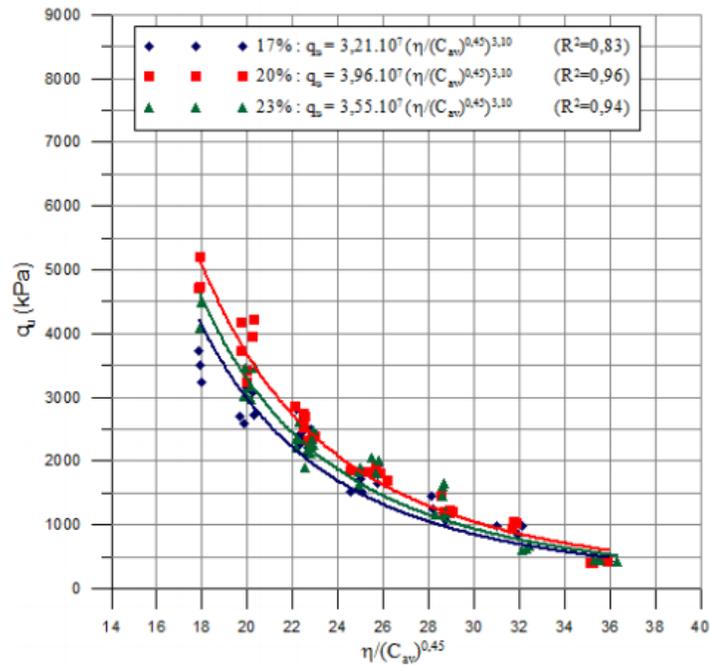


Fonte: Consoli *et al.* (2009)

Johann (2013) estudou sobre metodologias para previsão do comportamento mecânico e variação da porosidade de um solo siltoso estabilizado com cal (mistura caulim- cal), verificando a influência da quantidade de cal, porosidade, teor de umidade e tempo de cura sobre a resistência à compressão simples (q_u), resistência à tração (q_t) e rigidez inicial. Com isso, adquiriu relações únicas e distintas da influência da porosidade e da relação porosidade/teor volumétrico de aditivo.

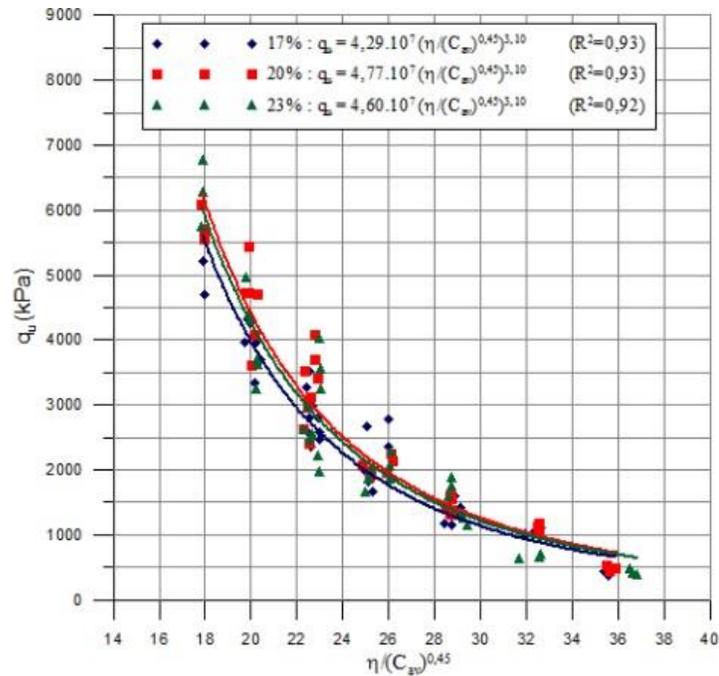
Os resultados da influência dessa relação para os teores 3%, 5%, 7% e 9% de cal, diferentes pesos específicos secos, umidades de 17%, 20% e 23% e tempo de cura de 28 dias, 90 dias e 360 dias encontram-se dispostos nas Figuras 16, 17 e 18.

Figura 16 - Efeito da umidade nas amostras de caulim-cal com 17%, 20% e 23% de umidade aos 28 dias



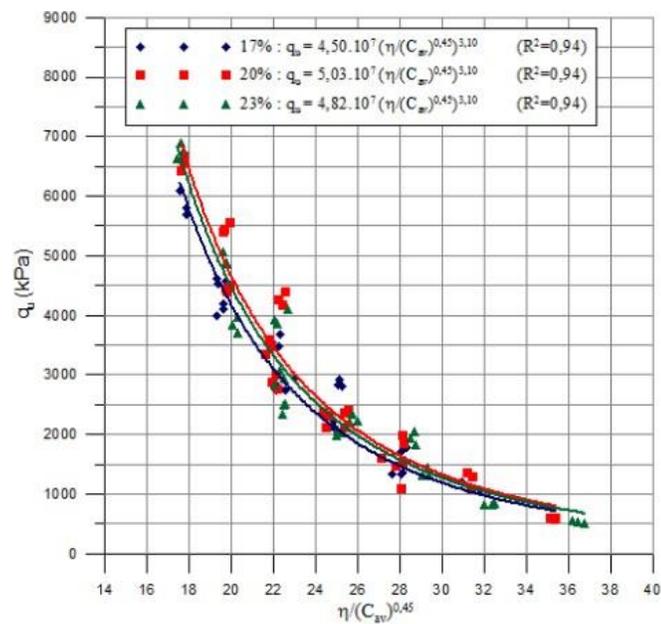
Fonte: Johann (2013)

Figura 17 - Efeito da umidade nas amostras de caulim-cal com 17%, 20% e 23% de umidade aos 90 dias



Fonte: Johann (2013)

Figura 18 - Efeito da umidade nas amostras de caulim-cal com 17%, 20% e 23% de umidade aos 360 dias



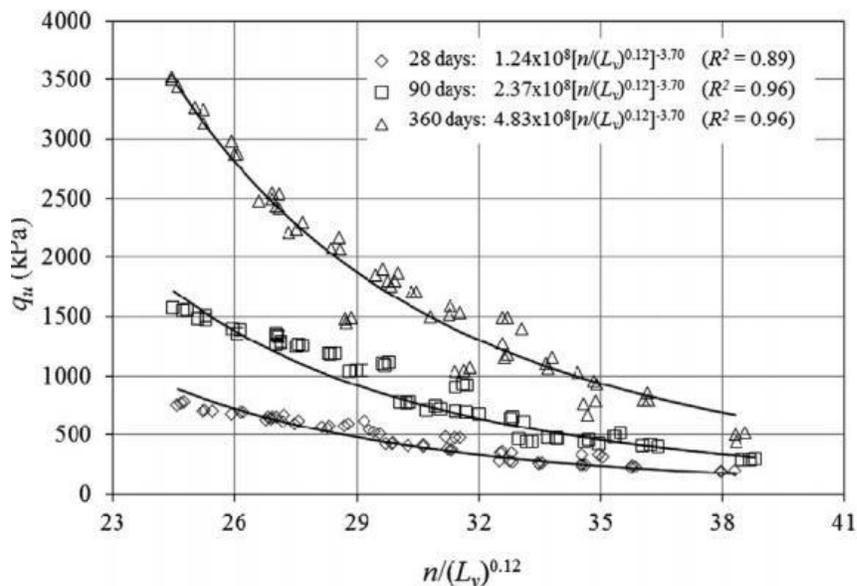
Fonte: Johann (2013)

A partir das análises, nota-se um aumento da resistência à compressão simples com o

aumento do teor de umidade até, aproximadamente, 20%. A partir daí, a resistência tende a diminuir. Valores semelhantes foram encontrados por Foppa (2005) e pode ser explicado pela eficiência da hidratação da cal e da matriz cimentícia, uma vez que são afetadas pelo teor de umidade bastante inferior ao teor de umidade ótima, prejudicando a resistência. O estudo permite concluir que a relação porosidade/teor de cal mostra uma tendência única dos experimentos demonstra ser um parâmetro adequado na estimativa, confirmando que esse parâmetro pode ser empregado para dosagens de misturas de solos cimentados artificialmente.

Consoli *et al.* (2014) buscou quantificar a influência do tempo de cura, teor de cal, peso específico seco e teor de umidade na resistência de uma argila arenosa tratada com cal e avaliar a relação porosidade/teor de cal para estimativa da compressão não confinada. Os resultados, conforme mostrado na Figura 19, constata que a resistência à compressão aumentou com o aumento do teor de cal (desde 3% até 11%), diminuição da porosidade (desde 41% até 31%) e aumento do tempo de cura (28, 90 e 360 dias). Concluiu-se a relação porosidade/teor de cal é um bom parâmetro para a avaliação da resistência à compressão não confinada.

Figura 19 - Relação de porosidade/teor de cal - tempo de cura de 28, 90 e 360 dias

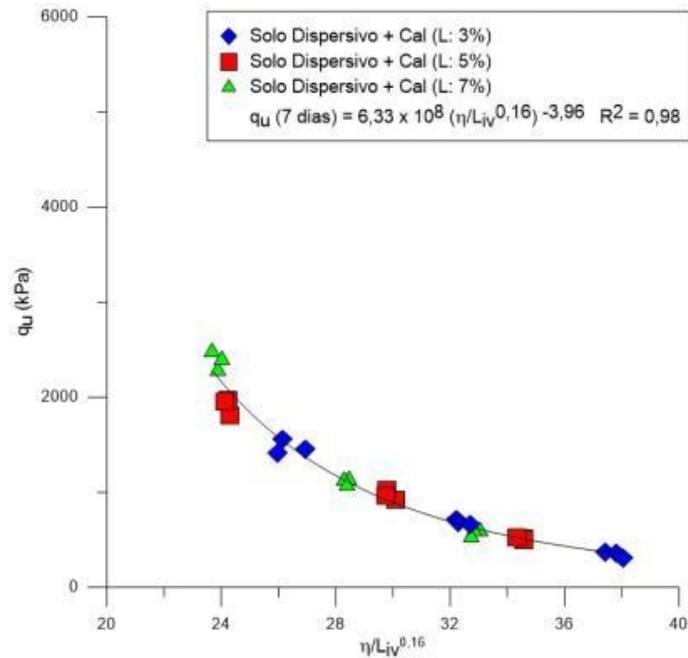


Fonte: Consoli *et al.* (2014)

Samaniego (2015) estudou a influência isolada da quantidade de cal, porosidade e tempo de cura sobre a resistência não confinada de um solo dispersivo tratado com cal para compressão dos parâmetros da resistência à compressão e à tração. Os corpos de prova foram moldados nos teores de 3%, 5% e 7% de cal nos tempos de cura de 7, 28 e 60 dias. Observou-se que não existia

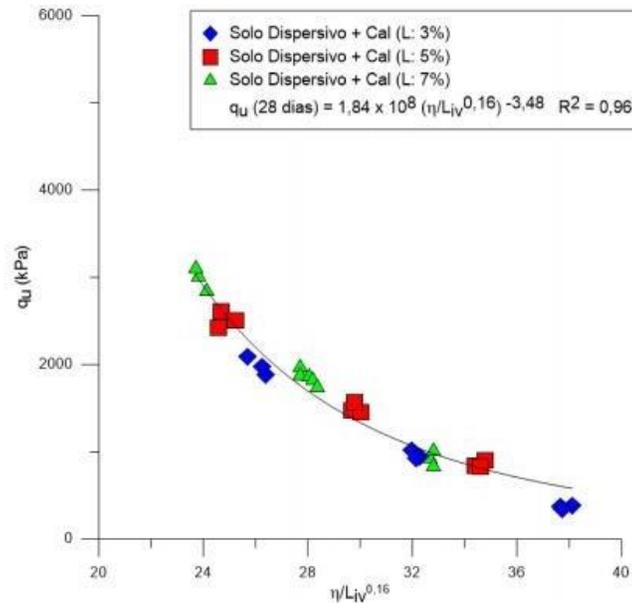
uma correlação única entre a resistência e a relação porosidade/teor volumétrico de cal, sendo necessário compatibilizar as taxas de variação das grandezas através de um expoente a uma delas. Através de interações, obteve-se o melhor ajuste para relação aplicando uma potência de 0,16 sobre o parâmetro L_{iv} . As Figuras 20, 21 e 22 apresentam os resultados da variação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal.

Figura 20 - Variação da resistência à compressão simples versus relação vazios/cal - 7 dias de cura



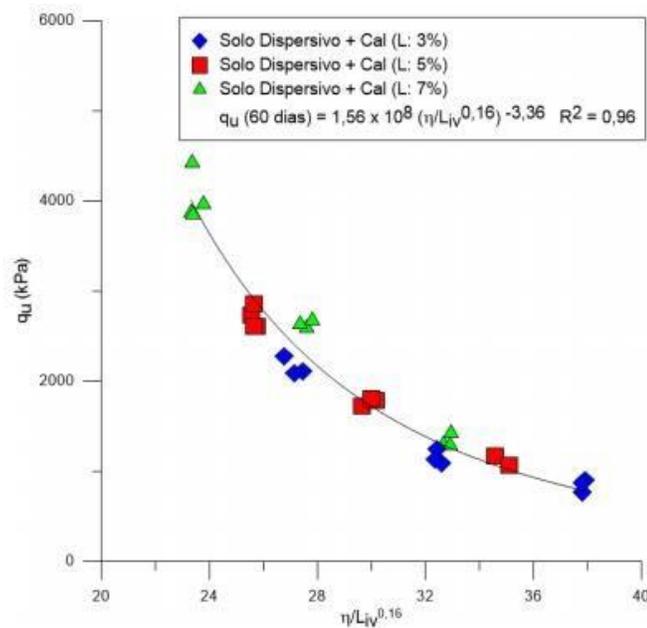
Fonte: Samaniego (2015)

Figura 21 - Variação da resistência à compressão simples versus relação vazios/cal - 28 dias de cura



Fonte: Samaniego (2015)

Figura 22 - Variação da resistência à compressão simples versus relação vazios/cal - 60 dias de cura



Fonte: Samaniego (2015)

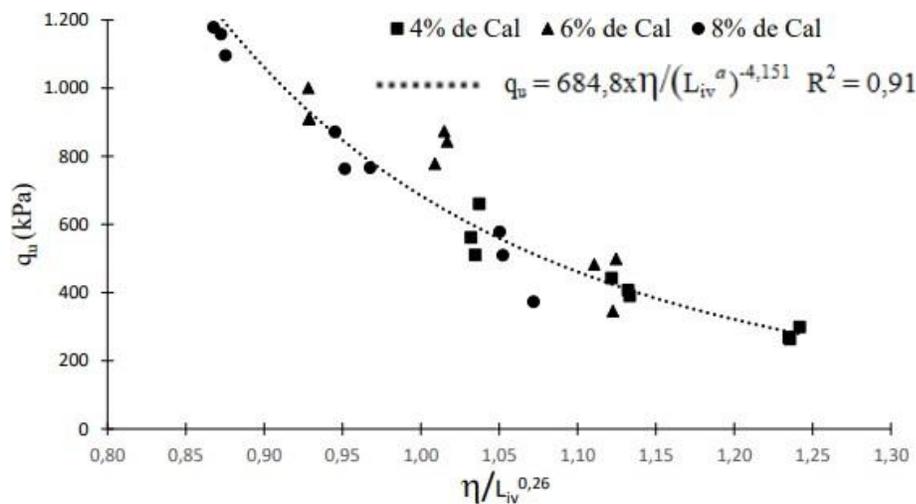
Silvani (2017) avaliou a influência da relação porosidade/teor volumétrico na variação de resistência à tração na compressão diametral de misturas solo-cinza volante-cal para diferentes

temperaturas (20 °C, 35 °C, 50 °C, 65 °C, 80 °C e 90 °C) e tempos de cura (1, 3 e 7 dias). Para isso, realizou-se ensaios com corpos de prova da mistura solo de Osório e cinza volante com adição de 3%, 5% e 7% de cal, pesos específicos aparente seco de 14 kN/m³, 15 kN/m³ e 16 kN/m³. Constatou-se que a relação η/L_{iv} apresentou correlação com a relação diametral à proporção que a temperatura e tempo de cura aumentavam.

No contexto de solos expansivos, Tenório (2019) avaliou a influência da relação porosidade/teor volumétrico da cal e do resíduo de mármore sobre a expansão e resistência mecânica de uma argila expansiva. A análise se deu através de amostras resultantes da mistura de solo com adições de 30%, 40% e 50% de mármore e 2%, 4%, 6% e 8% de cal. O peso específico seco dos corpos de prova variou em 14 kN/m³, 15 kN/m³ e 16 kN/m³.

A Figura 23 apresenta a relação entre a compressão simples e o parâmetro $\eta/L_{iv}^{0,26}$. Os resultados para todos os teores de cal também são satisfatórios demonstram a aplicabilidade da metodologia porosidade/aditivo para a estabilização de solos expansivos com cal. Com relação ao solo estabilizado com resíduo de mármore, as amostras não resistiram ao processo de inundação, sugerindo que não ocorreram reações pozolânicas entre o resíduo e o solo.

Figura 23 - Resistência à compressão simples pelo parâmetro η/L_{iv}^a do solo estabilizado com cal

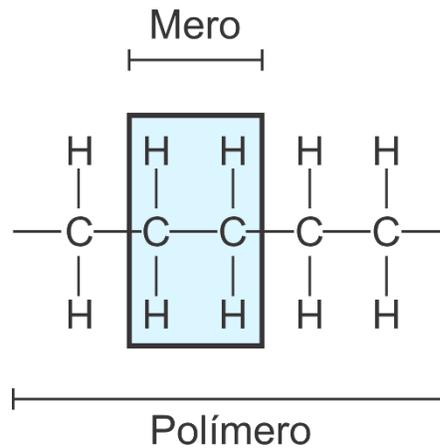


Fonte: Tenório (2019)

2.5. Polímeros

Polímeros são macromoléculas oriundas da repetição de unidades menores chamadas monômeros e formadas por ligações moleculares orgânicas (polimerização). Na Figura 24, encontra-se a representação química dos polímeros (GORNÍ, 2003).

Figura 24 - Estrutura molecular dos polímeros



Fonte: Autor (2021)

Os polímeros podem ser classificados quanto a origem (natural ou sintética), quantidade de monômeros (homopolímero ou copolímero), metodologia de preparo (adição ou condensação), estrutura química da cadeia (polímeros de cadeia carbônica ou de cadeia heterogênea), fusibilidade e/ou solubilidade do polímero, comportamento mecânico (plásticos, elastômeros ou fibras) e desempenho (termoplásticos convencionais, especiais, de engenharia ou de engenharia especial) (PALMEIRA, 2018; LAM; JEFFERIS, 2018; BRITO, 2020; CARNEIRO, 2020).

Uma das principais classificações refere-se à origem, onde os polímeros são ditos sintéticos, quando possuem o petróleo como matéria prima (nylon, teflon, PVC e PET), e naturais, quando seus originários de componentes disponíveis na natureza (DNA, RNA e celulose).

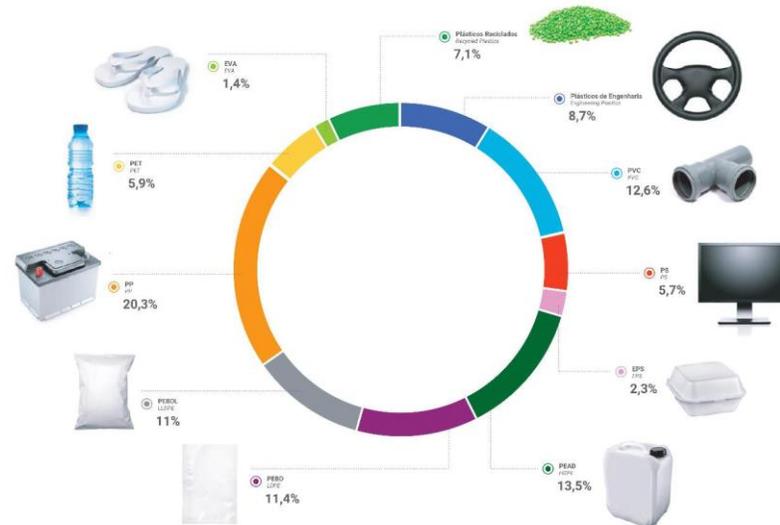
Presente na maior parte das atividades cotidianas, seja através de materiais ou processos, os polímeros tem aplicações em diversos setores da indústria em virtude do baixo custo de produção, baixa densidade, resistência à corrosão e vida útil elevada, além de não haver necessidade de mão de obra e instrumentação específica.

Na construção civil, há diversas aplicações dos polímeros em produtos - para redução da quantidade de água e melhoria da trabalhabilidade do concreto, além de revestimentos especiais para preparação de superfícies (primers) – e técnicas que, na Engenharia Geotécnica, buscam melhorias nos parâmetros de resistência de solos para aterros de solos moles, fundações superficiais, estabilidade de taludes, contenção de fluidos em obras subterrâneas e profundas, pavimentação e estabilização (LAM & JEFFERIS, 2018; PALMEIRA, 2018).

De acordo com a ABIPLAST (2018), os polímeros plásticos de maior consumo no Brasil, conforme observado na Figura 25, são: Polipropileno (PP), Polietileno de Alta Densidade (PEAD),

Policloreto de Vinila (PVC), Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), Polietileno de Baixa Densidade Linear (PEBDL), plásticos de engenharia, plásticos reciclados, polietileno tereftalato (PET), Poliestireno (PS), Poliestireno Expandido (EPS) e Etileno Acetato de Vinila (EVA).

Figura 25 - Consumo de polímeros no Brasil



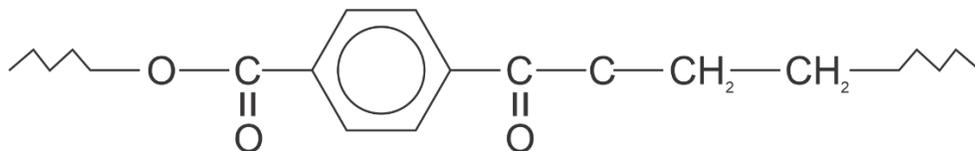
Fonte: ABIPLAST (2018)

Vieira (2018) apresentou que, em Campina Grande – Paraíba, 13,2% do peso total de resíduos presentes no aterro sanitário da cidade é composto por plástico. Já no que se trata a volume, este mesmo material apresenta 32,7%, quase metade do volume total dos resíduos do aterro.

2.5.1. Polietileno tereftalato (PET)

O Polietileno Tereftalato, material popularmente conhecido como PET (Figura 26), origina-se da síntese do tereftalato de etileno e do ácido tereftálico ou tereftalato de dimetila e glicol etilênico. No PET, as macromoléculas são formadas por unidade repetidas do tereftalato de etileno que, para o caso de polímeros comerciais, compreendem um intervalo de 130 a 155 unidades (WELLEN & RABELO, 2008).

Figura 26 - Unidade química repetitiva do PET



Fonte: Autor (2021)

De origem sintética e classificado como termoplástico, o PET é um material higroscópico que apresenta como propriedades leveza, transparência, brilho e facilidade de moldagem. Além do

mais, trata-se de um polímero inodoro, insípido, atóxico, inerte, com elevada resistência mecânica, térmica e química. Apresenta-se nos estados amorfo (transparente), parcialmente cristalino e orientado (translúcido) e altamente cristalino (opaco), com funções de barreira para gases e odores. Sua densidade é, aproximadamente, 1,38 g/cm³ (CANEVAROLO JR, 2007; ABIPET, 2014).

A propriedade termoplástica do PET refere-se à capacidade de tornar-se viscoso a uma determinada temperatura, sendo possível moldá-lo. Isso garante a capacidade de reciclagem sem perdas das propriedades físicas (GIRALDI, 2008).

Utilizado em larga escala em todo o mundo por causa de suas características, o PET destaca-se em virtude de suas aplicações tecnológicas, sobretudo na forma de fibras e filmes. A cristalinidade desse material desperta o interesse tanto no meio científico quanto tecnológico. Tem sido empregado em diversos segmentos do mercado na confecção de embalagem – principalmente garrafas – de bebidas (água, cerveja e refrigerante), destacando-se pela capacidade volumétrica e segurança. (ABIPET, 2012; ABIPET, 2014).

Nas últimas décadas, o volume de tereftalato de polietileno (PET) aumentou significativamente devido à sua ampla aplicação na fabricação de embalagem e fibras. Em 2021, estima-se que os produtos de tereftalato de polietileno produzidos mundialmente totalizarão cerca de 20 milhões de toneladas (LORENZETTI *et al.*, 2006; RECYCLING INTERNATIONAL, 2016).

Smithers Pira (2020) mostra que o consumo global de embalagens PET, durante os anos de 2015 a 2019, apresentou um crescimento a uma taxa média anual de 4,0%, totalizando 21,8 milhões de toneladas. Para 2020, o consumo global de embalagens PET é projetado em 22,6 milhões de toneladas, com previsão de crescimento durante 2020 a 2025, a uma taxa média anual de 3,7%, atingindo 27,1 milhões de toneladas.

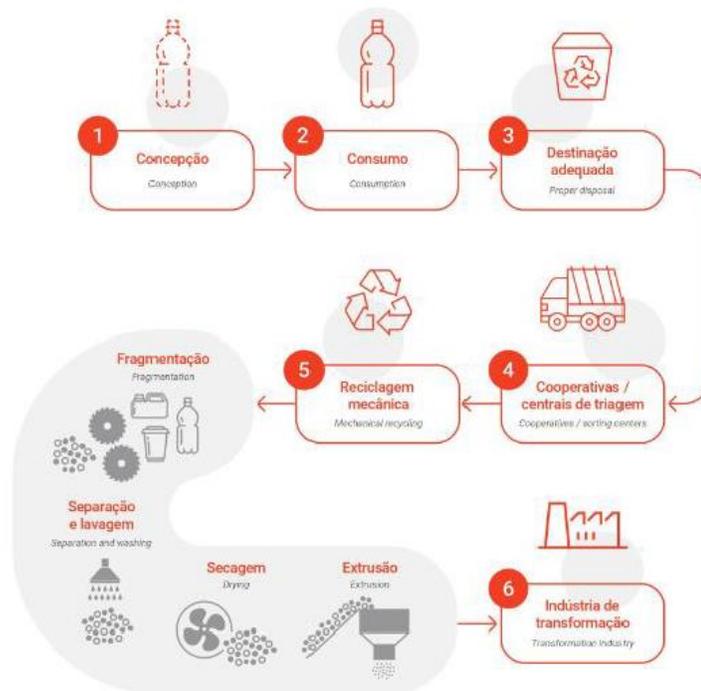
Por serem compostos formados de hidrocarbonetos não biodegradáveis, os resíduos de PET acarretam, inevitavelmente, severa destruição ambiental. Em decorrência da ausência de uma destinação pós-consumo adequada, uma elevada quantidade de resíduos de PET acabam em ralos, aterros e até no oceano. Algumas previsões afirmam que, até 2050, a quantidade desse material excederá a de peixes nos oceanos caso práticas sustentáveis não sejam adotadas (AKINYELE, IGBA, ADIGUN, 2020).

Decorrente da crescente utilização do PET em embalagens plásticas, a reciclagem se faz necessária, imperativa e urgente, o que justifica os estudos das propriedades desse material para

consequente adoção de práticas limpas, que consistem na introdução de um processo menos poluidor, recuperação de matéria prima ou valorização de resíduo para subprodutos. A consequência da reciclagem desse material impacta diretamente na redução do volume de lixo, economia de energia elétrica e petróleo, geração de emprego e produtos de baixo custo de mercado (MARTINS, 2012; SILVESTRE, 2013).

No processo de reciclagem de materiais plásticos, destacam-se 06 etapas: concepção, consumo, destinação adequada, triagem, reciclagem mecânica e indústria de transformação (Figura 27).

Figura 27 - Processo de reciclagem de materiais plásticos



Fonte: ABIPLAST (2019)

Segundo a ABIPET (2014), em virtude da reutilização e evolução do mercado, acompanhado pelos avanços tecnológicos, há um incentivo para estudos e aplicações do PET, dentre as quais podemos citar:

- Indústria automotiva – tecidos internos (estofamentos), carpetes, peças de barco;
- Pisos – carpetes, capachos para áreas de serviços e banheiros;
- Artigos residenciais – enchimento para sofás e cadeiras, travesseiros, cobertores, tapetes, cortinas, lonas para toldos e barracas
- Artigos industriais – rolos para pintura, cordas, filtros, ferramentas de mão, mantas de

impermeabilização;

- e) Embalagens – garrafas, bandejas, fitas;
- f) Vestuário – têxteis, roupas esportivas, calçados, malas, mochilas, vestuário em geral;
- g) Indústria química – resinas alquídicas, adesivos.
- h) Na construção civil, em especial, o PET vem sendo utilizado para instalações hidrossanitárias (caixas d’água, tubos e conexões, torneiras), coberturas (telhas), piscinas, bancadas e pias (mármore sintético com PET).

Destaca-se a indústria de asfalto, considerada um dos setores líderes a tomar iniciativas na aplicação de abordagens inovadoras para maximizar a reciclagem e promover a sustentabilidade. De acordo com um relatório divulgado pela National Asphalt Pavement Association (NAPA), mais de 99% dos projetos de recapeamento e alargamento de pavimentos são constituídos de asfaltos fresados, tornando o setor líder em reciclagem e sustentabilidade (SILVA *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2018; WILLIAMS, WILLIS, ROSS, 2019).

Há aplicações também no concreto, com uso de partículas de plástico no lugar de agregados naturais, melhorando a dureza, a resistência à flexão e a absorção de energia do concreto – propriedades que são de importância significativa para as estruturas expostas a carregamentos dinâmicos e de impacto (HANNAWI, KAMALI-BERNARD, PRINCE, 2010).

2.5.2. Utilização de PET em obras geotécnicas

A adição de PET ao solo representa um efeito ambiental positivo, uma vez que os aditivos convencionais apresentam processo produtivo com elevado consumo de matérias-primas e energia, trazendo consequências ao meio ambiente.

Dentre os diversos estudos que avalia o potencial de uso do PET como aditivo para melhoria de solos expansivos, proporcionando redução de impactos ambientais e obtenção de benefícios econômicos, contatou-se que:

Garcia, Valdes e Cortes (2015) observaram aumento nas forças de cimentação, tração e resistência ao cisalhamento de um solo arenoso a partir da adição de polímeros em comparação com as amostras de areia pura e areia com cimentação artificial;

Ribeiro (2019) estudou a adição de borracha e garrafas PET trituradas, nos formatos de fibras e micronizados, em bentonitas para obras geotécnicas. Observou-se, para os todos os resíduos, melhorias no comportamento mecânico do solo. No caso do PET micronizado, utilizou-

se porcentagens de 5% e 10% em relação ao peso seco. Durante o cisalhamento direto, notou-se que o aumento da porcentagem de PET acarreta diminuição da resistência de pico e residual para a menor tensão. Em todas as misturas com PET, houve um incremento do intercepto coesivo e redução do ângulo de atrito. No ensaio de adensamento, as misturas com PET apresentaram um maior coeficiente de adensamento, além de redução da permeabilidade.

Carvalho, Casagrande e Farias (2019) investigaram o uso de resíduos de garrafas PET – trituradas, em formato de fibras e micronizadas – nas melhorias das características de uma camada de base para pavimentos. Utilizou-se porcentagens de 10%, 20% e 30% de PET micronizado para realização dos ensaios de caracterização, mecânicos e módulo de resiliência. Os resultados demonstraram que o PET micronizado provoca diminuição da massa específica aparente seca e da umidade ótima. Além disso, modifica a interação do solo com a água, tornando as misturas menos plásticas. Para uma menor quantidade de PET, percebe-se aumento da rigidez do solo, melhorando o módulo de resiliência. Como conclusão, definiu-se o teor de 10% de PET micronizado como o mais recomendado para a camada de base do pavimento;

Okonta (2019) buscou avaliar a aplicabilidade de uma solução polimérica acrílica para um solo arenoso característico da região da África do Sul sob os aspectos de tempo de cura, porcentagens de aditivo e temperaturas da solução. O estudo permitiu observar redução do índice de vazios a partir do aumento da porcentagem de solução polimérica. Verificou ainda que para cura em maiores temperaturas, houve acréscimo de resistência à compressão não confinada quando comparado com a cura para o mesmo tempo, porém de menor temperatura. Por fim, observou-se que a adição da solução polimérica se mostrou eficaz na cimentação dos grãos de solo.

Louzada, Malko e Casagrande (2019) estudaram a adição de 20, 30 e 40% de PET micronizado em um solo argiloso. Os resultados mostraram aumento considerável no ângulo de atrito e pequena diminuição na coesão. A tensão confinante apresentou-se como uma característica de grande importância pois segundo os autores a baixas tensões de confinamento o PET não é capaz de preencher os vazios do solo e quando solicitado não interage com as partículas de solo diminuindo a resistência ao cisalhamento.

Moura (2020) avaliou o comportamento geomecânico de uma argila expansiva de Sergipe no estado natural deformado e com a adição de 1% e 2% de PET micronizado em relação a massa seca do solo. De modo a analisar o potencial expansivo, realizou-se ensaios de caracterização física com e sem a inclusão de PET, além dos ensaios de expansão livre e pressão de expansão. De acordo

com os resultados, observou-se redução da pressão de expansão de 80 kPa para 40 kPa, porém com valores de expansão superiores para amostras de solo com 1% de PET. Nas amostras de solo com 2% de PET, a pressão de expansão obtida foi de mesma magnitude da argila pura, com valores de expansão livre também maiores quando comparado com as do solo natural.

Consoli *et al* (2020) utilizaram fibras produzidas a partir de garrafas PET, de maneira isolada e juntamente com Cimento Portland, na estabilização de um solo arenoso uniforme. Os resultados mostraram que em ambas as situações houve aumento da resistência de pico e residual além de diminuição da fragilidade, sem diminuir a rigidez, das amostras.

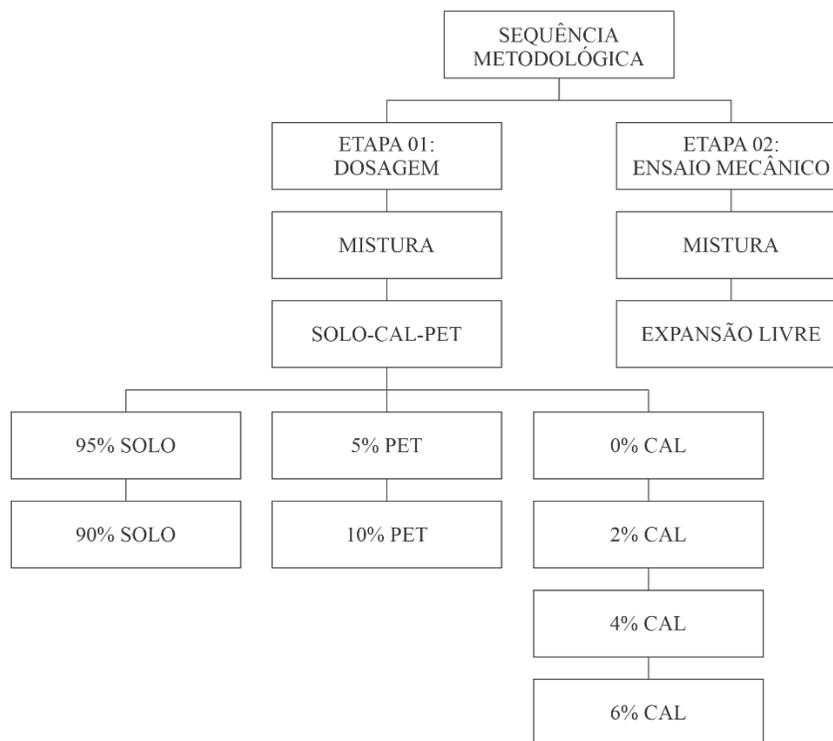
3. METODOLOGIA

Nesta seção, destinada a metodologia do estudo, destacam-se os materiais e os métodos utilizados para perfazer os objetivos propostos.

O programa experimental tem por finalidade avaliar o potencial de estabilização de um solo expansivo com adição de cal e substituição por PET para diferentes pesos específicos secos, analisando-o por meio de expansão unidirecional. A inserção de PET em obras geotécnicas apresenta-se como uma alternativa à sua reutilização de modo a minimizar os impactos ambientais oriundos do descarte inadequado. Além disso, quando utilizado em substituição de agregados, reduz a quantidade de matéria prima necessária, promovendo economia nas obras e preservando os recursos naturais.

Para o desenvolvimento do estudo, serão apresentadas as caracterizações dos materiais utilizados (solo, cal e PET) e os procedimentos metodológicos para a realização dos ensaios de laboratório. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil (UAEC) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A Figura 28 apresenta a sequência de atividades desenvolvidas nesta pesquisa.

Figura 28 - Sequência metodológica de ensaios e atividades



Na Figura 28, observa-se a sequência de atividades desenvolvidas nesta pesquisa para a

dosagem com solo expansivo sem adição de PET, denominado de solo puro. Em seguida, foi realizado a adição de cal proporcional ao consumo inicial de cal, denominado solo-cal. Em função dos resultados obtidos, foi estabelecido uma dosagem com o solo-cal com a adição de PET, denominada agora de solo-cal-PET.

Os critérios de escolha dos materiais foram baseados nas especificações e normas técnicas segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), além de metodologias (EADES e GRIM, 1966; Rogers *et al.*, 1997) disponíveis na literatura.

Os materiais foram analisados, inicialmente, pelos ensaios de caracterização realizados por Tenório (2019) e Silvani *et al* (2020) para o solo e a cal, e por Silva *et al.*, (2015) e Almeida *et al.*, (2016) para o PET conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Ensaios de caracterização

Ensaios	Norma	Solo	Cal	PET
Análise granulométrica	ABNT NBR 7181 (2017)	X		X
Limites de Atterberg	ABNT NBR 6459 (2017)	X		
	ABNT NBR 7180 (2016)			
Fluorescência de Raios X	ABNT NBR 16137 (2016)	X		
Difração de Raios X	-	X		X
Consumo Inicial de Cal (ICL)	EADES e GRIM (1966)		X	
Adsorção de azul de metileno	ASTM C837 (2019)	X		
Ensaio de Proctor	ABNT NBR 7182 (2016)	X		
Massa específica dos grãos de solo	ABNT NBR 6508 (2016)	X	X	X
Análise termogravimétrica	ASTM E1131 (2020)	X		X
	ASTM D6370 (1999)			
Análise térmica diferencial	ASTM E794 (2018)	X		X
Expansão unidirecional	ASTM D4546 (1996)	X		

3.1. Solo

O solo utilizado na pesquisa apresenta característica expansiva e é oriundo da região

Paulista, região metropolitana de Recife-PE. As amostras são deformadas e foram extraídas de uma jazida com profundidade de 2 metros de comprimento, 1 metro de largura e 1,4 metros de profundidade conforme Figuras 29 e 30.

Figura 29 - Amostra bruta do solo expansivo



Figura 30 - Amostra do solo expansivo (peneira N° 200)



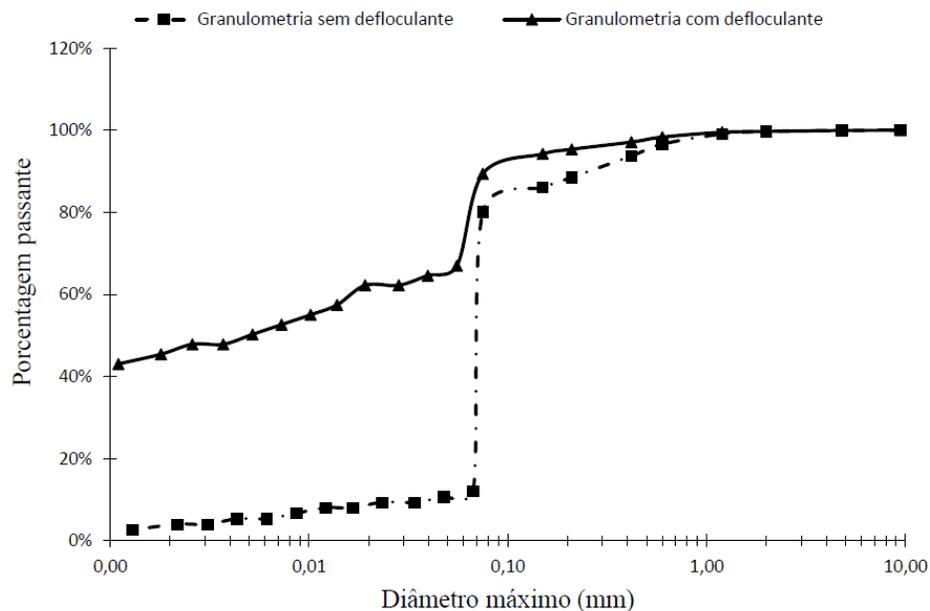
As amostras foram coletadas e transportadas ao Laboratório de Engenharia e Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande. O procedimento de extração e coleta seguiram a ABNT NBR 9820 (1997).

Vale ressaltar que este estudo é parte integrante do projeto de pesquisa aprovado na chamada universal MCTIC/CNPq n.º 28/2018 intitulado ‘controle da expansão de solos através da

estabilização química’. Assim, de forma a cooperar com o conhecimento na estabilização de solos, sobretudo pela utilização de aditivos alternativos em detrimento aos aditivos convencionais, os dados de caracterização do solo puro e solo-cal foram obtidos por Tenório (2019) e Silvani *et al.* (2020).

Segundo Tenório (2019) e Silvani *et al.* (2020), com relação às propriedades físicas, o solo apresenta distribuição granulométrica que permite determinar sua classificação como predominantemente fino, pois de acordo com a granulometria feita com defloculante, o material apresenta 10,58% de areia, 43,96% de silte e 45,46% de argila. A classificação do material, ao considerar a granulometria feita sem defloculante, sofre alteração, logo comportando-se como siltoso argiloso. Nesta situação, tem-se 19,84% de areia, 76,14% de silte e 4,02% de argila. Na Figura 31, encontra-se a distribuição do tamanho das partículas do solo em estudo.

Figura 31 - Distribuição do tamanho das partículas do solo expansivo



Fonte: Tenório (2019)

Verificou-se uma variação significativa entre as curvas granulométricas com e sem defloculante, indicando que o tamanho das partículas do solo *in situ* não condiz com a condição real das partículas. Isso pode acarretar interpretações equivocadas acerca das propriedades do material.

Com relação ao índice de plasticidade, Tenório (2019) e Silvani *et al.* (2020) constataram que o solo apresenta características plásticas, propriedade comum aos solos coesivos. Além disso, classifica-se como uma argila de baixa compressibilidade ou argila de alta compressibilidade

segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e como solo fino de alta compressibilidade (A-7-6) pela *Highway Research Board* (HRB). As características físicas do solo estão descritas na Tabela 2.

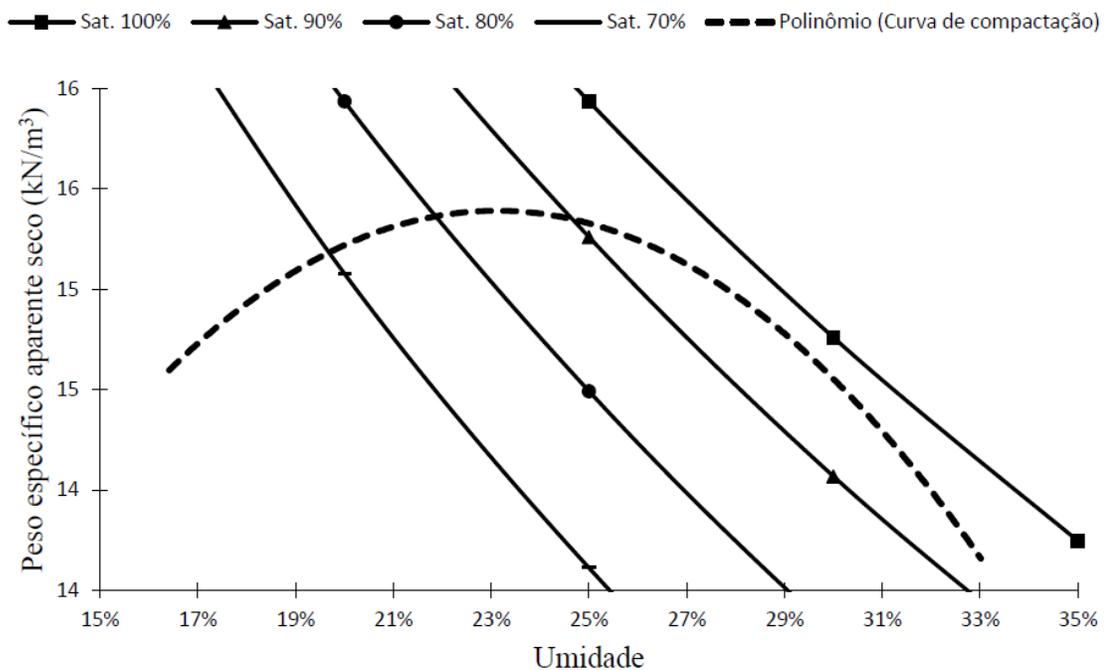
Tabela 3 - Características físicas do solo expansivo

Limite de liquidez	49%
Limite de plasticidade	21%
Índice de plasticidade	28%
Peso específico das partículas do solo	26,50 kN/m ³

Fonte: Tenório (2019); Silvani *et al.* (2020)

Tenório (2019) e Silvani *et al.* (2020) executaram o ensaio de compactação somente para o solo puro, aplicando-se a energia Proctor normal (26 golpes/camada) com reuso de material e cilindro pequeno. O solo estudado apresentou umidade ótima em torno de 23% e peso específico seco máximo de 15,4 kN/m³. A umidade ótima elevada, além do peso específico máximo entre 15 kN/m³ e 16kN/m³, representam característica de solo com alto teor de argila. A Figura 32 demonstra a curva de compactação do solo.

Figura 32 - Curva de compactação do solo



Fonte: Tenório (2019)

A respeito da caracterização química, Tenório (2019) e Silvani *et al.* (2020) realizaram os ensaios de fluorescência de raios X, difração de raios X, análise termo gravimétrica derivada,

análise térmica diferencial e azul de metileno.

Pelo ensaio de Fluorescência de Raio X (FRX), realizado com atmosfera de vácuo e utilizou catodos de cobre, o autor constatou que os principais elementos constituintes do solo são dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3). Percentualmente, os óxidos de ferro e alumínio somam 30% dos constituintes do solo, o que possibilita a ocorrência de reações pozolânicas com a cal. A Tabela 4 apresenta os resultados da fluorescência de raios X do solo.

Tabela 4 - Fluorescência de raios X do solo

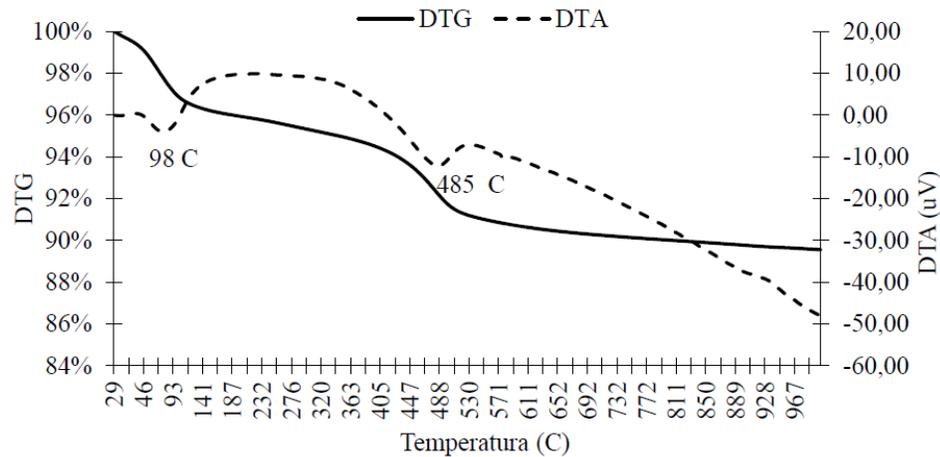
Elemento (%)	Fração (%)	Desvio padrão
SiO₂	55	0,07
Al₂O₃	25	0,07
Fe₂O₃	5	0,01
K₂O	2	0,01
MgO	1	0,04
TiO₂	1	0,01
SO₃	0	0,01
ZrO₂	0	0,00
Rb₂O	0	0,00
SrO	0	0,00
PR*	10	0,00

*PR=perda ao rubro

Fonte: Tenório (2019); Silvani *et al.* (2020)

Para a análise termo gravimétrica derivada (DTG) e a análise térmica diferencial (DTA) do solo, cujo os ensaios foram realizados em atmosfera de nitrogênio com fluxo de 100 ml/min e uma taxa de aquecimento de 12 °C por minuto, o autor observou que, na faixa de temperatura entre 95 °C e 105 °C, há um pico endotérmico na curva da DTA, além de uma perda de massa na curva da DTG. No que se refere ao intervalo entre 430 °C e 510 °C, verificou-se que há um outro pico endotérmico. No primeiro momento, esse fenômeno associa-se a evaporação de água livre no solo e, no segundo momento, a perda de hidroxilas dos argilominerais. Na Figura 33, encontram-se os resultados da análise termo gravimétrica derivada (DTG) e a análise térmica diferencial (DTA) do solo.

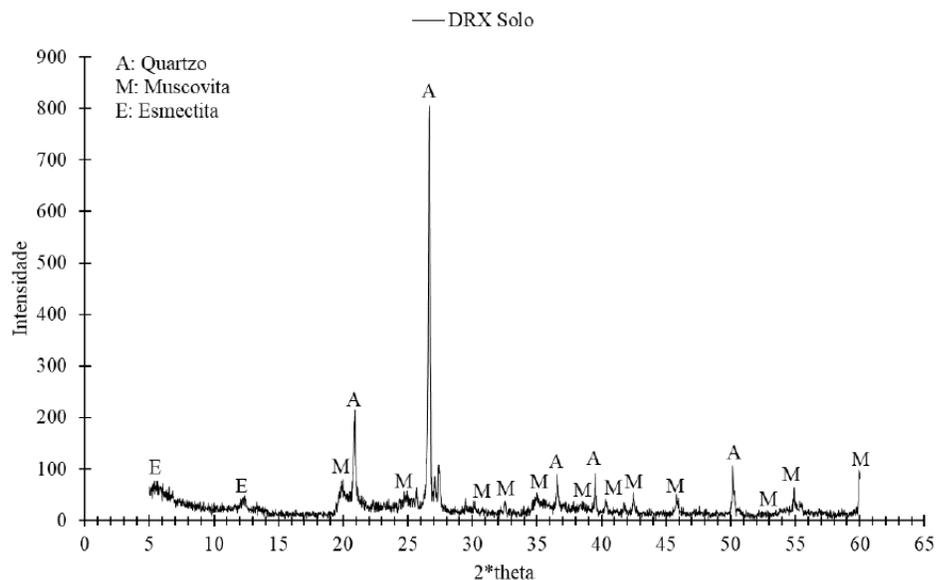
Figura 33 - Análise termo gravimétrica derivada (DTG) e a análise térmica diferencial (DTA) do solo



Fonte: Tenório (2019)

No que se refere ao ensaio de difração de raios X (DRX), realizado com amplitude entre 5° e 60° e velocidade de varredura de 2 graus/minuto em equipamento com catodo de cobre ($V = 40$ kV; $i = 30$ mA), a interpretação do difratograma permitiu identificar picos de quartzo e bandas de muscovita e esmectita (grupo de argilominerais expansivos). A forma amorfa dos argilominerais, indicada pelas bandas, possibilita a reação com íons de cálcio, originando silicatos de cálcio hidratados (CSH) e o aumento da resistência do solo estabilizado com cal. A Figura 34 apresenta os resultados do ensaio de difração de raios X do solo.

Figura 34 - Difração de raios X do solo



Fonte: Tenório (2019); Silvani *et al.* (2020)

Por fim, Tenório (2019) concluiu a caracterização do solo através do ensaio de adsorção de azul de metileno, que possibilitou estimar a capacidade de troca catiônica (CTC) e a superfície específica do solo. Os valores confirmam o que já foi observado nas bandas amorfas: o solo é capaz de reagir com a cal e desencadear reações pozolânicas. A Tabela 5 apresenta os resultados de troca catiônica e superfície específica do solo.

Tabela 5 - Capacidade de troca catiônica e superfície específica do solo

Capacidade de troca catiônica	59,20 meq/100 g
Superfície específica	462,01 m ² /g

Fonte: Tenório (2019)

3.2. PET

Para substituição do solo expansivo, utilizou-se um polímero, produto da reciclagem de resíduos sólido. Trata-se do PET pós-consumo, material pulverulento cujas partículas apresentam dimensões máximas de 0,6 mm.

O PET foi adquirido na indústria de reciclagem DE PET, localizada na cidade de Campina Grande – PB. É uma empresa de beneficiamento e reaproveitamento de resíduos sólidos plásticos, oriundas do pós-consumo, que produz, em média, 350 ton/mês de flakes de PET, flocos de PET resultantes do processo de moagem, necessários ao processo de transformação da matéria prima.

O estabelecimento conta com um sistema de beneficiamento e reutilização a partir de uma linha de produção definida. De modo geral, os resíduos sólidos plásticos pós-consumo encontram-se dispostos em fardos, separados ou misturados por cor a depender do produto requerido. Na esteira, após desfardado, o material passa por seleção para remoção de polímeros como polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), policarbonato (PC), policloreto de venila (PVC), Polimetacrilato de metila (PMMA), poliuretano (PU), Poliamida (PA) e o politereftalato de etileno (PET), além de materiais metálicos e orgânicos.

Após a seleção, o material é direcionado ao primeiro moinho para corte na granulometria de 12mm. Após o moinho, os flakes são lavados com água quente, soda caustica, detergente e desengraxante. Em seguida, através de rosca transportadora, é direcionado ao segundo moinho para corte na granulometria de 9 mm. O processo tem prosseguimento com uma nova lavagem, utilizando soda caustica e detergente, para depois o material destinado às secadoras, ventoinhas e, finalmente, aos silos.

As tarefas são repetitivas e de alta padronização, originando quatro produtos principais:

PET (verde, incolor, vermelho, azul, preto, cinza, metálico, óleo e colorido), polipropileno (branco e colorido), polietileno (branco e colorido) e fita de arquear.

Como todo processo produtivo, o processo de reciclagem do PET também gera resíduos, destacando-se: PET em pó, rótulos e tampas, rafia. Neste estudo, utilizou-se o PET em pó, com dimensões entre 0,6 e 0,074 mm, que para fins comerciais é denominado de PET micronizado. A Figura 35 apresenta o PET micronizado.

Figura 35 - PET micronizado



Conforme mencionado para o solo, reitera-se que a utilização do PET como material de substituição tem por objetivo cooperar com o conhecimento na estabilização de solos, sobretudo pela reutilização em obras geotécnicas. Nesse sentido, pela disponibilidade do material em laboratório em virtude da utilização para estudos com misturas asfálticas, utilizou-se aos dados de caracterização do PET micronizado obtidos por Silva *et al.*, (2015) e Almeida *et al.*, (2016).

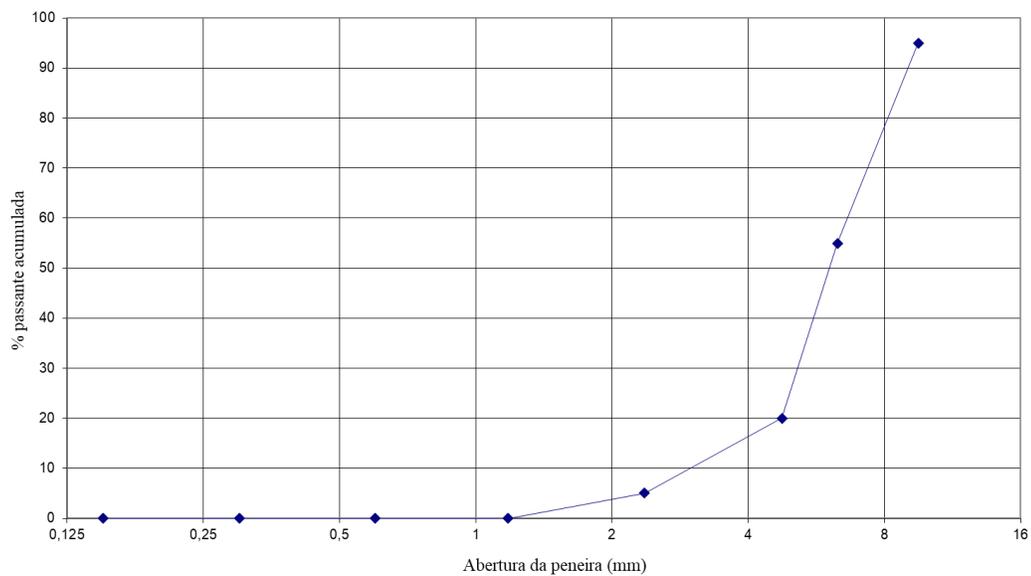
Almeida *et al.* (2016), pela caracterização física, observou que o PET micronizado é classificado como um material fino, com módulo de finura em torno de 1,29 e dimensão máxima dos agregados de 0,60, sendo a massa unitária no estado solto igual a 629 kg/m³ e massa unitária no estado compactado igual a 768 kg/m³. Na Tabela 6 e na Figura 36, encontram-se dispostos, respectivamente, a caracterização física do PET e a curva granulométrica.

Tabela 6 - Caracterização física do PET

Ensaio	Unidades	PET	
Granulometria	Módulo de finura	1,29	
	Dimensão máxima	mm	0,60
Massa unitária	Estado solto	kg/m ³	629
	Estado compactado	kg/m ³	768

Fonte: Almeida *et al.* (2016)

Figura 36 - Curva granulométrica do PET



Fonte: Almeida *et al.* (2016)

Para determinação da massa específica do PET, utilizou-se a norma para cimento Portland e outros materiais em pó, por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier, obtendo-se 1,40 g/cm³ conforme mostra a Figura 37.

Valores aproximados para massa específica do PET micronizado foram obtidos por Carvalho; Casagrande; Farias (2019) e Pita; Castilho (2019), Umasabor; Daniel (2020) e Biron (2020) e Ghabchi; Dharmarathna; Mihandoust (2021).

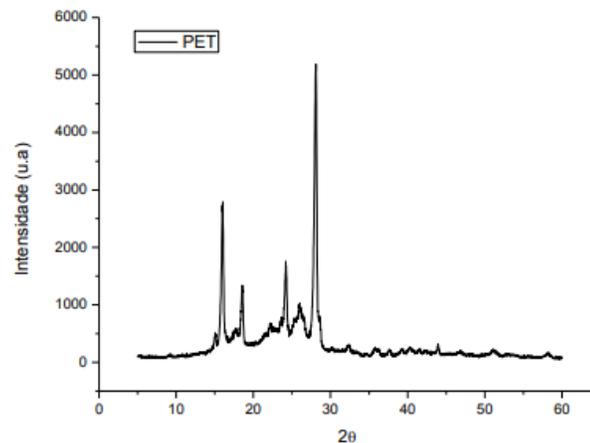
Figura 37 - Massa específica do PET (frasco volumétrico de Le Chatelier)



A respeito da caracterização química, Silva *et al.*, (2015) realizou os ensaios de difração de raios X, análise termo gravimétrica derivada e análise térmica diferencial.

Com relação a Difração de Raios X do PET micronizado pós consumo, Silva *et al.* (2015) constatou que a coloração branca do material é devido a presença de materiais cristalinos, além da presença de impurezas. Esse comportamento estrutural é típico para o PET pós consumo. A Figura 38 apresenta os resultados do ensaio do Difração de Raios X para o PET micronizado.

Figura 38 - Difratograma de Raios X do PET pós consumo

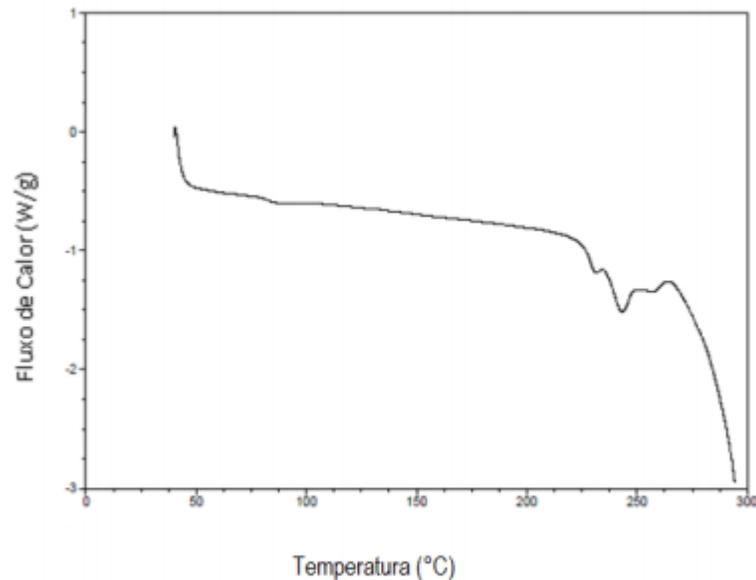


Fonte: Silva *et al.*, (2015)

A realização desse ensaio se deu através de um Difratômetro (Siemens D – 5000), compreendendo a faixa de $2\theta = 10 - 75^\circ$, com um passo de 0,02 graus/segundo, utilizando a radiação $K\alpha$ do cobre como fonte de radiação monocromática, incidência normal, à temperatura ambiente.

Com relação a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) realizado com o PET, Silva *et al.*, (2015) constatou que as mudanças verificadas na cadeia polimérica do material ocorreram para temperaturas superiores a 200 °C. Essa verificação garante que, durante o processo de mistura, o PET mantém constante suas propriedades originais. A Figura 39 apresenta os resultados do ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) realizado com o PET micronizado pós consumo.

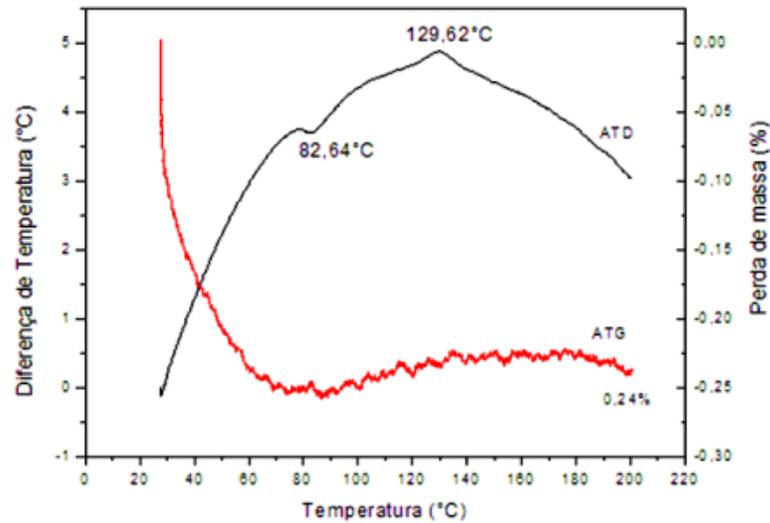
Figura 39 - Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) do PET



Fonte: Silva *et al.* (2015)

No que diz respeito as análises termogravimétricas, técnica utilizada para verificar a variação da massa do material durante aquecimento, Silva *et al.* (2015) observou que a massa de PET reduziu com o aumento da temperatura a partir de 32 °C. Além disso, verificou-se também que, aproximadamente a 83 °C, o material sofre mudanças de estado, passando de sólido para líquido. A Figura 40 apresenta os resultados da Análises de Termogravimetria (TG) e Térmica Diferencial (ATD).

Figura 40 - Análises de Termogravimetria (TG)/ Análise Térmica Diferencial (ATD)



Fonte: Silva *et al.* (2015)

3.3. Cal

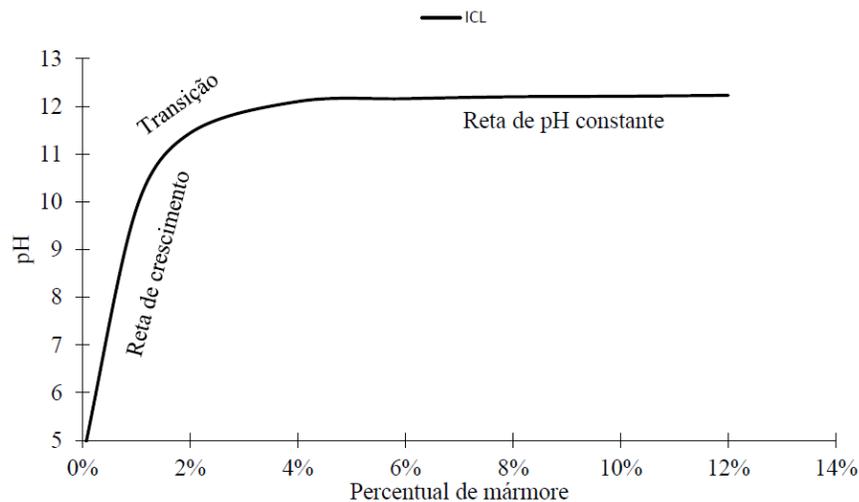
A cal hidratada, produzida em Jaboatão dos Guararapes – PE pela marca MegaÓ e adquirida no comércio local de Campina Grande – PB, foi utilizada como aditivo do solo para garantir um melhor desempenho das propriedades mecânicas das misturas solo-PET, favorecendo aumento da resistência à presença de água e redução da expansão. Com relação a massa específica, Tenório (2019) e Silvani *et al.* (2020) observou que corresponde a 2,41 g/cm³, apresentando, estequiometricamente, 82,0% de Ca(OH)₂ e 8,7% de CaCO₃. A Figura 41 apresenta a cal utilizada neste estudo.

Figura 41 - Cal hidratada



Tenório (2019) ainda realizou o ensaio de ICL, adicionando cal ao solo puro, conforme proposto pelas metodologias de consumo inicial de cal (EADES e GRIM, 1966; Rogers *et al.*, 1997) descrita na seção 2.3.3.3. Neste ensaio, o autor realizou adições de 1%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10% e 12% de massa seca do solo, atingindo o pH constante para o teor de 6%. Esse teor ótimo significa que a expansão do solo deve ser, aproximadamente, zero. A Figura 42 expõe o resultado do ensaio de ICL realizado com solo puro e puro.

Figura 42 - ICL do solo expansivo com a cal



Fonte: Tenório (2019)

3.4. Água

A água utilizada nos ensaios necessários ou no preparo dos corpos de prova, solo expansivo e misturas foi do tipo destilada, sendo o processo de destilação realizado no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

3.5. Planejamento experimental

Para detalhamento do programa de ensaios e da descrição dos equipamentos e procedimentos de ensaio, a Tabela 7 apresenta as variáveis controláveis do programa experimental.

Tabela 7 - Definição das variáveis controláveis

Variáveis	Unidade	Níveis
Teor de cal	%	0%; 2%; 4%; 6%
Teor de PET	%	5%; 10%
Peso específico aparente seco	kN/m ³	14; 15; 16 (99% a 101%)

Os teores de cal obtidos por Tenório (2019) foram definidos com base no ensaio do Consumo Inicial de Cal (ICL), que foi de 6%. Esse valor corresponde a porcentagem mínima de cal hidratada necessária para a estabilização química de solo. Já os teores de PET foram definidos com base na literatura (Martinez *et al.*, 2014; Silva, 2018; Carvalho, 2019; Carvalho; Casagrande; Farias, 2019 e Brito; 2020). No caso dos teores de cal, optou-se por selecionar valores que abrangessem o fim da reta de crescimento, fim da zona de transição e a reta de pH constante dos ensaios de ICL.

Com relação aos pesos específicos secos, a definição se deu através da curva de compactação do ensaio de Proctor Normal obtida por Tenório (2019) e Silvani *et al.*, (2020). De modo a garantir a efetividade dos corpos de prova, optou-se por escolher valores próximos ao peso específico máximo do solo puro. Além disso, partiu-se do princípio de promover a variação da porosidade a partir da variação do peso específico seco como garantia da aplicação da metodologia porosidade/teor volumétrico de aditivo proposto por Consoli *et al.* (2007), Consoli *et al.* (2009), Consoli *et al.* (2011) e Saldanha; Consoli (2016). Na Tabela 8, encontram-se dispostas as variáveis fixas deste estudo.

Tabela 7 - Definição das variáveis fixadas

Variáveis	Unidade	Níveis
Tipo de solo	-	Argila expansiva
Tipo de substituição	-	PET micronizado
Tipo de aditivo	-	Cal hidratada
Tempo de cura para ensaio de expansão	horas	24 h (tempo de realização do ensaio)
Umidade	%	19% ($\pm 0,5\%$)

O tipo de solo foi fixado, uma vez que os solos expansivos são, predominantemente, argilosos. Já a escolha dos tipos de aditivo foi baseada conforme apresentado na justificativa deste estudo. O tempo de cura também foi fixado, pois não se buscou avaliar a existência de reações pozolânicas pela adição de PET e cal ao solo. No caso da umidade, fixou-se o valor baseado na curva de compactação. Assim, fixando a umidade em 19%, a saturação dos corpos de prova deve permanecer entre 50% e 75%.

As variáveis de ruído representam condições que influenciam o desempenho do sistema. Embora não seja possível controlá-las, há medidas para mitigar essas interferências. Na Tabela 9, encontram-se dispostas as variáveis de ruído e as medidas de controle.

Tabela 8 - Definição das variáveis de ruído

Variáveis	Medidas de controle
Equipamento e operador	Utilização de um único equipamento e operador
Homogeneidade do resíduo	Utilização de uma única amostra
Homogeneidade do solo	Utilização de uma única amostra

Em função das variáveis controladas e fixadas, obtém-se a variável resposta, que se refere a expansão livre das amostras. Na Tabela 10, encontra-se disposta a variável resposta do estudo.

Tabela 9 - Definição de variável resposta

Variável	Unidade	Nível
Expansão unidirecional com sobrecarga de 10 kPa	%	Avaliação do potencial de expansão em função da variação do aditivo e do peso específico seco

O programa fatorial dos ensaios de expansão em uma dimensão encontra-se disposto na Figura 43. Para o solo puro, solo-cal e solo-cal-PET foram realizados ensaios de controle de maneira a verificar a expansão unidirecional nos pesos específicos aparentes secos. Ressalta-se que os ensaios para cada teor de cal e PET foram feitos em triplicata.

Figura 43 - Programa fatorial dos ensaios de expansão

PESO ESPECÍFICO	TEOR DE SOLO	TEOR DE CAL	TEOR DE PET	MISTURA
14 kN/m ³	95%	0%	5%	S95L0P5
		2%		S95L2P5
		4%		S95L4P5
		6%		S95L6P5
	90%	0%	10%	S90L0P10
		2%		S90L2P10
		4%		S90L4P10
		6%		S90L6P10
15 kN/m ³	95%	0%	5%	S95L0P5
		2%		S95L2P5
		4%		S95L4P5
		6%		S95L6P5
	90%	0%	10%	S90L0P10
		2%		S90L2P10
		4%		S90L4P10
		6%		S90L6P10
16 kN/m ³	95%	0%	5%	S95L0P5
		2%		S95L2P5
		4%		S95L4P5
		6%		S95L6P5
	90%	0%	10%	S90L0P10
		2%		S90L2P10
		4%		S90L4P10
		6%		S90L6P10

Na Figura 43, a última coluna refere-se a nomenclatura atribuída para cada mistura ensaiada, sendo as letras S, L e P, respectivamente, as referências de solo, cal e PET, enquanto que os valores numéricos referem-se, respectivamente, aos percentuais de cada um desses materiais.

3.5.1. Expansão livre

O ensaio de expansão livre determina a variação de espessura de uma amostra inundada a partir da relação entre altura final e inicial. Para análise do potencial de expansão do solo puro e das misturas solo-cal-pet, realizaram-se ensaios edométricos em células convencionais, utilizando amostras deformadas e compactadas na condição de umidade abaixo da ótima que foram moldadas no laboratório.

Seguindo as dosagens do solo puro e das misturas solo-cal-pet, os materiais foram misturados e compactados em molde de aço inoxidável com diâmetro 50 mm x 20 mm na prensa conforme Figuras 44, 45 e 46.

Figura 44 - Moldagem do corpo de prova na prensa



Figura 45 - Vista superior da mostra (50mm x 20mm)



Figura 46 - Vista superior da mostra (50mm x 20mm)



Após moldagem, as amostras foram transferidas para o anel de adensamento e, posteriormente, para a célula do edômetro, onde são medidas as variações da espessura em função do tempo até a estabilização (Figura 47).

Figura 47 – Ensaio edométrico de solos



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados e avaliados os resultados de expansão unidimensional da mistura solo-cal-PET.

4.1. Ensaio de expansão da mistura solo-cal-PET

A seguir, são apresentados os dados e as curvas das misturas de solo argiloso para avaliação da expansão vertical pela adição de cal (0%, 2%, 4% e 6%) e PET (0%, 5%, 10%) para pesos unitários secos de 14 kN/m³, 15 kN/m³ e 16 kN/m³ e teor de umidade de 19%. Os resultados apresentados para o solo puro (S100L0P0) e solo-cal (S100L2P0, S100L4P0, S100L6P0) foram obtidos por Tenório (2019).

4.1.1. Efeito da adição de pet

As Tabelas 11, 12 e 13 apresentam os dados dos corpos de prova moldados e os resultados dos ensaios de expansão unidimensional com sobrecarga de 10 kPa para a mistura solo-cal-PET. Observou-se que essas amostras cumprem as condições mínimas estabelecidas para as variáveis de controle. A partir desses ensaios, foi possível avaliar a relação entre a expansão vertical e o teor de PET para pesos específicos secos distintos.

Tabela 10 - Características dos corpos de prova de solo puro, solo-cal e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical ($\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$)

Identificação	Teor de solo	Teor de cal	Teor de PET	Expansão vertical
S100L0P0	100%	0%	0%	4,61%
S100L0P0	100%	0%	0%	4,97%
S100L0P0	100%	0%	0%	5,16%
S100L2P0	100%	2%	0%	2,63%
S100L2P0	100%	2%	0%	3,14%
S100L2P0	100%	2%	0%	3,45%
S100L4P0	100%	4%	0%	1,21%
S100L4P0	100%	4%	0%	1,20%
S100L4P0	100%	4%	0%	1,38%
S100L6P0	100%	6%	0%	1,00%
S100L6P0	100%	6%	0%	1,05%

S100L6P0	100%	6%	0%	0,81%
S95L0P5	95%	0%	5%	3,20%
S95L0P5	95%	0%	5%	3,70%
S95L0P5	95%	0%	5%	4,70%
S95L2P5	95%	2%	5%	1,10%
S95L2P5	95%	2%	5%	0,90%
S95L2P5	95%	2%	5%	0,95%
S95L4P5	95%	4%	5%	0,40%
S95L4P5	95%	4%	5%	0,50%
S95L6P5	95%	6%	5%	0,07%
S95L6P5	95%	6%	5%	0,05%
S90L0P10	90%	0%	10%	2,25%
S90L0P10	90%	0%	10%	2,80%
S90L0P10	90%	0%	10%	2,55%
S90L0P10	90%	0%	10%	1,25%
S90L2P10	90%	2%	10%	0,80%
S90L4P10	90%	4%	10%	0,25%
S90L4P10	90%	4%	10%	0,30%
S90L4P10	90%	4%	10%	0,15%
S90L6P10	90%	6%	10%	0,25%
S90L6P10	90%	6%	10%	0,20%

Tabela 11 - Características dos corpos de prova de solo puro, solo-cal e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical ($\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3$)

Identificação	Teor de solo	Teor de cal	Teor de PET	Expansão vertical
S100L0P0	100%	0%	0%	6,22%
S100L0P0	100%	0%	0%	6,42%
S100L0P0	100%	0%	0%	7,04%
S100L2P0	100%	2%	0%	3,99%

S100L2P0	100%	2%	0%	3,97%
S100L2P0	100%	2%	0%	3,95%
S100L4P0	100%	4%	0%	1,57%
S100L4P0	100%	4%	0%	1,67%
S100L4P0	100%	4%	0%	1,80%
S100L6P0	100%	6%	0%	1,16%
S100L6P0	100%	6%	0%	1,03%
S100L6P0	100%	6%	0%	1,25%
S95L0P5	95%	0%	5%	6,95%
S95L0P5	95%	0%	5%	5,90%
S95L2P5	95%	2%	5%	1,50%
S95L2P5	95%	2%	5%	1,45%
S95L2P5	95%	2%	5%	1,60%
S95L4P5	95%	4%	5%	0,70%
S95L4P5	95%	4%	5%	0,80%
S95L4P5	95%	4%	5%	0,75%
S95L6P5	95%	6%	5%	0,15%
S95L6P5	95%	6%	5%	0,30%
S95L6P5	95%	6%	5%	0,20%
S90L0P10	90%	0%	10%	3,90%
S90L0P10	90%	0%	10%	4,80%
S90L0P10	90%	0%	10%	3,40%
S90L2P10	90%	2%	10%	0,78%
S90L2P10	90%	2%	10%	0,55%
S90L2P10	90%	2%	10%	0,90%
S90L2P10	90%	2%	10%	0,95%
S90L4P10	90%	4%	10%	0,50%
S90L6P10	90%	6%	10%	0,40%
S90L6P10	90%	6%	10%	0,30%
S90L6P10	90%	6%	10%	0,45%

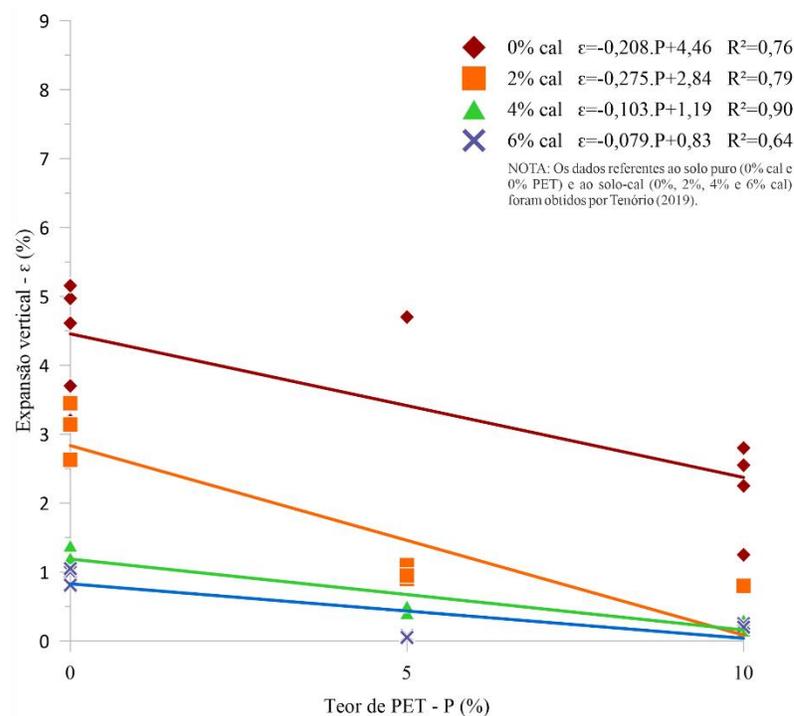
Tabela 12 - Características dos corpos de prova de solo puro, solo-cal e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical ($\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$)

Identificação	Teor de solo	Teor de cal	Teor de PET	Expansão vertical
S100L0P0	100%	0%	0%	7,59%
S100L0P0	100%	0%	0%	7,82%
S100L0P0	100%	0%	0%	8,14%
S100L2P0	100%	2%	0%	4,85%
S100L2P0	100%	2%	0%	5,00%
S100L2P0	100%	2%	0%	4,95%
S100L4P0	100%	4%	0%	2,28%
S100L4P0	100%	4%	0%	2,30%
S100L4P0	100%	4%	0%	2,15%
S100L6P0	100%	6%	0%	1,36%
S100L6P0	100%	6%	0%	1,72%
S100L6P0	100%	6%	0%	1,72%
S95L0P5	95%	0%	5%	7,00%
S95L0P5	95%	0%	5%	7,00%
S95L0P5	95%	0%	5%	7,00%
S95L2P5	95%	2%	5%	1,65%
S95L2P5	95%	2%	5%	1,75%
S95L2P5	95%	2%	5%	1,70%
S95L4P5	95%	4%	5%	0,90%
S95L4P5	95%	4%	5%	1,20%
S95L6P5	95%	6%	5%	0,40%
S95L6P5	95%	6%	5%	0,70%
S95L0P5	95%	0%	5%	5,95%
S90L0P10	90%	0%	10%	5,55%
S90L0P10	90%	0%	10%	6,00%
S90L2P10	90%	2%	10%	0,70%

S90L2P10	90%	2%	10%	1,05%
S90L2P10	90%	2%	10%	0,95%
S90L2P10	90%	2%	10%	0,75%
S90L4P10	90%	4%	10%	0,25%
S90L4P10	90%	4%	10%	0,35%
S90L6P10	90%	6%	10%	0,25%
S90L6P10	90%	6%	10%	0,45%

A Figura 48 expressa a relação entre a expansão vertical e o teor de PET para o solo puro, solo-cal e solo-cal-PET com pesos específicos de 14 kN/m³ segundo os teores de solo (100%, 95%, 90%), cal (0%, 2%, 4%, 6%) e PET (0%, 5%, 10%), respectivamente. Ressalta-se que os dados referentes ao solo puro (0% cal e 0% PET) e ao solo-cal (0%, 2%, 4% e 6% cal) para $\gamma_d=14$ kN/m³ são oriundos do estudo de Tenório (2019).

Figura 48 - Variação da expansão unidimensional pelo teor de PET ($\gamma_d=14$ kN/m³)

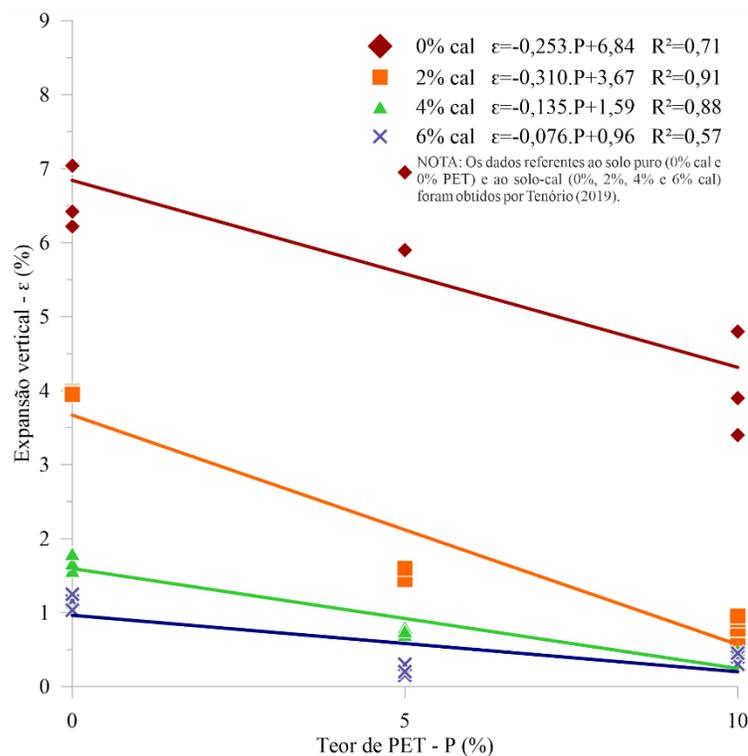


A partir das curvas de ajuste, o comportamento da variação da expansão unidimensional pelo teor de PET indica que há uma tendência de maior expansão para as misturas com menor teor de PET e menor teor de cal adicionado ao solo. A variação volumétrica do solo com peso específico

de 14 kN/m³, considerando o teor de 0% de cal e variações de 0%, 5% e 10% de PET, apresenta redução de 2%. Para o teor de 2% cal, com a mesma variação do teor de PET, a redução da expansão é, aproximadamente, 3%. Já para os teores de 4% cal e 6% cal, a variação volumétrica é praticamente nula, ou seja, a variação no teor de PET não tem efeito nessas misturas.

A Figura 49 expressa a relação entre a expansão vertical e o teor de PET para o solo puro, solo-cal e solo-cal-PET com pesos específicos de 15 kN/m³ segundo os teores de solo (100%, 95%, 90%), cal (0%, 2%, 4%, 6%) e PET (0%, 5%, 10%), respectivamente. Ressalta-se que os dados referentes ao solo puro (0% cal e 0% PET) e ao solo-cal (0%, 2%, 4% e 6% cal) para $\gamma_d=15$ kN/m³ são oriundos do estudo de Tenório (2019).

Figura 49 - Variação da expansão unidimensional pelo teor de PET ($\gamma_d=15$ kN/m³)

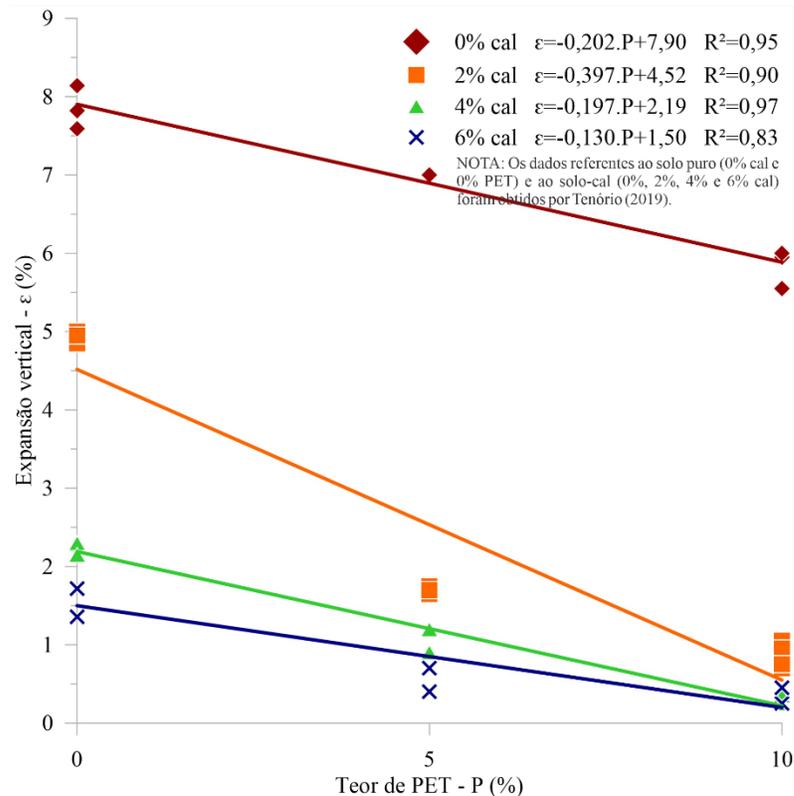


Para o peso específico de 15 kN/m³, o comportamento da variação da expansão unidimensional pelo teor de PET também indica que há um aumento da expansão do solo à medida que reduz o teor de PET e o teor de cal da mistura. A variação volumétrica para o teor de 0% cal, com variação de 0%, 5% e 10% de PET, apresenta redução de, aproximadamente, 2,5%. Para o teor de 2% cal, com a mesma variação do teor de PET, a redução da expansão é, aproximadamente, 4%. Já para os teores de 4% e 6% de cal, a variação volumétrica é praticamente nula, ou seja, o comportamento é praticamente linear indicando que a variação no teor de PET não tem efeito

nessas misturas.

A Figura 50 expressa a relação entre a expansão vertical e o teor de PET para o solo puro, solo-cal e solo-cal-PET com pesos específicos de 16 kN/m^3 segundo os teores de solo (100%, 95%, 90%), cal (0%, 2%, 4%, 6%) e PET (0%, 5%, 10%), respectivamente. Ressalta-se que os dados referentes ao solo puro (0% cal e 0% PET) e ao solo-cal (0%, 2%, 4% e 6% cal) para $\gamma_d=16 \text{ kN/m}^3$ são oriundos do estudo de Tenório (2019).

Figura 50 - Variação da expansão unidimensional pelo teor de PET ($\gamma_d=16 \text{ kN/m}^3$)



Para o peso específico de 16 kN/m^3 , analogamente ao que foi observado anteriormente, o comportamento da variação da expansão unidimensional pelo teor de PET também indica que há um aumento da expansão do solo à medida que reduz o teor de PET e o teor de cal da mistura. A variação volumétrica para o teor de 0% cal, com variação de 0%, 5% e 10% de PET, apresenta redução de, aproximadamente, 2%. Para o teor de 2% cal, com a mesma variação do teor de PET, a redução da expansão é, aproximadamente, 4,5%. Já para os teores de 4% cal e 6% cal, as reduções das variações volumétricas são, respectivamente, 2% e 1,5%, ou seja, sem alterações significativas para as variações no teor de PET.

Ao comparar os solos estabilizados com 0%, 2%, 4% e 6% de cal, mostra-se a eficácia do

PET como material alternativo no controle da expansão dos solos. A adição de PET reduziu significativamente a expansão unidirecional, pois as curvas apresentavam uma tendência linear decrescente.

De modo geral, a adição de PET reduziu a expansibilidade do solo, verificando-se o aumento da expansão vertical paralelamente ao aumento do peso específico seco das misturas. Essa constatação deve-se a quantidade de partículas sólidas de solo presentes por unidade de volume, ou seja, quanto maior o peso específico seco, maior a tendência de expansão, fato também observado por Silvani *et al.* (2020) e Consoli *et al.* (2020).

Além disso, observa-se que as curvas dos três pesos específicos (14 kN/m³, 15 kN/m³ e 16 kN/m³), para os teores de 0% e 2% de cal, como também 4% e 6% de cal, são paralelas entre si, sugerindo que o PET atuou como estabilizante inerte, apenas substituindo o solo expansivo. O PET, apesar de classificado como resíduo não perigoso não inerte, sofre alterações em sua estrutura físico-química apenas sob elevadas temperaturas, o que não se verifica em obras geotécnicas.

Como em outros estudos, a adição de polímeros ao solo propicia resultados satisfatórios, possibilitando sua utilização em obras geotécnicas conforme observado por Bekhiti; Mohamed; Trouzine (2019), que verificou que fibras de borracha de pneus residuais podem ser usadas no tratamento da expansão da mistura bentonita-cimento, e Louzada; Malko; Casagrande (2019), encontrou melhoria no comportamento mecânico de um solo argiloso argiloso reforçado com até 5% de Polietileno Tereftalato (PET) micronizado.

4.1.2. Efeito da adição da cal

As Tabelas 14, 15 e 16 apresentam os dados dos corpos de prova moldados para os ensaios de expansão unidimensional com sobrecarga de 10 kPa para a mistura solo-cal-PET. Observou-se que esses parâmetros cumprem as condições mínimas para as variáveis de controle. A partir desse ensaio, foi possível avaliar a relação entre a expansão vertical e o teor de cal para teor de 5% PET.

Tabela 13 - Características dos corpos de prova de solo-PET e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical para 14 kN/m³ (5% PET)

Identificação	Peso específico seco	Teor de solo	Teor de cal	Teor de PET	Expansão vertical
S95L0P5	14,97 kN/m ³	95%	0%	5%	3,20%
S95L0P5	14,29 kN/m ³	95%	0%	5%	3,70%

S95L2P5	14,03 kN/m ³	95%	2%	5%	1,10%
S95L2P5	14,11 kN/m ³	95%	2%	5%	0,90%
S95L2P5	14,11 kN/m ³	95%	2%	5%	0,95%
S95L4P5	14,20 kN/m ³	95%	4%	5%	0,60%
S95L4P5	14,26 kN/m ³	95%	4%	5%	0,50%
S95L6P5	14,13 kN/m ³	95%	6%	5%	0,07%
S95L6P5	14,09 kN/m ³	95%	6%	5%	0,05%

Tabela 14 - Características dos corpos de prova de solo-PET e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical para 15 kN/m³ (5% PET)

Identificação	Peso específico seco	Teor de solo	Teor de cal	Teor de PET	Expansão vertical
S95L0P5	15,93 kN/m ³	95%	0%	5%	5,90%
S95L0P5	15,16 kN/m ³	95%	0%	5%	6,95%
S95L2P5	15,05 kN/m ³	95%	2%	5%	1,50%
S95L2P5	15,09 kN/m ³	95%	2%	5%	1,45%
S95L2P5	15,10 kN/m ³	95%	2%	5%	1,60%
S95L4P5	15,21 kN/m ³	95%	4%	5%	0,70%
S95L4P5	15,39 kN/m ³	95%	4%	5%	0,80%
S95L4P5	15,23 kN/m ³	95%	4%	5%	0,75%
S95L6P5	15,10 kN/m ³	95%	6%	5%	0,15%
S95L6P5	15,13 kN/m ³	95%	6%	5%	0,30%
S95L6P5	15,33 kN/m ³	95%	6%	5%	0,20%

Tabela 15 - Características dos corpos de prova de solo-PET e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical para 16 kN/m³ (5% PET)

Identificação	Peso específico seco	Teor de solo	Teor de cal	Teor de PET	Expansão vertical
----------------------	-----------------------------	---------------------	--------------------	--------------------	--------------------------

S95L0P5	16,19 kN/m ³	95%	0%	5%	1,10%
S95L0P5	16,25 kN/m ³	95%	0%	5%	0,75%
S95L2P5	16,18 kN/m ³	95%	2%	5%	1,65%
S95L2P5	16,31 kN/m ³	95%	2%	5%	1,75%
S95L2P5	16,36 kN/m ³	95%	2%	5%	1,70%
S95L4P5	16,23 kN/m ³	95%	4%	5%	0,90%
S95L4P5	16,37 kN/m ³	95%	4%	5%	1,20%
S95L6P5	16,23 kN/m ³	95%	6%	5%	0,15%

As Tabelas 17, 18 e 19 apresentam os dados dos corpos de prova moldados para os ensaios de expansão unidimensional com sobrecarga de 10 kPa para a mistura solo-cal-PET. Observou-se que esses parâmetros cumprem as condições mínimas para as variáveis de controle. A partir desse ensaio, foi possível avaliar a relação entre a expansão vertical e o teor de cal para teor de 10% PET.

Tabela 16 - Características dos corpos de prova de solo-PET e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical para 14 kN/m³ (10% PET)

Identificação	Peso específico seco	Teor de solo	Teor de cal	Teor de PET	Expansão vertical
S90L0P10	14,31 kN/m ³	90%	0%	10%	2,25%
S90L0P10	14,28 kN/m ³	90%	0%	10%	2,80%
S90L0P10	14,12 kN/m ³	90%	0%	10%	2,55%
S90L0P10	14,06 kN/m ³	90%	0%	10%	1,25%
S90L2P10	13,94 kN/m ³	90%	2%	10%	0,80%
S90L4P10	14,13 kN/m ³	90%	4%	10%	0,25%
S90L4P10	14,10 kN/m ³	90%	4%	10%	0,30%
S90L4P10	14,11 kN/m ³	90%	4%	10%	0,15%
S90L6P10	14,82 kN/m ³	90%	6%	10%	0,25%
S90L6P10	14,15 kN/m ³	90%	6%	10%	0,20%

Tabela 17 - Características dos corpos de prova de solo-PET e solo-cal-PET e resultado da

expansão vertical para 15 kN/m³ (10% PET)

Identificação	Peso específico seco	Teor de solo	Teor de cal	Teor de PET	Expansão vertical
S90L0P10	15,34 kN/m ³	90%	0%	10%	3,90%
S90L0P10	15,12 kN/m ³	90%	0%	10%	4,80%
S90L0P10	15,28 kN/m ³	90%	0%	10%	3,40%
S90L2P10	15,18 kN/m ³	90%	2%	10%	0,78%
S90L2P10	15,29 kN/m ³	90%	2%	10%	0,55%
S90L2P10	15,28 kN/m ³	90%	2%	10%	0,90%
S90L2P10	15,24 kN/m ³	90%	2%	10%	0,95%
S90L4P10	15,12 kN/m ³	90%	4%	10%	0,50%
S90L6P10	15,93 kN/m ³	90%	6%	10%	0,40%
S90L6P10	15,22 kN/m ³	90%	6%	10%	0,30%
S90L6P10	15,22 kN/m ³	90%	6%	10%	0,45%

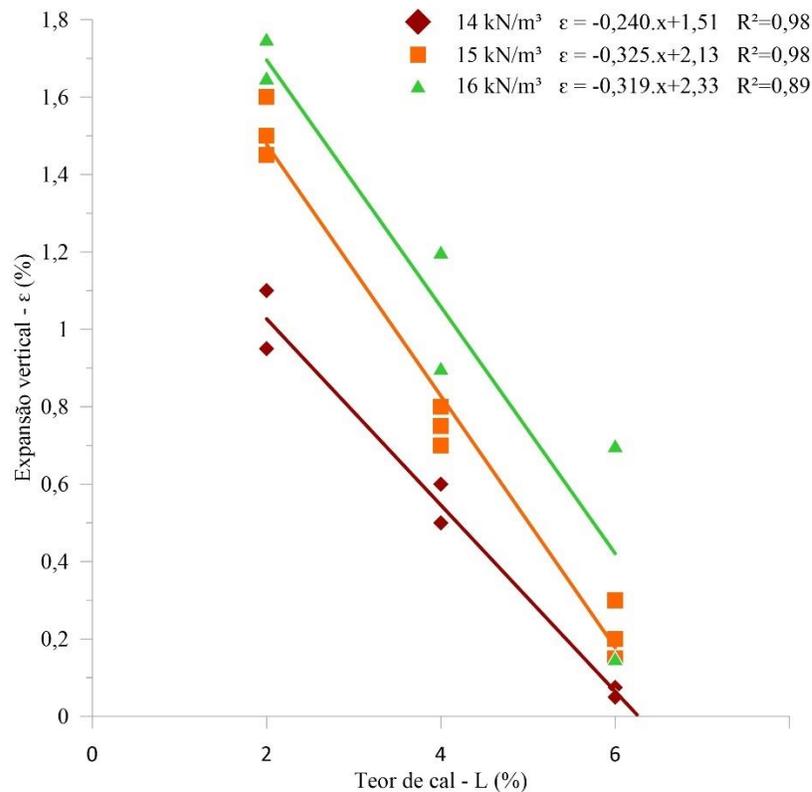
Tabela 18 - Características dos corpos de prova de solo-PET e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical para 16 kN/m³ (10% PET)

Identificação	Peso específico seco	Teor de solo	Teor de cal	Teor de PET	Expansão vertical
S90L0P10	16,25 kN/m ³	90%	0%	10%	5,95%
S90L0P10	16,23 kN/m ³	90%	0%	10%	5,55%
S90L0P10	16,32 kN/m ³	90%	0%	10%	6,00%
S90L2P10	16,08 kN/m ³	90%	2%	10%	0,70%
S90L2P10	16,07 kN/m ³	90%	2%	10%	1,05%
S90L2P10	16,53 kN/m ³	90%	2%	10%	0,95%
S90L2P10	16,43 kN/m ³	90%	2%	10%	0,75%
S90L4P10	16,16 kN/m ³	90%	4%	10%	0,25%
S90L4P10	16,17 kN/m ³	90%	4%	10%	0,35%

S90L6P10	16,83 kN/m ³	90%	6%	10%	0,25%
S90L6P10	16,91 kN/m ³	90%	6%	10%	0,45%

A Figura 51 exibe os resultados de expansão vertical pelo teor de cal para o solo-cal-PET com peso específico de 14 kN/m³, 15 kN/m³ e 16 kN/m³ para os teores de solo (95%), cal (2%, 4%, 6%) e PET (5%).

Figura 51 - Variação da expansão vertical pelo teor de cal (teor de PET=5%)



Considerando o teor de 5% PET, a relação entre a expansão vertical e o teor de cal das misturas solo-cal-PET, para os mesmos pesos específicos secos, apresenta uma tendência linear, reduzindo a expansão vertical a partir do incremento no teor de cal.

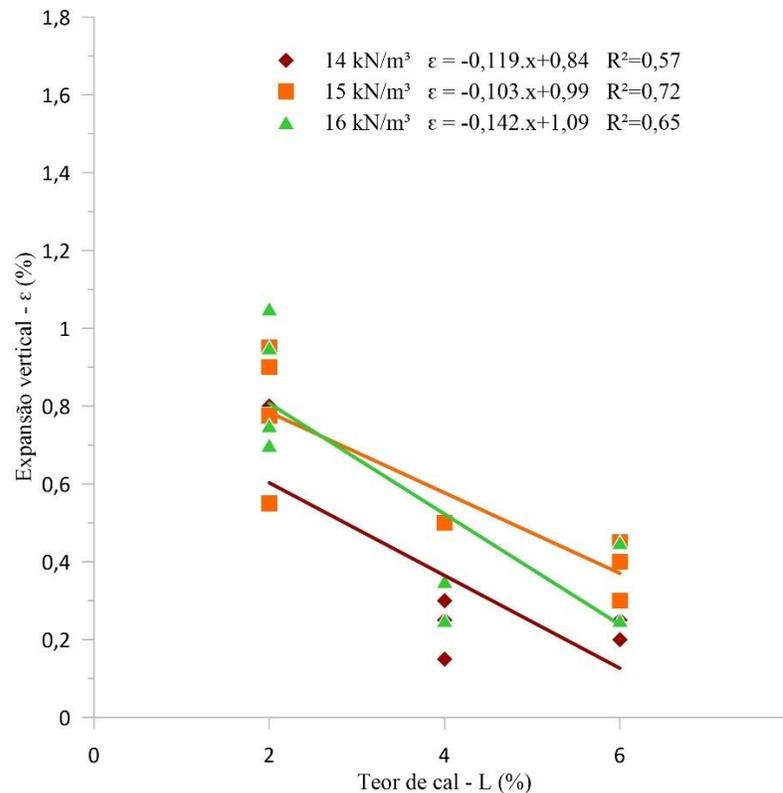
Apesar de apresentarem expansões verticais distintas e inferiores a 2% para os teores de 2% e 4% cal e pesos específicos de 14 kN/m³, 15 kN/m³ e 16 kN/m³, as amostras apresentam funções que convergem para o mesmo valor de expansão para o teor de cal igual a 6%, que é praticamente nulo. Essa constatação pode ser um indicativo que, para o teor máximo de cal, a expansão independe do peso específico seco.

Conforme relatado para efeito da adição de PET e observado também para o efeito da adição

da cal, quanto maior o peso específico, maior a tendência de expansão das misturas, fato também observado por Silvani *et al.* (2020) e Consoli *et al.* (2020). Além do mais, como o teor de 6% de cal refere-se ao ICL da mistura solo-cal, quantidade mínima de cal necessária para tornar o pH constante, era esperado que a variação volumétrica fosse nula. Isso ocorre em virtude de uma maior quantidade de cátions Ca^{2+} fornecida pela cal hidratada para a mistura solo-cal-PET.

A Figura 52 exibe os resultados de expansão vertical pelo teor de cal para o solo-cal-PET com peso específico de 14 kN/m^3 , 15 kN/m^3 e 16 kN/m^3 para os teores de solo (90%), cal (2%, 4%, 6%) e PET (10%).

Figura 52 - Variação da expansão vertical pelo teor de cal (teor de PET=10%)



Considerando o teor de 10% PET, a relação entre a expansão vertical e o teor de cal das misturas solo-cal-PET, para os mesmos pesos específicos secos, também apresenta uma tendência linear com redução da expansão vertical pelo aumento no teor de cal.

O comportamento da expansão pelo teor de cal das misturas é similar para os pesos específicos de 14 kN/m^3 e 15 kN/m^3 , apresentando, inicialmente como variáveis inversamente proporcionais. Isso porque, para o teor de 2% de cal e pesos específicos distintos, as amostras dispõem numericamente do mesmo valor de expansão. Verificou-se também que, para o teor máximo

de cal e pesos específicos de 14 kN/m³, 15 kN/m³ e 16 kN/m³, as amostras apresentam valores de expansão praticamente nulos.

Ao comparar os solos estabilizados com 5% de PET e 10% de PET, comprova-se a eficácia da cal como estabilizante químico no controle da expansão dos solos. A adição da cal reduziu significativamente a expansão unidirecional, pois as curvas apresentavam uma tendência linear decrescente.

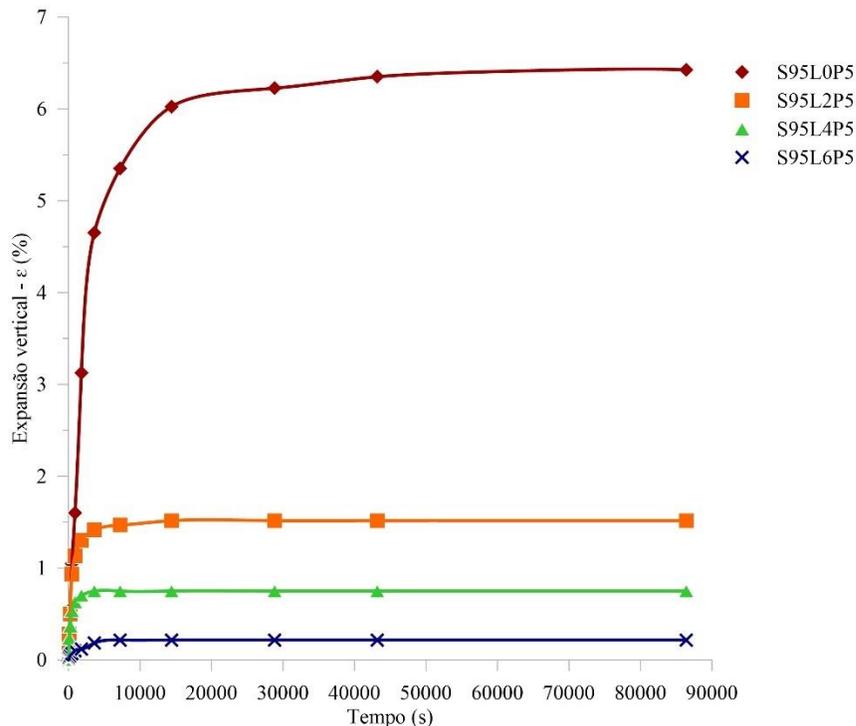
Como em outros estudos, a adição de cal ao solo leva à diminuição da expansibilidade conforme verificado por Silvani *et al.* (2020) e Dang; Khabbaz; Ni (2021).

4.1.3. Efeito da Adição de PET e Cal na Expansão Unidirecional

Alternativamente, pode-se verificar as melhorias da adição de PET e cal no controle da expansão de solo, avaliando as variações volumétricas no decorrer do tempo.

A Figura 53 expõe os resultados da variação da expansão unidimensional pelo tempo para misturas solo-cal-PET com teor de PET fixado em 5%.

Figura 53 - Variação da expansão unidimensional pelo tempo das misturas com teor de 5% PET



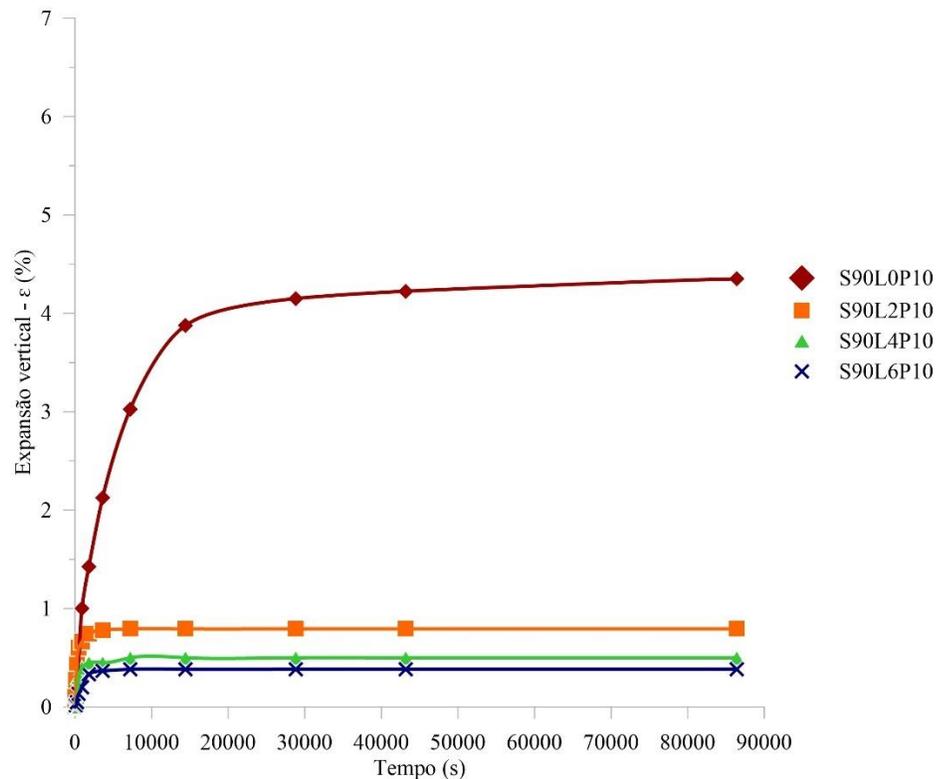
Considerando fixo o teor de 5% PET, verificou-se que, as expansões médias verticais das misturas com 0% cal, situam-se em torno de 7%. Ao passo que, com a adição de 2%, 4%, 6% de cal, as expansões reduzem a valores em torno de 1,5%, 1% e 0%.

Conforme esperado, as amostras das misturas que não contém cal, apresentam expansões

verticais maiores, além da necessidade de um maior tempo para atingir a estabilização. Isso implica dizer que, exceto para as amostras de solo puro (Tenório, 2019) e solo-PET, as alterações do volume estabilizaram em 24 horas. A aceleração da expansão com a adição de cátions de cálcio também Consoli *et al.* (2020).

A Figura 54 expõe os resultados da variação da expansão unidimensional pelo tempo para misturas solo-cal-PET com teor de PET fixado em 5%.

Figura 54 - Variação da expansão unidimensional pelo tempo das misturas com teor de 10% PET



Com relação ao teor de 10% PET, verificou-se que, as expansões médias verticais das misturas com 0% cal, situam-se em torno de 4,5%. Ao passo que, com a adição de 2%, 4%, 6% de cal, as expansões reduzem a valores entre 0,8% e 0,4%, logo praticamente nulas.

Conforme esperado, as amostras das misturas que não contém cal, apresentam expansões verticais maiores, além da necessidade de um maior tempo para atingir a estabilização. Isso implica dizer que, exceto para as amostras de solo puro (Tenório, 2019) e solo-PET, as alterações do volume estabilizaram em 24 horas.

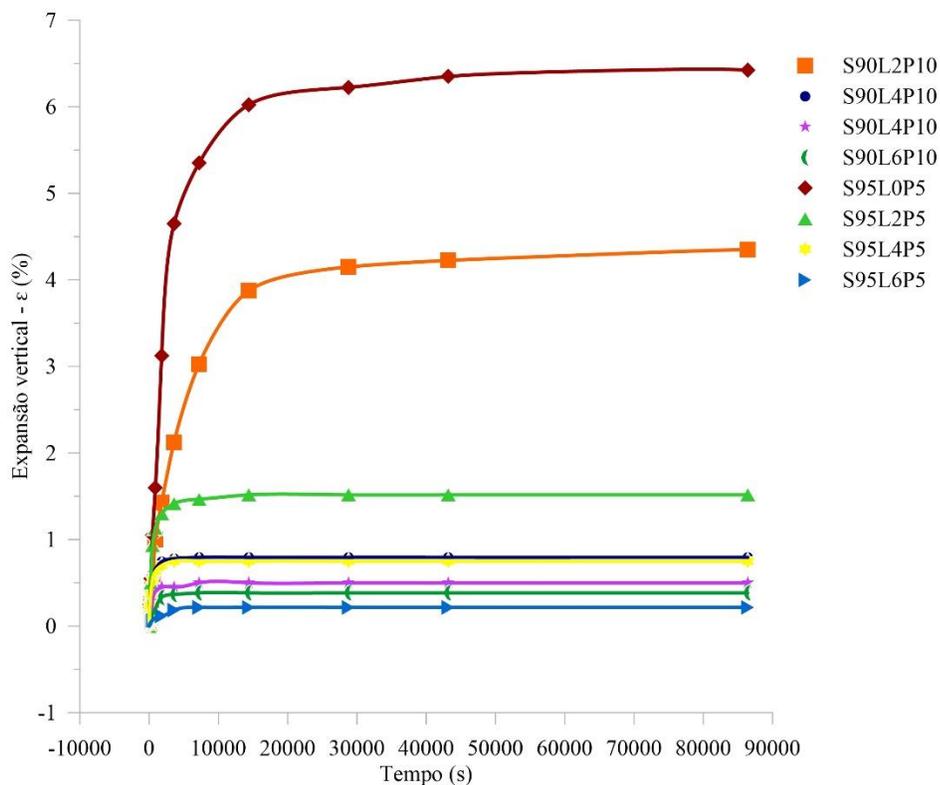
De modo geral, a adição de cal ao solo expansivo favorece o desenvolvimento de reações de trocas catiônicas, onde íons cálcio (Ca^{2+}) são liberados na solução, promovendo trocas catiônicas de íons sódio (Na^+) por (Ca^{2+}) e redução da camada de água adsorvida. Esse fenômeno

favorece a floculação e, conseqüentemente, a redução do potencial de expansão do solo.

Investigando a variação do teor de PET na expansão unidimensional pelo tempo, percebe-se que, o acréscimo no teor de PET de 5% para 10%, afeta diretamente a expansão vertical, com redução de 2%. Isso também é verdade para teores maiores que 10%, pois a adição de PET sugere uma substituição granulométrica, onde um percentual do solo expansivo é substituído por outro material com maior estabilidade ou inerte.

Na Figura 55, é possível avaliar o efeito da variação da expansão unidimensional pelo tempo das misturas solo-cal-PET considerando os teores de PET (5%, 10%) e cal (0%, 2%, 4%, 6%).

Figura 55 - Variação da expansão unidimensional pelo tempo das misturas solo-cal-PET



Comparando os teores de PET (5%, 10%) e cal (0%, 2%, 4%, 6%) na variação da expansão unidimensional pelo tempo, tem-se que as misturas solo-cal-PET com teores de 6% cal e 5% apresentam os melhores desempenhos, pois reduzem as expansões verticais a valores próximos de 0%.

Do ponto de vista de desempenho, as misturas solo-cal-PET com teores de 6% cal e 10% PET, 4% cal e 10% PET, 4% cal e 5% PET, 2% cal e 10% PET apresentam comportamentos

similares a mistura solo-cal-PET com teores de 6% cal e 5%, pois apresentam expansões inferiores a 0,75%.

4.1.4. Efeito da porosidade

No intuito de avaliar o efeito da porosidade nas misturas, as Tabelas 20 e 21 apresentam os dados dos corpos de prova moldados para os ensaios de expansão unidimensional com sobrecarga de 10 kPa para a mistura solo-cal-PET. Observou-se que esses parâmetros cumprem as condições mínimas para as variáveis de controle. A partir desse ensaio, foi possível avaliar a relação entre a expansão vertical pela porosidade para teores de 5% e 10% de PET.

Tabela 19 - Características dos corpos de prova de solo-PET e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical para diferentes teores de cal e 5% PET

Identificação	Teor de solo	Teor de cal	Teor de PET	Porosidade	Expansão vertical
S95L0P5	95%	0%	5%	42,14%	6,95%
S95L0P5	95%	0%	5%	45,03%	4,70%
S95L0P5	95%	0%	5%	44,60%	3,70%
S95L0P5	95%	0%	5%	38,27%	5,90%
S95L0P5	95%	0%	5%	41,23%	6,95%
S95L0P5	95%	0%	5%	36,96%	7,00%
S95L0P5	95%	0%	5%	37,23%	7,00%
S95L0P5	95%	0%	5%	37,01%	7,00%
S95L2P5	95%	2%	5%	45,61%	1,10%
S95L2P5	95%	2%	5%	45,32%	0,95%
S95L2P5	95%	2%	5%	41,65%	1,50%
S95L2P5	95%	2%	5%	41,51%	1,45%
S95L2P5	95%	2%	5%	41,48%	1,60%
S95L2P5	95%	2%	5%	37,27%	1,65%
S95L2P5	95%	2%	5%	36,78%	1,75%
S95L4P5	95%	4%	5%	44,98%	0,60%
S95L4P5	95%	4%	5%	44,73%	0,50%
S95L4P5	95%	4%	5%	41,04%	0,70%

S95L4P5	95%	4%	5%	40,34%	0,80%
S95L4P5	95%	4%	5%	40,95%	0,75%
S95L4P5	95%	4%	5%	37,09%	0,90%
S95L4P5	95%	4%	5%	36,56%	1,20%
S95L6P5	95%	6%	5%	45,23%	0,07%
S95L6P5	95%	6%	5%	45,41%	0,05%
S95L6P5	95%	6%	5%	41,47%	0,15%
S95L6P5	95%	6%	5%	41,36%	0,30%
S95L6P5	95%	6%	5%	40,57%	0,20%
S95L6P5	95%	6%	5%	37,08%	0,40%
S95L6P5	95%	6%	5%	35,36%	0,70%

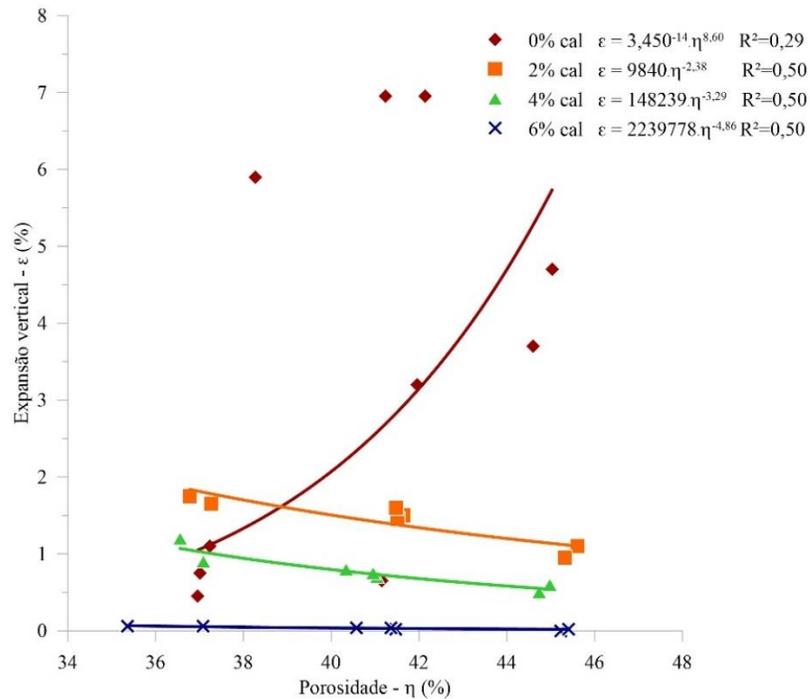
Tabela 20 - Características dos corpos de prova de solo-PET e solo-cal-PET e resultado da expansão vertical para diferentes teores de cal e 10% PET

Identificação	Teor de solo	Teor de cal	Teor de PET	Porosidade	Expansão vertical
S90L0P5	90%	0%	10%	44,52%	2,25%
S90L0P5	90%	0%	10%	44,66%	2,80%
S90L0P5	90%	0%	10%	45,28%	2,55%
S90L0P5	90%	0%	10%	45,51%	1,25%
S90L0P5	90%	0%	10%	40,55%	3,90%
S90L0P5	90%	0%	10%	41,39%	4,80%
S90L0P5	90%	0%	10%	40,76%	3,40%
S90L0P5	90%	0%	10%	37,03%	5,95%
S90L0P5	90%	0%	10%	37,09%	5,55%
S90L0P5	90%	0%	10%	36,76%	6,00%
S90L2P5	90%	2%	10%	45,99%	0,80%
S90L2P5	90%	2%	10%	41,18%	0,78%
S90L2P5	90%	2%	10%	40,73%	0,55%
S90L2P5	90%	2%	10%	40,77%	0,90%

S90L2P5	90%	2%	10%	40,95%	0,95%
S90L2P5	90%	2%	10%	37,66%	0,70%
S90L2P5	90%	2%	10%	37,71%	1,05%
S90L2P5	90%	2%	10%	35,93%	0,95%
S90L2P5	90%	2%	10%	36,30%	0,75%
S90L4P5	90%	4%	10%	45,23%	0,25%
S90L4P5	90%	4%	10%	45,36%	0,30%
S90L4P5	90%	4%	10%	45,30%	0,15%
S90L4P5	90%	4%	10%	41,41%	0,50%
S90L4P5	90%	4%	10%	37,37%	0,25%
S90L4P5	90%	4%	10%	37,31%	0,35%
S90L6P5	90%	6%	10%	42,55%	0,25%
S90L6P5	90%	6%	10%	45,17%	0,20%
S90L6P5	90%	6%	10%	38,36%	0,40%
S90L6P5	90%	6%	10%	38,27%	0,30%
S90L6P5	90%	6%	10%	41,01%	0,45%
S90L6P5	90%	6%	10%	34,75%	0,25%
S90L6P5	90%	6%	10%	34,44%	0,45%

A Figura 56 expressa os resultados de expansão vertical em função da porosidade das misturas para 5% de PET. Cada curva, ajustada para uma linha de tendência de potência, representa as amostras com a mesma quantidade de cal. Os valores mais elevados de expansão foram verificados para as amostras das misturas solo-PET, sem a presença de cal, com variações entre 7% para menores porosidades e 5% para maiores porosidades. Para os teores de 2% e 4% de cal, as variações da expansão não são significativas, apesar do aumento da porosidade, tendo valores médios de 2% e 1% respectivamente. No caso do teor de 6% de cal, a expansão para a menor porosidade é cerca de 1%, e tende a zero com o aumento da porosidade.

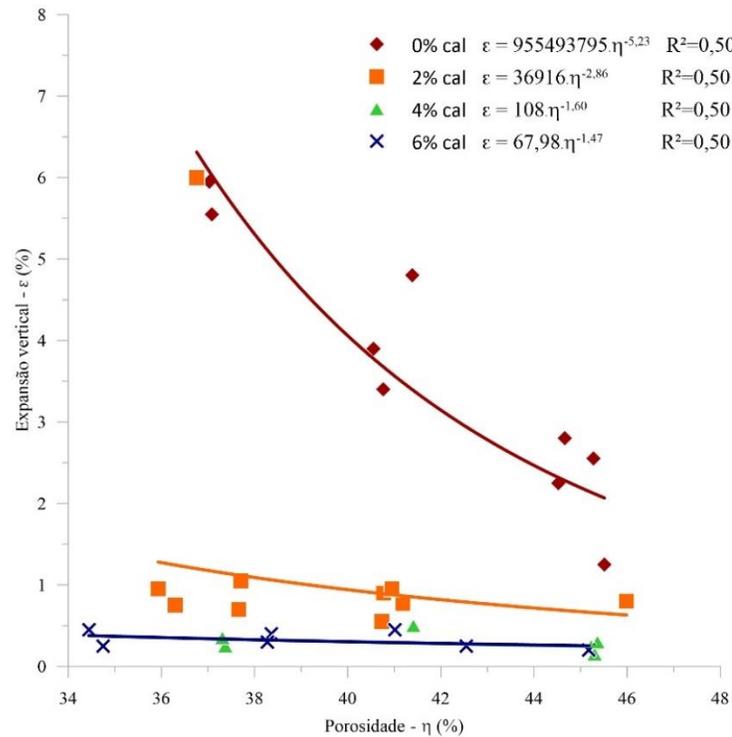
Figura 56 - Variação da expansão vertical (ε) pela porosidade (η) para 5% de PET



A Figura 57 expressa os resultados de expansão vertical em função da porosidade das misturas para 10% de PET. De modo análogo ao teor de 5% de PET, cada curva, ajustada para uma linha de tendência de potência, representa as amostras com a mesma quantidade de cal. No teor de 10% de PET, os valores mais elevados de expansão também foram verificados para as amostras das misturas solo-PET, sem a presença de cal, mas com variações expressivas entre 7% para menores porosidades e 2% para maiores porosidades. Para o teor de 2% de cal, não há variações volumétricas, apesar do aumento da porosidade. Nessa situação, a expansão unidimensional das misturas permanece constantes e em torno de 1%. No caso dos teores de 4% e 6% de cal, as curvas de expansões são sobrepostas, constantes e com valores abaixo de 0,5% independentemente da porosidade.

Destaca-se que, para Pereira (2004), um solo é considerado expansivo quando apresenta variação de volume superior a 1% e essa expansão é ocasionada apenas pela alteração da umidade, sem qualquer variação nas cargas aplicadas.

Figura 57 - Variação da expansão vertical (ε) pela porosidade (η) (10% de PET)



De modo geral, a variação do teor de PET de 5% para 10% nas misturas solo-cal-PET possibilitou obter valores de expansões inferiores a 2% e 1% respectivamente. Já pela adição de cal, como nos estudos de Silvani *et al.* (2020) e Consoli *et al.* (2020), observa-se que a expansão diminui à proporção que a porosidade aumenta. Como uma maior compactação acarreta uma menor porosidade, pois a quantidade de vazios entre as partículas diminui, o volume disponível para rearranjo das partículas também diminui. Dessa forma, a massa de solo que, sob pressão interna, exibe uma maior compactação, tende a apresentar acréscimo de volume para o mesmo teor de cal.

4.1.5. Efeito do coeficiente η/L_{iv}

Na finalidade de avaliar o efeito da porosidade (η) /teor volumétrico de aditivo (L_{iv}), as Tabelas 22 e 23 apresentam os dados dos corpos de prova moldados para os ensaios de expansão unidimensional com sobrecarga de 10 kPa para a mistura solo-cal-PET. Observou-se que esses parâmetros cumprem as condições mínimas para as variáveis de controle. A partir desse ensaio, foi possível avaliar a relação entre a expansão vertical pelo parâmetro η/L_{iv} para teores de 5% e 10% de PET.

Tabela 21 - Características dos corpos de prova de solo-cal-PET e resultado da expansão vertical

para diferentes teores de cal e 5% PET

Identificação	Teor de solo	Teor de cal	Teor de PET	η/L_{iv}	Expansão vertical
S95L2P5	95%	2%	5%	39,78%	1,10%
S95L2P5	95%	2%	5%	39,29%	0,90%
S95L2P5	95%	2%	5%	39,32%	0,95%
S95L2P5	95%	2%	5%	33,87%	1,50%
S95L2P5	95%	2%	5%	33,66%	1,45%
S95L2P5	95%	2%	5%	33,62%	1,60%
S95L2P5	95%	2%	5%	28,19%	1,65%
S95L2P5	95%	2%	5%	27,60%	1,75%
S95L2P5	95%	2%	5%	27,39%	1,70%
S95L4P5	95%	4%	5%	19,77%	0,60%
S95L4P5	95%	4%	5%	19,58%	0,50%
S95L4P5	95%	4%	5%	16,84%	0,70%
S95L4P5	95%	4%	5%	16,36%	0,80%
S95L4P5	95%	4%	5%	16,77%	0,75%
S95L4P5	95%	4%	5%	14,26%	0,90%
S95L4P5	95%	4%	5%	13,94%	1,20%
S95L6P5	95%	6%	5%	13,57%	0,07%
S95L6P5	95%	6%	5%	13,67%	0,05%
S95L6P5	95%	6%	5%	11,64%	0,15%
S95L6P5	95%	6%	5%	11,59%	0,30%
S95L6P5	95%	6%	5%	11,22%	0,20%
S95L6P5	95%	6%	5%	9,69%	0,15%
S95L6P5	95%	6%	5%	8,99%	0,70%

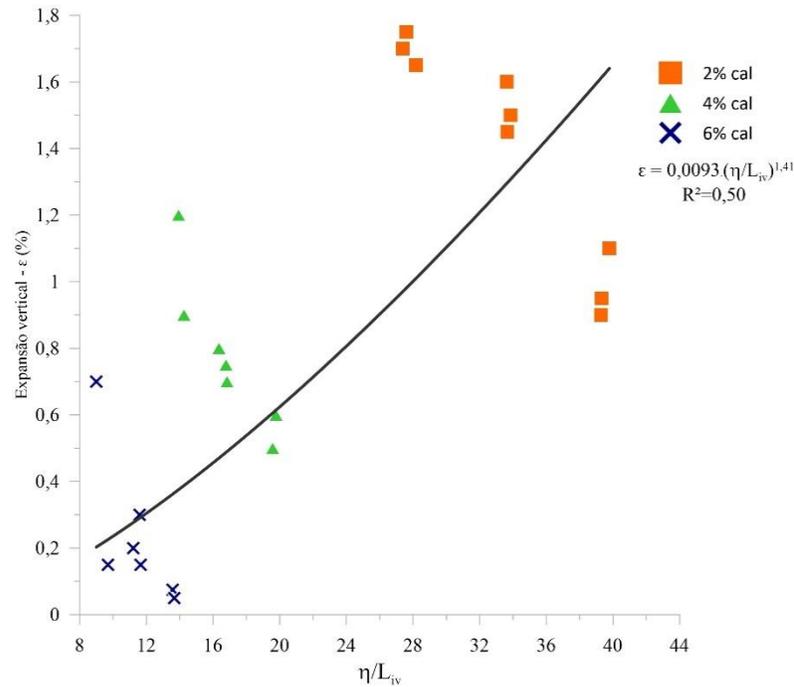
Tabela 22 - Características dos corpos de prova de solo-cal-PET e resultado da expansão vertical

para diferentes teores de cal e 10% PET

Identificação	Teor de solo	Teor de cal	Teor de PET	η/L_{iv}	Expansão vertical
S90L2P10	90%	2%	10%	40,39%	0,80%
S90L2P10	90%	2%	10%	33,22%	0,78%
S90L2P10	90%	2%	10%	32,60%	0,55%
S90L2P10	90%	2%	10%	32,66%	0,90%
S90L2P10	90%	2%	10%	32,90%	0,95%
S90L2P10	90%	2%	10%	28,66%	0,70%
S90L2P10	90%	2%	10%	28,72%	1,05%
S90L2P10	90%	2%	10%	26,61%	0,95%
S90L2P10	90%	2%	10%	27,04%	0,75%
S90L4P10	90%	4%	10%	19,97%	0,25%
S90L4P10	90%	4%	10%	20,08%	0,30%
S90L4P10	90%	4%	10%	20,03%	0,15%
S90L4P10	90%	4%	10%	17,09%	0,50%
S90L4P10	90%	4%	10%	14,43%	0,25%
S90L4P10	90%	4%	10%	14,39%	0,35%
S90L6P10	90%	6%	10%	12,17%	0,25%
S90L6P10	90%	6%	10%	13,54%	0,20%
S90L6P10	90%	6%	10%	10,23%	0,40%
S90L6P10	90%	6%	10%	10,19%	0,30%
S90L6P10	90%	6%	10%	11,43%	0,45%
S90L6P10	90%	6%	10%	8,75%	0,25%
S90L6P10	90%	6%	10%	8,63%	0,45%

A Figura 58 apresenta a relação entre a expansão vertical e o parâmetro η/L_{iv} para 5% de PET. A curva disposta, ajustada para uma linha de tendência de potência, representa as misturas com a mesma quantidade de PET, mas com variação do teor de cal (2%, 4%, 6%).

Figura 58 - Variação da expansão vertical pelo parâmetro η/L_{iv} (5% PET)



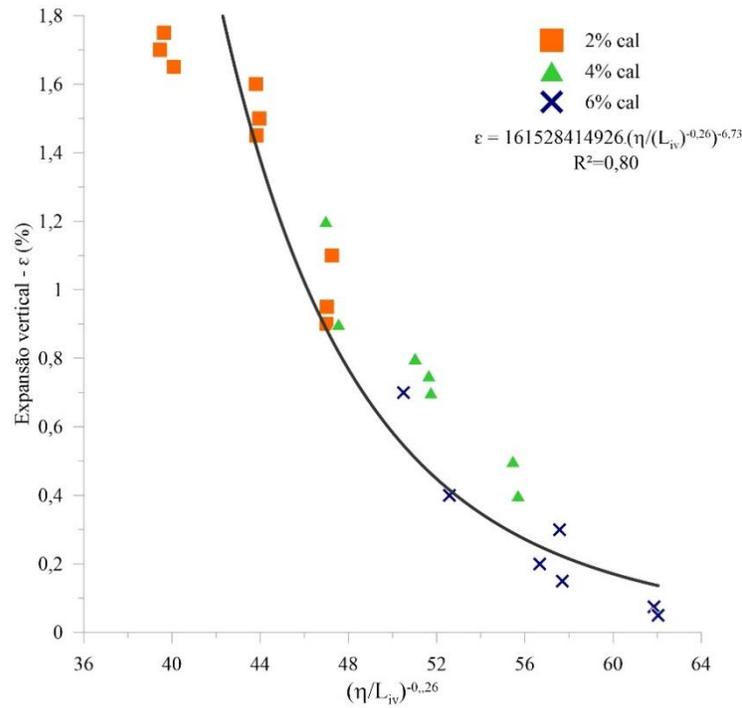
Considerando o teor de 5% de PET, observa-se que, para o mesmo valor do parâmetro η/L_{iv} , é possível obter diferentes valores de expansões verticais. Além do mais, para o mesmo teor de cal, há uma tendência de redução da expansão conforme aumenta a porosidade, mas também uma redução expressiva da expansão com o aumento do teor de cal.

Apesar do ajuste pela linha de tendência de potência, a relação entre as variáveis não é satisfatória, o que dificulta a correlação entre a expansão vertical e o parâmetro η/L_{iv} sem segregação por teor de cal adicionado.

Na tentativa de relacionar a expansão vertical e o parâmetro η/L_{iv} , através da obtenção de uma curva única, utilizou-se um coeficiente de ajuste exponencial de valor -0,26. O sinal negativo deve-se aos efeitos positivos exercidos por L e η , ou seja, a expansão tende a diminuir conforme a porosidade e o teor de cal tendem a aumentar. Destaca-se que este expoente foi o mesmo utilizado por Silvani *et al.* (2020) e Tenório (2019) para a mistura solo expansivo/cal.

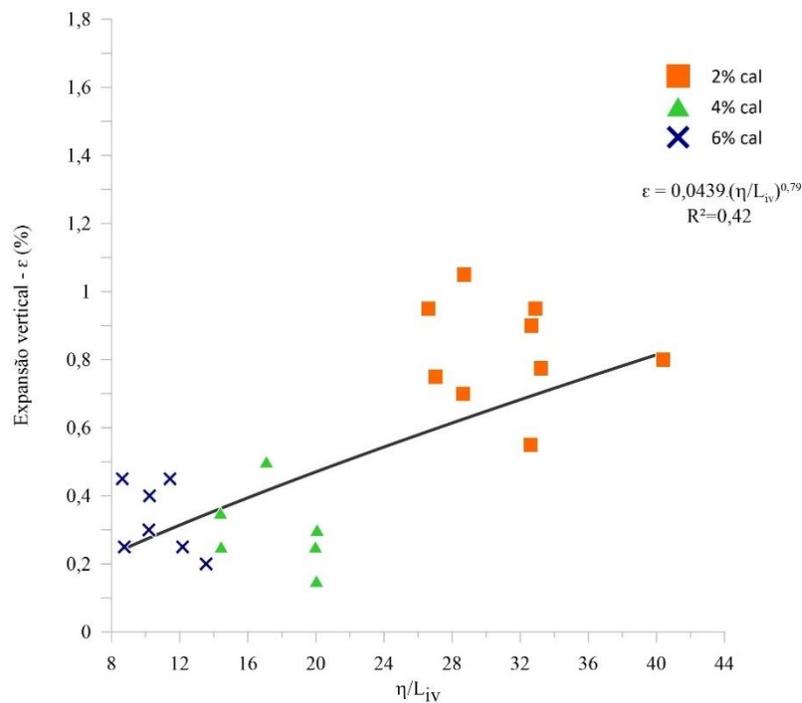
A Figura 59 ilustra a aproximação dos pontos de mesmo valor de expansão vertical a partir do ajuste exponencial.

Figura 59 - Variação da expansão vertical pelo parâmetro $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ para 5% de PET



A Figura 60 apresenta a relação entre a expansão vertical e o parâmetro η/L_{iv} para 10% de PET. A curva disposta, ajustada para uma linha de tendência de potência, representa as misturas com a mesma quantidade de PET, mas com variação do teor de cal (2%, 4%, 6%).

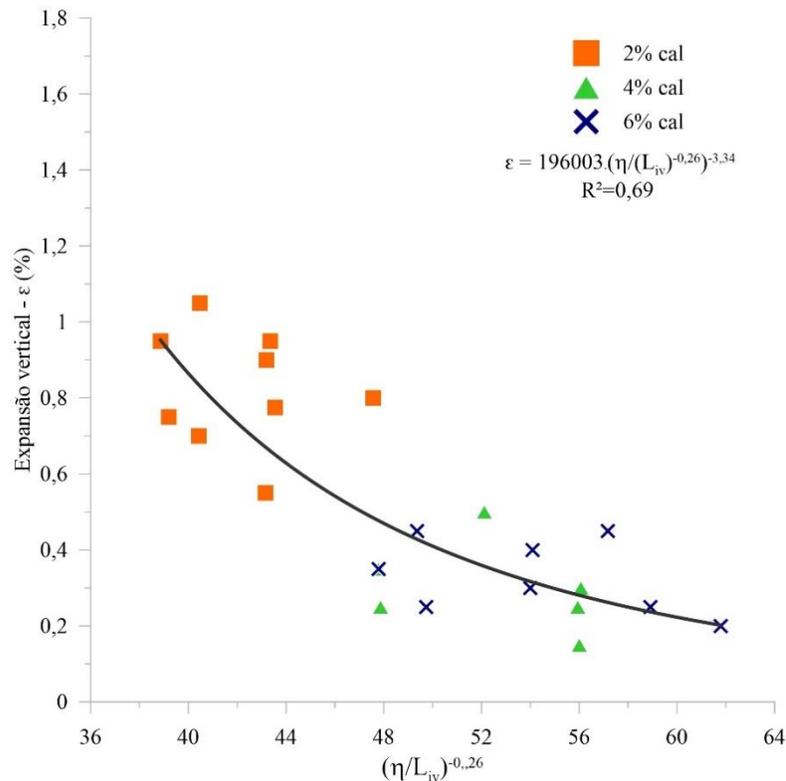
Figura 60 - Variação da expansão vertical pelo parâmetro η/L_{iv} (10% PET)



Considerando o teor de 10% de PET, observa-se que, assim como no teor de 5% de PET, para o mesmo valor do parâmetro η/L_{iv} , é possível obter diferentes valores de expansões verticais. É válido também que, para o mesmo teor de cal, há uma tendência de redução da expansão conforme aumenta a porosidade, mas também uma redução expressiva da expansão com o aumento do teor de cal.

Sabendo que a relação entre as variáveis não é satisfatória e na tentativa de obtenção de uma curva única que relacione a expansão vertical e o parâmetro η/L_{iv} , utilizou-se um coeficiente de ajuste exponencial de valor -0,26. Isso possibilitou a aproximação dos pontos de mesmo valor de expansão vertical conforme verifica-se na Figura 61.

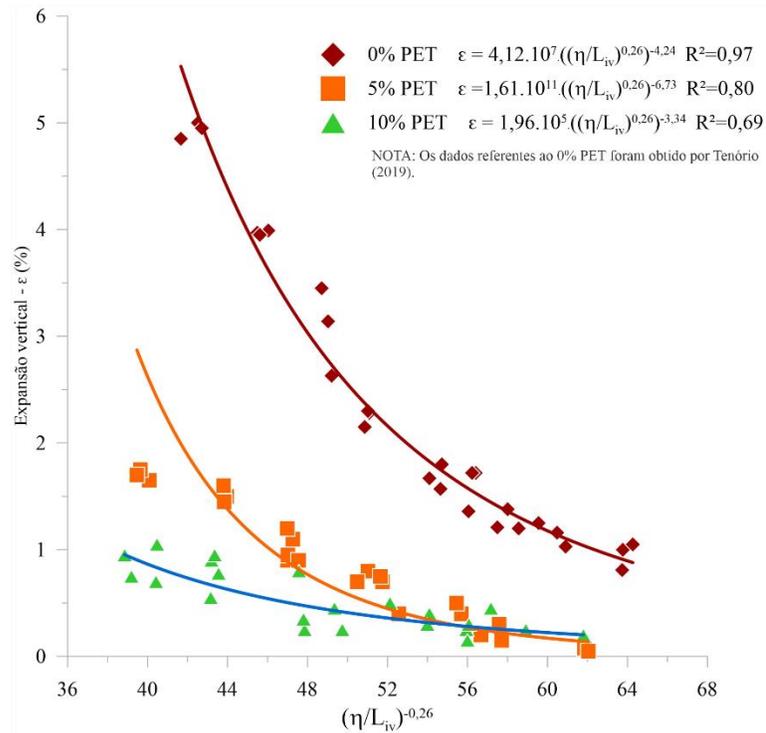
Figura 61 - Variação da expansão vertical pelo parâmetro $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ para 10% de PET



Para efeito comparativo, a Figura 62 retrata a expansão vertical pelo parâmetro $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ para os teores de 5% e 10% de PET, além do teor de 0% PET obtido por Tenório (2019).

Figura 62 – Comparação da variação da expansão vertical pelo parâmetro $\eta/(L_{iv})^{-0,26}$ para os

teores de 0%, 5% e 10% de PET



Verifica-se que, pela a adição de teores de 5% e 10% de PET, as curvas apresentam comportamentos similares, porém a expansão vertical para o teor de 5% de PET e 2% de cal, considerando o mesmo valor do parâmetro η/L_{iv} , apresentam valores mais altos quando comparados ao teor de 10% de PET. Tomando como referência os teores de 4% e 6% de cal, as curvas confundem-se, confirmando que, a partir daí, a expansão vertical não depende diretamente da adição de 5% e 10% de PET, tampouco do parâmetro η/L_{iv} . Porém, destaca-se que se tratam de expansões abaixo de 1%.

Para efeito de comparação, os valores obtidos para as misturas solo-cal-PET foram satisfatórios se comparados com os valores obtidos por Tenório (2019) quando avaliou o controle da expansão do mesmo solo com resíduos de mármore e cal (separadamente). Para os mesmos teores de cal (0%, 2%, 4%, 6%), observou-se um melhor desempenho das misturas, considerando a relação entre a expansão vertical e os demais parâmetros (teor de cal, porosidade, η/L_{iv}), pela adição de 5% e 10% de PET do que pela adição de 30%, 40% e 50% de resíduo de mármore. Isso significa que, com uma menor quantidade de PET pós-consumo, obtém-se valores de expansão inferiores que todos os teores de adição de mármore, confirmando a aplicabilidade geotécnica desse

material.

Assim, os resultados dispostos nesta seção corroboram para a viabilidade da metodologia porosidade/teor volumétrico de aditivo para avaliar a expansão de solos expansivos estabilizados com cal e PET. O comportamento do solo estabilizado com PET também se mostrou satisfatório no controle da expansão unidimensional. Todavia, pelas características físico-químicas do PET, aparenta atuar como um estabilizante inerte e não químico.

5. CONCLUSÕES

Reitera-se, na conclusão deste estudo que, solos com variação volumétrica sob ação da umidade, são considerados problemáticos do ponto de vista da engenharia, acarretando danos e custos de reparação expressivos em diversas construções, desde estruturas leves até pavimentos de rodovias. Para minimizar os efeitos adversos, várias técnicas podem ser consideradas, por exemplo, a substituição por material não expansivo, a estabilização do solo ou a combinação de ambas as técnicas.

Paralelamente, observou-se que, há deposição de grandes quantidades de resíduos sólidos plásticos, especialmente, de garrafas de tereftalato de polietileno (PET) pós-consumo. Uma vez que o ritmo de consumo não acompanha o ritmo de coleta, processamento e reciclagem desses materiais, problemas ambientais graves têm sido observados. Como o PET reciclado oferece benefícios sustentáveis, aplica-lo em obras de engenharia favorece o uso racional os recursos, reduzindo a poluição ambiental.

Na tentativa de propor soluções eficientes e sustentáveis para problemas relacionados a presença de solos expansivos e ao descarte inadequado de PET, este estudo apresenta resultados positivos a saber:

- Os solos estabilizados com cal apresentaram melhorias significativas no controle da expansão, reduzindo a variação volumétrica das misturas à medida que se aumenta o teor de cal e a porosidade. Essa diminuição da expansão é atribuída a agregação ou floculação das partículas originais promovida pela adição da cal, processo similar ao que acontece na hidratação do cimento Portland para as misturas solo-cimento. De modo geral, a adição de cal ao solo expansivo favorece o desenvolvimento de reações de trocas catiônicas, onde íons cálcio (Ca^{2+}) são liberados na solução, promovendo trocas catiônicas de íons sódio (Na^+) por (Ca^{2+}) e redução da camada de água adsorvida. Esse fenômeno favorece a floculação e, conseqüentemente, a redução do potencial de expansão do solo. Nesse sentido, a cal atua como estabilizante químico no processo de estabilização. Como não ocorreu tempo de cura para os corpos de prova das misturas, não foram verificados os efeitos da cimentação química do solo pela adição da cal, processo progressivo e lento que favorece o aumento da resistência mecânica.
- Com relação aos solos estabilizados com PET, observaram-se reduções nas expansões volumétricas conforme aumentava-se seu teor nas dosagens das amostras. As melhorias

observadas devem-se as substituições de material expansivo por material inerte, já que provavelmente, não ocorreram reações a curto ou longo prazo pela inserção desse aditivo ao solo. Além disso, as propriedades físico-químicas do PET permanecem inalteradas para as condições laboratoriais, impossibilitando interações com o solo. Nesse sentido, o PET atua como estabilizante granulométrico no processo de estabilização.

- As misturas de solo-cal-PET apresentaram resultados satisfatórios com relação a expansão vertical quando comparadas com as amostras de solo puro e solo-cal obtidas por Tenório (2019). Ao contrapor os solos estabilizados com cal e com PET, observou-se que a cal estimula uma redução expressiva e eficaz no controle da expansão unidimensional. Para os teores de cal, as amostras com percentual de 6%, valor corresponde ao ICL da mistura solo-cal, verificou-se os melhores desempenhos na estabilização, com expansões inferiores a 1% para todos os pesos específicos secos e teores de PET avaliados. Para os teores de PET, as amostras das misturas que não continham cal, apresentaram as maiores expansões, com valores crescentes à medida que se aumenta o peso específico. Com a adição de 2%, 4% e 6% de cal, verificou-se que não há variações significativas pela mudança no teor de PET de 5% para 10%, uma vez que os valores de expansões vertical são aproximados. Assim, a variação do percentual de adição de PET influencia principalmente nas misturas solo-PET.
- A aplicabilidade da metodologia porosidade/teor volumétrico de aditivo para previsão da expansão mostrou-se eficaz e viável para solos estabilizados com cal e PET, estabelecendo uma correlação única entre a expansão vertical de amostras distintas com o parâmetro η/Liv ajustado. O coeficiente exponencial de ajuste de -0,26, definido pelas características do solo, serve para otimizar a influência no aumento da porosidade e teor de cal.

Portanto, do ponto de vista da engenharia geotécnica, a avaliação positiva do desempenho de um solo estabilizado com cal e PET, propicia ao engenheiro uma tomada de decisão no que se refere ao teor de cal, teor de PET, energia de compactação de forma a obter uma mistura solo-cal-PET com variação volumétrica dentro dos limites aceitáveis para projeto e com custo ideal para execução.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Nesta seção, são propostos alguns temas para futuras pesquisas, fruto do estudo e das dificuldades encontradas no decorrer desta pesquisa:

- Avaliar o efeito da adição de PET na tensão de expansão para misturas solo-cal-PET;

- Verificar a correlação entre o parâmetro porosidade/teor volumétrico de aditivo e a tensão de expansão para a mistura solo-cal-PET;
- Avaliar o desempenho de um solo a partir da estabilização com materiais alternativos (scheelita, calcários calcítico e dolomítico, resíduos industriais) quando comparados aos estabilizantes convencionais (cal e cimento);
- Avaliar o comportamento mecânico para as misturas solo-cal-PET considerando o tempo de cura.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET – ABIPET (2014). São Paulo. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET – ABIPET (2014). São Paulo. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO – ABIPLAST. Indústria Brasileira de Transformação e Reciclagem de Material Plástico. São Paulo. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO – ABIPLAST. Indústria Brasileira de Transformação e Reciclagem de Material Plástico. São Paulo. 2019.
- ABREU, D. G.; JEFFERSON, I. Why is sustainability important in Geotechnical Engineering? **Geocongress: Geosustainability and Geohazard Mitigation**, [S. l.], p. 821-828. 2021.
- AFÈS, M.; DIDIER, G. Stabilization of expansive soils: The case of clay in the area of Mila (Algeria). **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. 59. 75-83. 2000.
- AKINYELE, J. O.; IGBA, U. T.; ADIGUN, B. Effect of waste PET on the structural properties of burnt bricks. **Materials Science**. 2020.
- AKINWUMI, I. I.; BOOTH, C. A. Experimental insights of using waste marble fines to modify the geotechnical properties of a lateritic soil. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v. 23, n. 2, p. 121-128. 2015.
- ANGELIM, R. R. Influência do procedimento de mistura da cal hidratada ao solo no comportamento do solo estabilizado para fins de pavimentação rodoviária. **In: II Simpósio sobre solos tropicais e processos erosivos no centro-oeste**. Goiânia, 2005.
- ASGARI, M. R.; DEZFULI, A. B.; BAYAT, M. Estudo experimental da estabilização de um solo argiloso de baixa plasticidade com cimento / cal. **Árabe. J. Geosci**, 8 (3): 1439–1452. 2015.
- ATAÍDE, S. O. F. Análise o comportamento de variação de volume devido à inundação de um solo expansivo quando misturado com areia. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. 117 p. Recife – PE, 2017.
- AYALA, C.; J, F.; GIJON, M. F.; MOZO, C.O.; RODRIGUEZ, J. L. S. Mapa predictor de riesgos por expansividad de argillas en España a Escala 1:1.000.000, In: Geologia Ambiental. Instituto Geologico y Minero de España, Centro de Estudios y Experimentacion de Obras Publicas, España, Madrid, 1986.
- AZEVEDO, A. L. C. Estabilização de solos com adição de cal – um estudo sobre a reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal. Dissertação Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

BARBOSA, V. Estudo do Comportamento Geotécnico de um Solo Argiloso de Cabrobó, Potencialmente Expansivo, Estabilizado com Cal. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco. Pernambuco, 2013.

BASTOS, E. G. Variação volumétrica de uma argila expansiva do litoral de Pernambuco. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1994.

BIRON, M. A Practical Guide to Plastics Sustainability: Concept, Solutions, and Implementation. 2020.

BISHOP, A. W. The principle of effective stress. *Tecknish Ukeblad* 106, p. 859-863. 1959.

BRITO, G. Q. Desempenho de Mistura Asfáltica do Tipo Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ) com a Inserção de PET (Polietileno Tereftalato) Micronizado. Dissertação de Mestrado. Publicação G.DM-350/2020. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 69 p. 2020.

CANEVAROLO JR, S. V. Técnicas de Caracterização de Polímeros. 2ª edição., São Paulo: Artliber, 2007.

CARNEIRO, A. A. Comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro estabilizado com polímero e do compósito rejeito-polímero reforçado com fibras de polipropileno Tese de Doutorado, Publicação G.DM- 162/20 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 146p. 2020.

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

CARVALHO, B.; CASAGRANDE, M.; FARIAS, M. Evaluation of resilient behavior of a clayey soil with polyethylene terephthalate (PET) insertion for application in pavements base. *E3S Web of Conferences*. 2019.

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

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

CHEN, F. H. *Foundation on Expansive Soils*, Amsterdam: Elsevier, 275 - 463 p. 1975.

CHENG, H.; LIU, Q.; YANG, J.; MA, S.; FROST, R. L. The thermal behavior of kaolinite intercalation complexes – A review. *Thermochimica Acta*, v. 545, p. 1-13, 2012.

CHENG-GANG, B. et al. Properties of unsaturated soils and slope stability of expansive soil.

Proceedings of the Second International Conference on Unsaturated Soils, Vol. 2, p. 71, China, 1998.

CONSOLI N. C., ROSA, A. D., CORTE, M. B., LOPES JÚNIOR, L. S. L., CONSOLI, B. S. Porosity-Cement Ratio Controlling Strength of Artificially Cemented Clays, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (8), 1249-1254, 2011.

CONSOLI, N.C.; LOPES JUNIOR, L. S.; CONSOLI, B. S.; FESTUGATO, L. Mohr-Coulomb failure envelopes of lime-treated soils. *Geotechnique*, v. 64, p. 165-170, 2014.

CONSOLI N. C.; QUIÑONEZ R.A.; VILLALBA, N. M. K. Durability, strength and stiffness of dispersive clay-lime blends. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, n. 11, 2016.

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

CONSOLI, N. C., LOPES JUNIOR, L. S., FOPPA, D., HEINECK, K. S. Key Parameters Dictating Strength of Lime/Cement-Treated Soils, *Geotechnical Engineering*, 162 (2), 111-118, 2009.

CONSOLI, N. C.; ARAUJO, M. T.; FERRAZZO, S. T.; LIMA, V.; ROCHA, C. G. Increasing Density and Cement Content in Expansive Soils Stabilization: Conflicting or Complementary Procedures for Reducing Swelling?. *CANADIAN GEOTECHNICAL JOURNAL*, v. 57, p. 1-17, 2020.

CONSOLI, N. C.; QUIÑONEZ, R. A.; MARQUES, S. F. V.; VENSON, G. I.; PASCHE, E.; VELÁSQUEZ, L. E. G. Single model establishing strength of dispersive clay treated with distinct binders. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 53, n. 12, 2016.

COSTA N. A. J.; CRAIZER W. Micro-ancoragens e Fundações em solos Expansivos. 1º Seminário de mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Salvador. pp 16– 192p, 1978.

CRISTELO, N. M. C. Estabilidade de solos residuais graníticos através da adição de cal. Dissertação (Mestrado) Universidade de Minho, Portugal, 2001.

DANG, L. C.; KHABBAZ, H.; NI, B. Improving engineering characteristics of expansive soils using industry waste as a sustainable application for reuse of bagasse ash, *Transportation Geotechnics*, volume 31, 2021.

DE LAMBALLERIE, G. N. Contribution a l'étude des phénomènes de gonflement accompagnata l'hydratation des argiles compactes. Toulouse. 140p. 1962.

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

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

- DIAZ, F. R.; SANTOS, P. S. Estudos sobre ativação ácida de argilas esméticas brasileiras. *Química Nova*, 24 , 345-353, 2001.
- EADES, J. L.; GRIM, R. E. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. Highway Research Board, Washington, D. C.; n.139, p.61- 72, 1966.
- ELKADY, T.; AL-MAHBASHI, A.; ALREFEAI, T. Stress-Dependent Soil-Water Characteristic Curves of Lime-Treated Expansive Clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2015.
- ESLINGER, E.; PEVEAR, D. R. Clay minerals for petroleum geologists and engineers. 1988.
- ESTABRAGH, A. R; PARSAEI, B.; JAVADI, A. A. Laboratory investigation of the effect of cyclic wetting and drying on the behaviour of an expansive soil. *Soils and Foundations*, vol 55, pages 304-314, 2015.
- FERREIRA, S. R. M. Colapso e Expansão em Solos Naturais devido a Inundação. Tese (Doutorado da Universidade Federal do Rio de Janeiro). 379p. Rio de Janeiro, 1995.
- FERREIRA, S. R. M. et al. Estabilização de Solos Expansivos de Cabrobó, Paulista e Suape /PE com Cal. XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Anais, p.264. Porto de Galinhas/PE, 2012.
- FERREIRA, S. R. M.; PAIVA, S. C.; MORAIS, J. J. O.; VIANA, R. B. Avaliação da expansão de um solo do município de Paulista-PE melhorado com cal. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v. 22, supl. 1, e 11930, 2017.
- FOPPA, D. Análise de Variáveis-Chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de PósGraduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.
- FRANÇA, F. C. Estabilização química de solos para fins rodoviários: estudo de caso com o produto “RBI Grade 81”. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2003.
- FRAZÃO, E. B.; GOULART, E. P. Aspectos da expansibilidade de argilo-minerais: Algumas Implicações em Obras Cívicas. In: 1º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, ABGE, São Paulo, Tema 11, 2: 351-36, 1976.
- FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress State Variables for Unsaturated Soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103, 447-446, 1977.
- FREDLUND, D.G., RAHARDJO, H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, 1993.
- GARCIA, N. F., VALDES, J. R. & CORTES, D. D. Strength characteristics of polymer-bonded sands. *Géotechnique Letters*, 5(3), 212–216. 2015.

- GHABCHI, R.; DHARMARATHNA, C. P.; MIHANDOUST, M. Feasibility of using micronized recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as an asphalt binder additive: A laboratory study. *Construction and Building Materials*, Volume 292, 2021.
- GILLOTT, J. E. *Clay in engineering geology*. Amsterdam ; New York : Elsevier: New York, NY, U.S.A, 1987.
- GIRALDI, A. L. F. M. *Compositos híbridos de poli (tereftalato de etileno) (PET) / fibra de vidro (FV) / modificador de impacto (E-MA-GMA)*. 109 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP. 2008.
- GOMES, C.F. *Argilas. O que são e para que servem*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1986, 457p.
- GORNI, A. A. *Introdução aos Plásticos*. Revista plástico industrial, 2003.
- GRIM, R. E. *Applied Clay Mineralogy*, McGraw Hill, New York, NY, 1962.
- GRIM, R. E. *Clay mineralogy*. 2nd edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.
- GRIM, R. E. *Clay mineralogy*: McGraw-Hill Book Co., Inc., 384 pp. 1953.
- HAMILTON, J. J. Effects of environment on the performance of shallow foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 65-80, 1969.
- HANNAWI, K.; KAMALI-BERNARD, S.; PRINCE, W. Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste Management*, 30 (11), 2312–2320, 2010.
- HOLT, D. G. A.; JEFFERSON, I.; BRAITHWAITE, P. A.; CHAPMAN, D. N. Sustainable geotechnical design. *GeoFlorida: Advances in Analysis, Modeling & Design*, 2925-2932, 2010.
- SILVA, J. A. H. Solos expansivos - Comportamento, identificação, quantificação da instabilidade volumétrica e projetos de fundações (Parte I). *Geotecnia*, nº 13, p. 29 – 63, 1975.
- HUAT, B. K. et al. Utilization of Alkali-Activated Olivine in Soil Stabilization and the Effect of Carbonation on Unconfined Compressive Strength and Microstructure. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 29, n. 6, p. 1–11, 2017.
- IKIZLER, B.; AYTEKIN, M.; TURKER; YAVUZ; Hİ. Effect of fibers on swelling characteristics of bentonite. 2009.
- ILYAS, R. A.; SAPUAN, S. M.; ISHAK, M. R.; ZAINUDIN, E. S. Development and characterization of sugar palm nanocrystalline cellulose reinforced sugar palm starch bionanocomposites. *Carbohydrate Polymers*, v. 202, p. 186–202, 2018.
- JEFFERIS, S.A. Moving towards sustainability in geotechnical engineering. *GeoCongress 2008: Geosustainability and Geohazards Mitigation*, 844-851, 2008.

- JOHANN, A. D. R. Metodologias para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação da Porosidade de um Solo Siltoso Tratado com Cal em Diferentes Tempos de Cura. Tese de Doutorado, 2013.
- JOHN, V. M.; PUNHAGUI, K. R. G.; CINCOTTO, M. A. Produção de cal em Economia de baixo carbono: avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnológicas, Ribeirão Preto-SP, 2014.
- JOHNSON, L.; SNETHEN, D. "Prediction of Potential Heave of Swelling Soil," *Geotechnical Testing Journal* 1, no. 3: 117-124, 1978.
- JONES, D. E.; JONES, K. A. Treating expansive soils. *Civil Engineering*, 57; 62-65, 1987.
- JONES, E. C.; HOLTZ, W. G. Expansive solos – The hidden desastre, *Civil Eng.* 8, 49–51, 1973.
- JUCÁ, J. F. T.; GUSMÃO FILHO, J. A.; SILVA, J. M. J. Laboratory and field tests on an expansive soil in Brazil. 7th International Conference on Expansive Soils-Dallas/Texas, Vol. 1, pp. 337-342, 1992.
- KLAMT, R. A.; RODRIGUES, R. E.; SULEIMAN, G. K. A.; BARONI, M. Verificação da Melhoria da RCS com Acréscimo de Cal, Cimento e Cinza da Casca de Arroz em um Solo Arenoso da Formação Botucatu. Anais, VII Seminário de Engenharia geotécnica do Rio Grande de Sul, Santa Maria, Maio. 65-73p, 2013.
- LAM, C.; JEFFERIS, S. A. Introduction to polymers and polymers fluids. *Polymer support fluids in civil engineering*. ICE publishing, Londres. Cap. 3. p. 29-53, 2018.
- LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. *Soil Mechanics*. SI Version, Wiley, New York, 1979.
- LARNACH, W. J. Relationship Between Dry Density, Voids/Cement Ratio and Strength of Soilcement Mixtures. *Civil Engineering and Public Works Reviews*. London: Lomax Erskine and Co., vol.55, n.648, p.903-905, 1960.
- LATIFI, N. et al. Tropical residual soil stabilization: A powder form material for increasing soil strength. *Construction and Building Materials*, v. 147, p. 827–836, 2017.
- LE ROUX, A. Classification des différentes textures de roches argileuses et marneuses en relation avec leur comportement. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch., spécial*, décembre 1976. p. 39-48, 1976.
- LIMA, D. C.; GARCIA, E. R.; CARVALHO, C. A. B.; BARBOSA, P. S. A.; SILVA, W. R. Uma proposta para a análise da resposta de misturas solo-cal a carregamento cíclicos: Aplicações em estradas. In: VI CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE FLORESTAS, SIF/UFV, 2000. Porto Seguro, BA. Anais, p.375-377. Porto Seguro, 2000.
- LIMA, M. A. A. Estudo do Comportamento Geotécnico de Uso de Solo Argiloso de Suape, Potencialmente Expansivo, Estabilizado com Cal. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. 2014.

- LIU, S., LU, Y., WENG, L., & BAI, F. Field Study of Treatment for Expansive Soil/rock Channel Slope with Soilbags”. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 43, No. 4, pp. 283-29, 2015.
- LOPES JUNIOR, L. S. Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007.
- LORENZETTI, C.; MANARESI, P.; BERTI, C.; BARBIROLI, G. Chemical recovery of useful chemicals from polyester (PET). *Waste for resource conservation: A survey of state of the art. Journal of Polymers and the Environment*, v. 14, n. 1, p. 98-101, 2006.
- LOUZADA, N. S. L.; MALKO, J. A. C.; CASAGRANDE, M. D. T. Behavior of Clayey Soil Reinforced with Polyethylene Terephthalate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 31, p. 04019218, 2019.
- MAHLER, C. F., Análise de obras assentes em solos colapsíveis e expansivos. Dissertação de D.SC. COPPE/UFRJ, Engenharia Civil, 1994.
- MARTINEZ, I. M. R.; LOUZADA, N. S. L.; REPSOLD, L. M. ; CASAGRANDE, M. D. T.; FOLLE, D. Study of Clayey Soil Reinforced with Fine Crushed Polyethylene Terephthalate (PET). *Revista de Engenharia Civil IMED*, v. 1, p. 10-14, 2014.
- MEDINA, J. Apostila de estabilização de solos – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1987.
- MITCHELL, J. K.; HOOPER, D. R. Influence of time between mixing and compaction on properties of a lime-stabilized expansive clay. *Highway Research Board Bulletin*, 304. 1961.
- MITCHELL, J. K. *Fundamentals of soil behavior*, 2nd Ed John Willey e sons, inc USA. P.437. 1973.
- MITCHELL, J. K. *Fundamentals of soil behavior*, 2nd Ed. John Willey e sons, inc New York. 422p. 1976.
- MITCHELL, J. K.; SOGA, K. *Fundamentals of Soil Behavior*. 3rd Edition, John Wiley & Sons, Hoboken. 2005.
- MOHAMED, R.; BEKHITI, M.; TROUZINE, H. Influence of waste tire rubber fibers on swelling behavior, unconfined compressive strength and ductility of cement stabilized bentonite clay soil. *Construction and Building Materials*, v. 208, p. 304-313, 2019.
- MONROY, R.; ZDRAVKOVIC, L.; RIDLEY, A. Mechanical behaviour of unsaturated expansive clay under K0 conditions. *Engineering Geology*. 197. 112-131, 2015.
- MOURA, G. J. Estabilização granulométrica de solo argiloso com inclusão de PET micronizado. 2020. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Sergipe, Aracaju, 2020.

- MUGGLER, C.; CARDOSO, I.; FONTES, M.; ABRAHÃO, W.; CARVALHO, A. Conteúdos básicos de geologia e pedologia. Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos. Viçosa, 2005.
- MURTHY, V. N. S. Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Marcel Dekker, Inc., 270 Madison Avenue, New York, 2003.
- NELSON, J. D.; MILLER, D. J. Expansive Soils – Problems and practice in foundation and pavement engineering. John Wiley & Sons, Inc., New York, 259p. 1992.
- NEVES, J. M. C. Estabilização de solos com cal – Estudo e aplicações rodoviárias. Dissertação (Mestrado) da Universidade Nova Lisboa, Lisboa, 1993.
- NÓBREGA, M. T. Estabilização Solo-Cal. Associação Brasileira dos Produtores de Cal. Boletim 13. São Paulo, 1981.
- NORRISH, K.; QUIRK, J. Crystalline Swelling of Montmorillonite: Use of Electrolytes to Control Swelling. *Nature* 173, 255–256, 1954.
- NUHFER, E. B.; PROCTOR, R. J.; MOSER, P. H. The Citizens' Guide to Geologic Hazards: A Guide to Understanding Geologic Hazards, Including Asbestos, Radon, Swelling Soils, Earthquakes, Volcanoes, Landslides, Subsidence, Floods, and Coastal Hazards. Westminster, CO: The American Institute of Professional Geologists, 1993.
- NUNES, A. J. C. Fundações em terrenos expansivos. In: 1º Seminário Regional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, p. 161-190, Salvador, 1978.
- OKONTA, F. Pavement geotechnical properties of polymer modified weathered semi-arid shale subgrade. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12(1), 54–63, 2019.
- OLIVEIRA, E. Emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão: estudo de caso no município de Ribeirão das Neves/MG. Dissertação (Mestre em Engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
- OLPHEN, H. V. An Introduction to Clay Colloid Chemistry. For clay technologists, geologists, and soil scientists. Interscience (Wiley), New York, 1963.
- OLSON, R. E.; LANGFELDER, L. J. Pore-water pressures in unsaturated soils. *J. Soil Mech. Found., ASCE*, 91, SM4: 127–160, 1965.
- PAIVA, S. C.; BARBOSA, V.; MELO, R. A.G. A.; SILVA, M. V.; DOMINGUES, F. D. B.; OLIVEIRA, A. F. F.; FERREIRA, S. R. M. Caracterização de Solo Expansivo de Cabrobó / PE Tratado com Cal. XVI. Anais, Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 551p. Porto de Galinhas, 2012.
- PAIVA, S. C.; LIMA, M. A. A.; FERREIRA, M. G. V. X.; FERREIRA, S. R. M. F. Propriedades

geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. *Revista Matéria*, Vol. 21 nº 2. P. 437-440, 2016.

PAIVA, W. Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo. Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Pernambuco. 193p. Pernambuco, 2009.

PALMEIRA, E. M. Introdução aos polímeros. Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente. Oficina de Textos, SP. Cap. 2. p. 17-25, 2018.

PARK, S. H.; KIM, S. H. Poly (ethylene terephthalate) recycling for high value added textiles. *Fashion and Textiles* 1, 1, 2014.

PEREIRA, E. M. Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada. São Carlos. Tese de Doutorado em Engenharia Geotécnica – USP – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

PEREIRA, A. Comportamento mecânico saturado e não saturado de um solo coluvionar de arenito. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 305, 2013.

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

PINTO, A. R. A. G. Fibras de Carauá e Sisal como Reforço em Matrizes de Solo. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil, 103p, 2008.

PITA, F.; CASTILHO, A. Plastics floatability: effect of saponin and sodium lignosulfonate as wetting agents. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 29 (3), 2019.

POURAKBAR, S.; ASADI, A.; HUAT, B. B. K.; FASIHNIKOUTALAB, M. H. Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (Pofa) and cement. *Transportation Geotechnics*, 3, 24-35, 2015.

PRESA, E. P. Deformabilidad d e las arcillas expansivas bajo succión controlada. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. 274 p. Madrid, 1984.

PRUSINSKI, J.R.; BHATTACHARJA. Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils. *Transportation Research Record*. Washington D.C, 1999.

QI, S.; VANAPALLI, S. Numerical study on expansive soil slope stability considering the effect of swelling behaviour and cracks. 2015.

RECYCLING INTERNATIONAL. Doetinchem, Holanda, 2016. Disponível em: <https://recyclinginternational.com/plastics/pet-consumption-to-exceed-20-million-tonnes-by-2021/4156/>

RIBEIRO, P. M. Comportamento Mecânico de uma Bentonita Reforçada com Borracha de Pneu e

- PET Triturado. Dissertação de Mestrado, 109 p, PUC-Rio, Rio de Janeiro-RJ, 2019.
- SAMANIEGO, R. A. Q. Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- SANTANA, E. R. R. Caracterização e Reconstrução mineralógica de carvão, caulim, calcário e de cinzas sulfatadas geradas à temperatura de um leito fluidizado visando sua aplicação na indústria cimenteira. Tese de Doutorado. UFRGS. Porto Alegre, 2002.
- SANTOS, M. F., LIMA, D. C., BUENO, B. S. Estabilização dos solos com cal e betume. In: 6º Reunião de pavimentação urbana, p.74 – 97, Santos – São Paulo, 1995.
- SALDANHA, R.B., CONSOLI, N. C. Accelerated Mix Design of Lime Stabilized Materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28 (3), 2016.
- SCHREINER, H. D. The use of predictive methods in expansive soil engineering. *Proceedings of the 9th African Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Lagos, 1, 135-142, 1987.
- SECO, A. et al. Sulfate soils stabilization with magnesium-based binders. *Applied Clay Science*, v. 135, p. 457–464, 2017.
- SEED, H. B.; WOODWARD, R. J.; LUNDGREN, R. Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 88, 107-131, 1962.
- SHIRLEY, M. F. Estudo do comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal para utilização na construção de rodoviárias. Dissertação de mestrado. 210p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2005.
- SILVA, J. A. A.; RODRIGUES, J. K. G.; CARVALHO, M. W.; LUCENA, L. C. F. L.; CAVALCANTE, E. H. Avaliação reológica de ligante modificado com Politereftalato de etileno (PET). *Materia-Rio de Janeiro*, v. 23, p. 1-12, 2018.
- SILVA, J. A. A.; RODRIGUES, J. K. G.; CARVALHO, M. W.; LUCENA, L. C. F. L.; CAVALCANTE, E. H. Mechanical performance of asphalt mixtures using polymer-micronized PET-modified binder. *Road Materials and Pavement Design*, v. 1, p. 1-9, 2017.
- SILVA, J. A. A.; RODRIGUES, J. K. G.; CARVALHO, M. W.; LUCENA, L. C. F. L.; COSTA, D. B. Use of Micronized Polyethylene Terephthalate (Pet) Waste in Asphalt Binder. *Petroleum Science and Technology*, v. 33, p. 1508-1515, 2015.
- SILVA, J. A. H. Solos expansivos - Comportamento, identificação, quantificação da instabilidade volumétrica e projetos de fundações (Parte II). *Geotecnia*, nº 14, p. 5 – 18, 1975.
- SILVA, M. F. Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico. Dissertação (mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 121p, 2016.

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

SILVANI, C.; LUCENA, L. C. F. L.; TENÓRIO, E. A. G.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; CONSOLI, N. C. Key Parameter for Swelling Control of Compacted Expansive Fine-Grained Soil-Lime Blends. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 146, p. 06020012, 2020.

SIMÕES, P. R. M. Aspectos relevantes sobre a implantação de obras de engenharia em solos e rochas expansivas. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento - Informe Técnico, n° 26, junho de. Camaçari – BA, 1987.

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

SMITHERS PIRA. The Future of PET Packaging to 2025. EUA, 2020. United Kingdom. Disponível em: <https://www.smithers.com/services/market-reports/packaging/the-future-of-pet-packaging-to-2025>.

SNETHEN, D.R. Characterization of Expansive Soils Using Soil Suction Data." 4th Int. Cont. on Expansive Soils. Vol. 1. Denver, CO, June 1980, pp. 54-75, 1980.

SNETHEN, D. R.; JOHNSON, L. D.; PATRICK, D. M. An evaluation of expedient methodology for identification of potentially expansive soils. Soil and Pavements Laboratory, U.S. Army Eng. Waterway Exp. Sta., Vicksburg, MS, 1977.

SOBRAL, H. S. Contribuição ao estudo de Massapê como solo para construção. Tese para Cátedra de matérias de Construção. Universidade Federal da Bahia. Escola de Belas Artes. Salvador-Bahia, 1956.

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

SOUZA, R. F. C. Estudo da influencia da sucção na pressão de expansão de materiais argilosos com a tecnica da transferencia de vapor. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo. 2015.

TAYLOR, R. K.; SMITH, T. J. The Engineering Geology of Clay Minerals: Swelling, Shrinking and Mudrock Breakdown. *Clay Minerals*, 21, 235-260, 1986.

TENÓRIO, E. A. G. Controle da expansão dos solos com resíduos de mármore e cal. 2019. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2019.

UMASABOR, R. I.; DANIEL, S. C. The effect of using polyethylene terephthalate as an additive on the flexural and compressive strength of concrete. *Heliyon*, Volume 6, Issue 8, 2020.

VALLEJO, L. I. G.; FERRER, M. *Geological Engineering* 1ª edição, CRC Press, 678 p, 2011.

VARGAS, M. *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Universidade de São Paulo. 1981.

VAN IMPE, W. F. V. *Soil improvement techniques and their evolution*. Rotterdam, 125 p. A. A. Balkema, 1989.

VIEIRA, E. M. S. *Avaliação da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos dispostos em aterro sanitário. Trabalho de Conclusão de Curso*. Universidade Federal de Campina Grande – Paraíba, 2018.

VILAR, O. M.; FERREIRA, S. R. M. "Solos colapsíveis e expansivos", In: *Solos não saturados no contexto geotécnico*, 1 ed., capítulo 15, São Paulo, ABMS, 2015.

WEAVER, C.E. *Clays, Muds and Shales. Developments in Sedimentology*, 44, 1-5, 1989.

WELLEN, R. M. R. ; RABELLO, M. S. . *Estudo da cristalização a frio do poli (tereftalato de etileno) (PET) para produção de embalagens*. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos (UFMG)*, v. 3, p. 1-9, 2008.

WHITTLE, C. K. *Comparisons of sedimentary chlorite compositions by X-ray diffraction and analytical TEM*. *Clay Minerals*, 21, 937–947, 1986.

WILLIAMS, B. A.; WILLIS, J. R.; ROSS, T. C. *Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage*. Federal Highway Administration Office of Preconstruction, Construction, and Pavements 1200 New Jersey Ave. SE Washington, DC, 2019.

WISE, J.; HUDSON, W. *An examination of expansive clay problems in Texas*. Center for Highway Research, Univ. of Texas, Austin, Res. Rep. 118-5, July. 1971.

YONG, R.; MOHAMED, A. M. O.; WARKENTIN, B. P. *Principles of Contaminant Transport in Soils*. Elsevier, 327p, Amsterdam, 1992.